华北平原冬小麦冠层导度的环境响应及模拟

黄 辉[1,2], 于贵瑞[1,*], 孙晓敏[1], 王秋凤[1], 赵风华[1,2], 李 俊[1], 欧阳竹[1]

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 通过引入叶面积指数, 将叶片水平的气孔导度组合模型扩展到冠层水平, 建立了冠层导度环境响应组合模型, 组合模型所需参数较少, 且均可在冠层水平直接测量, 便于应用; 模型由潜在气孔导度(*PSC*)和相对气孔开度(*RDO*)组成, 二者分别由环境变量的日际(inter-day)和日间(intra-day)的值决定。分析表明, 冠层导度在日际尺度和日间尺度上对环境变量具有多尺度响应特性, 在日际尺度上, 温度是影响冠层导度的主要因子, 在日间尺度, 光是影响气孔开闭的主要因素。利用以温度和光合有效辐射为输入变量构建的组合模型, 模拟了华北平原冬小麦农田生态系统的冠层导度, 并用 Penman-Monteith 方程估算的表面导度进行验证。结果显示, 在不同天气情况下, 二者的日变化均具有较好的一致性; 将组合模型与电学类比模型结合, 进一步估算了拔节-灌浆期的冠层潜热通量, 利用涡度相关系统观测的潜热通量数据进行验证, 结果表明对冬小麦冠层潜热通量模拟精度较高, 直线回归斜率为 0.7054, R^2 = 0.7894。

关键词: 冠层导度; 组合模型; 涡度相关; 潜热通量; 多尺度响应

文章编号: 1000-0933(2007)12-5209-13 **中图分类号**: Q948, Q142 **文献标识码**: A

The environmental responses and simulation of canopy conductance in a winter wheat field of North China Plain

HUANG Hui[1,2], YU Gui-Rui[1,*], SUN Xiao-Min[1], WANG Qiu-Feng[1], ZHAO Feng-Hua[1,2], LI Jun[1], OUYANG Zhu[1]

1 *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*

***Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5209 ~ 5221.**

Abstract: A leaf-scale combination model was modified to estimate canopy conductance (G_c) by introducing leaf area index (L). The modified model used only air temperature (T) and photosynthetically active radiation (Q_p) as input variables, which can be measured directly. The G_c is the product of the potential canopy conductance (*PSC*), which is the L-normalized maximum G_c (G_{Max}), and the relative degree of stomatal opening (*RDO*), which is the L multiplying by G_c normalized with G_{Max}. The *PSC* is estimated from the maximum values of T, and the *RDO* is estimated from diurnal variation of Q_p normalized by the maximum Q_p. We applied the modified combination model to a winter wheat ecosystem in North China Plain. We also estimated canopy-scale latent heat flux (λE_c) by coupling the combination model with the analogy of Ohm's law in electrics. Simulated λE_c for the winter wheat ecosystem was compared with that calculated from inverted

基金项目: 国家自然科学基金"杰出青年基金"资助项目(30225012); 国家自然科学基金重大资助项目(30590381)

收稿日期: 2007-04-25; **修订日期**: 2007-09-24

作者简介: 黄辉(1980 ~), 女, 湖南郴州人, 博士生, 主要从事生态系统过程机理及模拟研究. Email: huangh.05b@igsnrr.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yugr@igsnrr.ac.cn

致谢: 感谢中国生态系统研究网络(CERN)提供冬小麦作物生态监测数据和降水观测数据, 感谢中国科学院地理科学与资源研究所生态网络中心李胜功研究员对论文修改提出的宝贵意见, 中国农业大学资环学院应用气象系王靖博士、中国科学院地理科学与资源研究所生态网络中心胡中民博士在数据收集和论文写作过程中给予了很大帮助, 在此一并致谢。

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30225012, 30590381)

Received date: 2007-04-25; **Accepted date**: 2007-09-24

Biography: HUANG Hui, Ph. D. candidate, mainly engaged in mechanism and simulation of ecosystem process. E-mail: huangh.05b@igsnrr.ac.cn

Penman-Monteith equitation, and estimated λE_c with observation by the eddy covariance system. The combination model yielded a quite well diurnal dynamics of G_c. Estimated λE_c was in good agreement with that measured directly with the eddy covariance method. The slope and R^2 of the line regression between the observed and simulated λE_c are 0.705 and 0.79 (n = 1526), respectively.

Key Words: canopy conductance; combination model; eddy covariance; latent heat flux; multiscale response

气孔行为虽然是叶片的生理过程,却影响着冠层、区域乃至全球尺度的 CO_2、水汽和感热通量[1],它控制着从土壤、经植被到大气的水汽流,将区域及全球气候系统与生态系统的水、碳和营养循环联系起来[2]。气孔导度对区域大气环流和气候具有直接的控制作用[3,4],其准确描述是对预测生态系统水碳和营养流以及耦合陆面模式和大气模式有着关键的作用[5]。在叶片尺度上,气孔导度是量化气孔行为的参数,相对应地,冠层导度是量化气孔行为在冠层尺度上表现的参数。

迄今,冠层导度的模拟研究大多基于叶片尺度的气孔导度对环境响应的乘合模型[6]或气孔导度与光合的耦合模型[7~9]。其中,前者属于经验模型,随着模型中考虑的因子的增多,模型参数的确定变得困难,并且随着模拟时段的延长,模型的估算精度也会逐渐降低;后者属于半经验模型,但估算光合速率的模型多采用生化模型[10],计算过程复杂,应用不便,并且学者们对方程中的斜率(m)的取值方法也存在争议[11~15]。Yu 等[16]提出了一个组合模型,对 Jarvis 型模型进行了优化,该模型具有明确的机理意义,认为气孔在日际和日间尺度上对环境因子具有多尺度响应的特性,对于 4a 的试验数据也取得了很好的拟合结果,但研究是基于农田叶片尺度的瞬时观测,模型及其机理在冠层尺度的适用还有待证明和改进。

本研究以华北平原农田生态系统为研究对象,将冠层视作一个整体,忽略冠层内部复杂的反馈机制,通过引入叶面积指数,将叶片尺度气孔导度组合模型[16]扩展至在冠层尺度,通过分析冬小麦生长季内冠层导度在日际、半小时尺度上对环境因子的响应特性,建立了冠层导度环境响应组合模型,对生长季内的冠层导度进行了估算,并进一步结合电学类比模型,估算了冠层潜热通量。

1 模型描述

本研究将冠层视作"大叶",选取了叶面积指数≥4 的数据进行分析和模型验证,建立了估算冠层潜热通量的单源模型。基于单源模型的假设,将植被冠层视作单层封闭型冠层,忽略土壤蒸发,假设认为涡度相关测定的潜热通量主要来源于植被冠层的贡献,将基于 Penman-Monteith 方程计算的表面导度近似视为冠层导度。模型的原理图解见图 1,即:基于气孔的多尺度响应特性建立冠层导度组合模型,并将其与电学类比方程(Ohm 法则)结合模拟冠层蒸腾通量。

1.1 冠层导度

气孔开闭受多种因素影响,其运动机理十分复杂,但已有大量研究表明,环境因子的变化会对气孔行为产生影响,Jarvis[6]提出一个多变量乘合模型,被广泛应用于估算冠层导度:

$$G_c = G_{max} f(Q_p) f(D_e) f(\Psi_L) f(T_L) f(C_a) \tag{1}$$

式中,G_c和 G_{max}分别为冠层导度和它的最大值,Q_p、D_e、Ψ_L、T_L、C_a分别表示光、饱和差、叶水势、叶温、CO_2浓度等环境因子。Yu 等[16]对该模型进行了优化,提出了由潜在气孔导度(PSC)和相对气孔开度(RDO)乘积形式表达的组合模型:

$$g_s = PSC \cdot RDO = (g_{s,Max}) \cdot (g_s / g_{s,Max}) \tag{2}$$

或者:

$$g_s = PSC \cdot RDO = (g_{s,Mean}) \cdot (g_s / g_{s,Mean}) \tag{3}$$

式中,g_s为气孔导度;$g_{s,Mean}$为日平均气孔导度;$g_{s,Max}$为日最大气孔导度。

本文通过引入叶面积指数,将组合模型扩展至冠层,其表达为:

$$G_c = PSC \cdot RDO = (G_{Max}/L) \cdot L \cdot (G_c/G_{Max}) \tag{4}$$

或者:

$$G_c = PSC \cdot RDO = (G_{Mean}/L) \cdot L \cdot (G_c/G_{Mean}) \tag{5}$$

式中,L 为叶面积指数(m^2/m^2);G_c、G_{max}、G_{mean}分别为冠层导度及其日最大值和平均值;G_{max}/L、G_{mean}/L 分别表示单位叶面积的冠层导度最大值和平均值,PSC 和 RDO 分别由光合有效辐射(Q_p,μmol/(m^2 · s))、气温(T,℃)、土壤水分(W,m^3/m^3)和空气饱和差(D,kPa)的日际(inter-day)和日间(intra-day)变量决定。

本文的分析及模拟均基于日最大值进行,根据日际和日间尺度上冠层导度对环境变量响应特征的分析,可得出在日际尺度上温度是主要因子、日间中光是主要因子(见结论与讨论部分),并以此为原则进行逐步回归分析。

PSC 的估算子函数:

$$P_1(T_{max}) = a_1 + a_2 T_{max} + a_3 T_{max}^2 \tag{6}$$

$$P_2(T_{max}) = a_1 + a_2 T_{max} + a_3 T_{max}^2 \tag{7}$$

$$P_1(D_{max}) = b_1 + b_2 D_{max} \tag{8}$$

$$P_2(D_{max}) = (1 - b_1 D_{max})/(1 + b_2 D_{max}) \tag{9}$$

$$P(W_{max}) = (c_1 + c_2 W_{max}) \tag{10}$$

RDO 的估算子函数:

$$R(Q_p) = d_1 + d_2 Q_p/Q_{p,max} \tag{11}$$

$$R(D) = e_1 + e_2 D/D_{max} + e_3 D/D_{max}^2 \tag{12}$$

$$R(T) = f_1 + f_2 T/T_{max} + f_3 T/T_{max}^2 \tag{13}$$

式中,a_1 ~$f3$ 为回归系数,T、D、W、Q_p 分别为气温(℃)、空气饱和差(kPa)、土壤水分(m^3/m^3)和光合有效辐射(μmol/(m^2·s)),“Max”表示日最大值。

1.2　叶面积指数

采用经扩展的 Logistic 叶面积生长模型[17]模拟冬小麦不同生育阶段叶面积指数。首先对叶面积指数(L)和生长期作归一化处理,得到相对叶面积指数(RL_0):

$$RL_{0j} = \frac{Lj}{L_{max}} \tag{14}$$

式中,RL_{0j}为出苗后第 j 日的相对叶面积指数,最大值为 1,L_{max}为整个生育期的最大叶面积指数。冬小麦以抽穗期为界限,之前(营养生长期)的积温(出苗—抽穗前一日)用 AT_1表示,之后(生殖生长期)积温(抽穗日—成熟期)用 AT_2表示:

$$\begin{cases} AT_1 = \sum_{j=1}^{n-1} T_j \\ AT_2 = \sum_{j=n}^{m} T_j \end{cases} \tag{15}$$

则生长期归一化公式为:

$$DS_j = \begin{cases} \dfrac{\sum T_j}{AT_1} \\ 1 + \dfrac{\sum T_j}{AT_2} \end{cases} \tag{16}$$

式中,n 表示冬小麦出苗—抽穗日,m 表示冬小麦抽穗日—成熟期天数,T_j为逐日平均气温,DS_j为积温归一化后数值。营养生长期 DS_j取值范围为 0 ~ 1,生殖生长期取值范围为 1 ~ 2。以 RL_{0j}为因变量,DS_j为自变量,模型表示为[17]:

$$RL_{0j} = \frac{1}{1 + \exp(k_1 + k_2 DS_j + k_3 DS_j^2)} \tag{17}$$

式中,$k_1 \sim k_3$ 为常数。

1.3 潜热通量

类比于电学上的欧姆定律,冠层上的蒸腾速率(E_c)可表示为[18]:

$$E_c = \frac{W_i - W_a}{r_c + r_B} \tag{18}$$

式中,W_i和 W_a分别表示冠层气腔和大气中的水汽摩尔分量(mol/mol),阻力均以(m^2·s)/mol 为单位。当将阻力换算为 s/m 的单位、用水汽压差和大气压比值来代替水汽摩尔分量时,式(18)可表示为:

$$E_c = M_w \rho_{am} \frac{(e_w(T_c) - e_a)/P}{r_c + r_B} \tag{19}$$

由 $\lambda E_c = \lambda \cdot E_c$,则植被冠层的潜热通量可表示为:

$$\lambda E_c = M_w \rho_{am} \lambda \frac{(e_w(T_c) - e_a)/P}{r_c + r_B} \tag{20}$$

式中,E_c为冠层水汽通量(kg/(m^2·s));$e_w(T_c)$为冠层温度(T_c)下的饱和水气压(kPa);e_a为实际大气水气压(kPa);P 为实际大气压(kPa);r_c为冠层阻力(冠层导度的倒数)(s/m);r_B为冠层边界层阻力(s/m);λ 为水的汽化潜热(J/kg),本文取 2.45×10^6[19];M_w为水的摩尔质量,本文取 18×10^{-3} kg/mol;ρ_{am}为 25℃时空气的摩尔密度(mol/m^3),本文取 40[20]。

1.4 边界层阻力

对于叶片两面都有气孔分布的植物,其冠层边界层阻力可表示为[18]:

$$r_B = \frac{100a}{2L} \frac{(w/u_h)}{1 - \exp(-\alpha/2)} \tag{21}$$

式中,α 为冠层内风速的衰减系数,取值 2.5[21];L 为叶面积指数(m^2/m^2);w 为叶宽(m),本文取值为 0.02;u_h为冠层高度(h)处风速(m/s)。

2 材料与方法

2.1 实验区概况

本文研究站点选取中国科学院禹城综合试验站(36°57′N,116°38′E,海拔 23.4m),该站位于山东省禹城市,地貌类型为黄河中下游冲积平原,地势低平,属暖温带半湿润季风气候区,多年平均气温为 13.1 ℃,降雨量 582 mm,太阳辐射总量 5225 MJ/m^2,日照时数 2640 h,无霜期 200 d。该站雨热同期,光热、地下水资源丰富,引黄灌溉条件良好,自然条件和农业生产水平在黄淮海平原具有代表性和典型性。土壤母质为黄河冲积物,以潮土和盐化潮土为主,表层土壤质地为轻—中壤土,根层土壤质地为砂壤土。土壤有机质含量为 1.21%,pH 值为 7.9 ~ 8.0。该站是农业试验站,作物种植制度以冬小麦/夏玉米轮作一年两熟制。

2.2 观测方法及供试作物

实验用全自动涡度相关系统测定作物冠层的水、热与 CO_2通量,采用全自动小气候观测系统同步测定太阳辐射、大气温湿度、土壤温湿度等数据[22]。涡度相关系统及小气候梯度观测架位于大片均匀农田的中心。涡度相关系统主要由三维超声风速温度计(CSAT3,Campbell Sci. Inc.,USA)和快速响应的 LI-7500 型开路红外 CO_2/ H_2O 分析仪(Li-Cor Inc.,USA)组成,可直接测定作物冠层上方的三维风速、湿度、温度 CO_2浓度的平均值和瞬时脉动值;上述系统与 CR5000 型数据采集器(Campbell Sci. Inc.,USA)相连,昼夜连续自动采集,采样频率为 10Hz,每 30 min 输出一组平均值。

小气候梯度观测系统包括 2 层 AR-100 型 3 杯风速计(Vector Instruments,UK)和 2 层 HMP-45C 型温湿度传感器(Vaisala,Finland);光合有效辐射由 LI-190SB 型点状光量子表(Li-Cor Inc.,USA)测定。温湿度传感器平均高度为 2.20 m 和 3.40 m,超声风速温度计平均高度为 2.80 m,随作物高度变化调整[23]。土壤热通量由

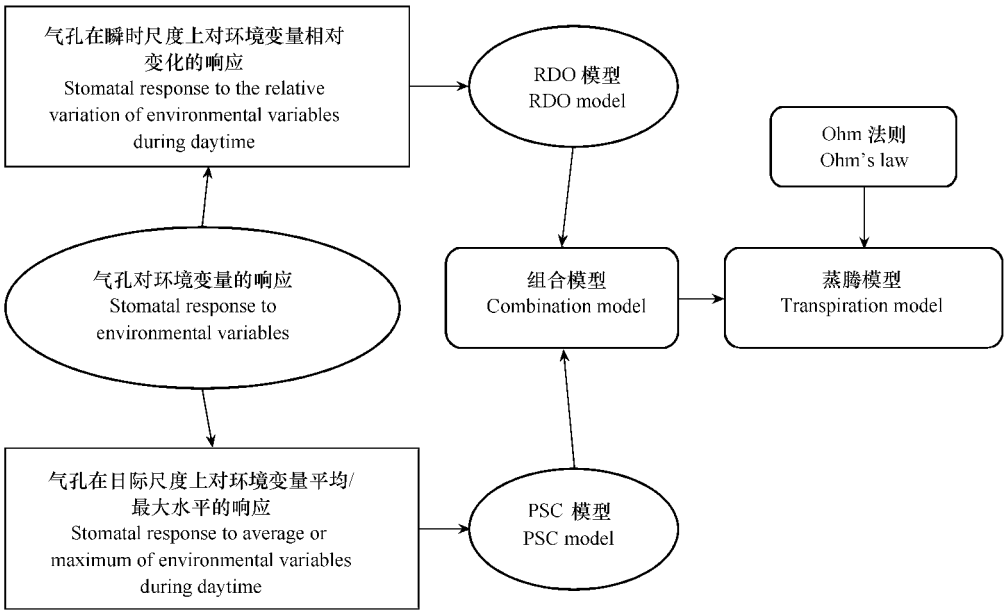

图 1　基于组合模型估算冠层蒸腾的原理示意图

Fig. 1　The outline of the study for estimating canopy transpiration rate based on a combination model (*PSC* signifies the potential canopy conductance, and *RDO* the relative degree of stomatal opening)

埋放在株间、行间土表下 2 cm 的 2 块 HFP010SC 型土壤热流板(Hukseflux, Netherland)测定;土壤水分由 TDR 测定,安装深度为地下 10 cm 和 30 cm,本研究取 10 cm 表层土壤水分。上述仪器均与 CR23x 型数据采集器(Campbell Sci. Inc., USA)相连,每 30 min 输出一组平均值。

供试作物为冬小麦(科禹 13),于 2003 年 10 月 23 日播种,2004 年 6 月 13 日收获,追肥施量为 245.3 kg N/hm^2。实验地与周围大片农区相连,构成大范围均一的下垫面,风浪区长度在 200 m 以上,满足了微气象梯度观测的要求。在实验期间,每隔 7 日测定冬小麦的叶面积指数和株高,所有仪器均经过严格的标定,以确保实验数据的可靠性。灌溉和施肥充分,使其生长不受水肥限制。

由于模型为"单源模型",为了尽量降低土壤蒸发的影响,本文选取 2004 年冬小麦拔节-灌浆期间(4 月 2 日 ~5 月 23 日)共 52 d 的数据进行研究,该时期是冬小麦生长最旺盛的时期,期间的叶面积指数较高(图 4),冠层较为封闭。其中,挑选晴朗、少雨天气条件下 15 d(拔节末期 ~ 抽穗-灌浆期)的数据进行参数拟合,其余 37 d 的数据用作模型的验证。

2.3　冠层导度的计算

本研究使用基于 Penman-Monteith 方程计算的冠层导度(G_c)进行参数确定和模型验证:

$$G_c^{-1} = \left(\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{H}{\lambda E} - 1\right) r_a + \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{D_r}{\lambda E} \tag{22}$$

式中,Δ 为饱和水气压曲线斜率(kPa/K);C_p为干空气定压比热(J/(kg·K)),本研究取值 1005[24];γ 为干湿表常数(kPa/K),本研究取值 0.067[25];D_r为参考高度处大气饱和水气压差(kPa);ρ 为空气密度(kg/m^3);H 和 λE 分别为涡度相关方法观测的感热和潜热通量(W/m^2);r_a为空气动力学阻力(s/m)。

在中性层结下,根据 Monin-Obukhov 相似理论,封闭冠层的冠层空气动力学阻力可表示为:

$$r_a = \frac{1}{k^2 u_r}\left[\ln\left(\frac{Z_r - d}{Z_0}\right)\right]^2 \tag{23}$$

式中,Z_r为参考高度(m),本研究取值 2.05;u_r为参考高度处风速(m/s);d 和 Z_0分别为零平面位移和地表粗糙度(m);k 为 Von Karmaen 常数,本研究取值 0.4[19]。

d 和 Z_0 由下式估算[26]：

$$d = 0.63\sigma_a h \tag{24}$$

$$Z_0 = (1 - \sigma_a) Z_b + \frac{\sigma_a (h - d)}{3} \tag{25}$$

式中，h 为作物高度(m)，本研究用 Logistic 模型估算；Z_b 为裸地的粗糙度(m)，本研究取值 0.01[27]；σ_a 为动量分配系数，与叶面积指数有关[28]：

$$\sigma_a = 1 - \left(\frac{0.5}{0.5 + L}\right)\exp\left(-\frac{L^2}{8}\right) \tag{26}$$

2.4 通量数据处理

本研究处理数据流程为：(i)对半小时观测数据进行 3 次坐标旋转以消除地面不平整对通量观测的影响[29]；(ii)根据 Webb 方程对旋转后数据进行水热校正[30]；(iii)为了避免降水对开路式红外分析仪的影响，获得准确的水热通量信息，剔除同期有降水的数据；(iv)冬小麦生长期间设定水热通量数据阈值为[-200, 600](W/m^2)，以剔除明显的异常值；(v)为了讨论水汽通量和冠层导度的长期变化，利用平均日变化法(MDV)对水热通量缺失数据进行插补；同时，为了避免数据插补引起的误差，模型的参数分析和验证均采用未经插补的原始数据。

3 结果

3.1 生长季的气候、土壤状况

研究站点位于我国华北平原，主要受大陆性季风气候影响，降水的季节性分配不均，一年中降水主要集中在夏季，春季较为干旱。2003 ~2004 季冬小麦生长季内光温条件良好(图 2a,b)，全生育期内降水为 129.4 mm，土壤表层(0 ~5 cm)的日平均体积含水量变化范围为0.16 ~0.48 m^3/m^3(图2c)，并且对冬小麦另有几次充足的灌水，土壤水分一般不低于田间持水量的65%，保证不受水分亏缺的影响。

冬小麦灌浆初期和灌浆末期对温度敏感，一般上限温度在 26 ~28℃。2004 年冬小麦灌浆初期温度和水分条件适宜，平均气温在 15.0 ~21.6 ℃，大气饱和差在 0.60 ~1.20 kPa，土壤体积含水量在 0.28 ~0.34 m^3/m^3，灌浆末期平均气温在 19.5 ~23.7 ℃，土壤体积含水量在 0.25 m^3/m^{3}左右，而大气干旱程度加重，空气饱和差可高达 1.91 kPa。

3.2 水汽通量和冠层导度的季节变化

如图 3，水汽通量的季节变化与作物的生育期有较好的一致性：在冬小麦生长阶段早期，水汽通量保持在较低的水平；随着冬小麦的生长和叶面积指数的增加，蒸腾也急剧增加。

图 3 显示的冠层导度为冬小麦返青-成熟时期的变化，可见，冬小麦拔节后冠层导度达到最大，自拔节末期冠层导度降低，抽穗后冠层导度开始增加，开花后逐渐下降。

3.3 叶面积指数和冠层高度的模拟

用扩展的 Logistic 叶面积生长模型[17]和 Logistic 模型对冬小麦 LAI 和冠层高度的模拟结果较好(图 4)，直线回归斜率分别为 0.9747 和 0.9915，R^2分别为 0.9338 和 0.9878。冬小麦在拔节后 LAI、冠层高度达到最大水平。由图 3、图 4a 可看出，本文选取的研究时段(4 月 2 日 ~5 月 23 日)为冬小麦拔节 ~灌浆期，也是该作物生长最旺盛的时期，期间的叶面积指数、冠层导度及水汽通量处于生长季最高水平，因此可将该时期的冠层视为单层封闭型，单涌源模型的理论可以适用。

3.4 冠层导度的模拟

本研究的分析及模拟均基于日最大值进行，由于冠层导度日变化的不稳定性，仅选用 10:00 ~16:00 的数据进行分析和参数拟合。由图 9、图 10 可见，在不同时间尺度上影响冠层导度的主要环境因子不同，在日际尺度上温度是影响冠层导度的主要因素、日间尺度上光是主要因素，基于此分析结果，对组合模型各参数进行逐步回归分析。

表 1 为 *PSC* 和 *RDO* 的多元回归分析的决定系数，可见，*PSC* 和 *RDO* 分别依式(6)、(9)、(10)以及式

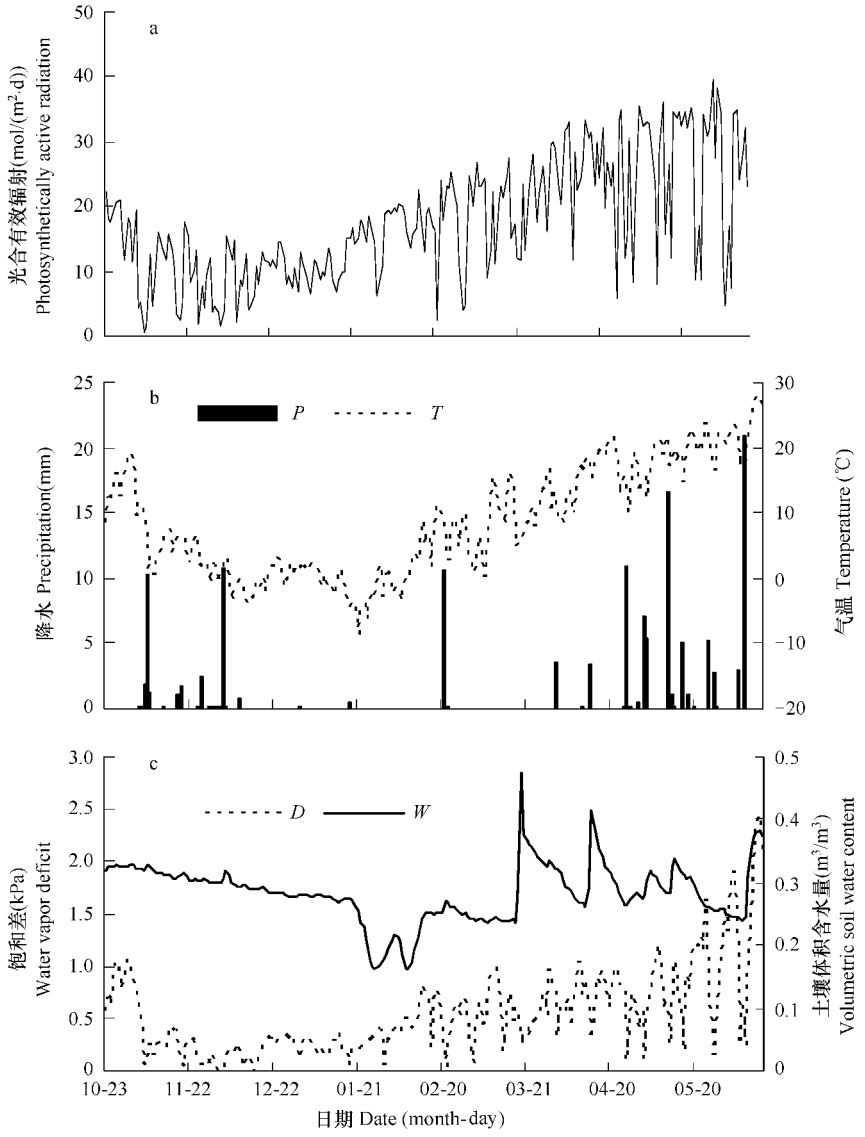

图 2　冬小麦生长季内环境因子的季节变化

Fig. 2　Seasonal variations of environmental factors during the growth period of winter wheat

a. 光合有效辐射;b. 降水 (P)和气温 (T);c. 大气饱和差 (D) 和土壤体积含水量 (W);光合有效辐射、降水为日总量;饱和差和土壤水分为日平均值　a. Photosynthetically active radiation (Q_p);b. Precipitation (P) and air temperature (T);c. Water vapor deficit(D) Volumetric soil water content at 5 cm depth (W);Q_p and P are daily sum values. D and T are daily average values

(11)、(12)、(13)的组合可以获得最高的模拟精度,但为了模型的简化,仅以式(6)及(11)也可以获得较好的模拟结果。本文将式(6)及(11)构建的组合模型模拟的冠层导度与式(22)的计算结果进行了比较(图 5),模型的拟合参数见表 2。可见,组合模型仅以较少的输入变量,就可获得较好的模拟结果,并且在不同天气情况下,模拟值与实测值的日变化均有较好的一致性。

3.5　冠层潜热通量的模拟

将组合模型(式(6)及(11))与式(20)结合,可模拟冠层潜热通量,模型的参数见表 2。利用涡度相关系统观测的潜热通量数据(拔节及灌浆期、LAI 大于 4 的生长阶段内观测质量稳定、同期无降水的数据)进行验证,结果显示,在不同天气情况下,基于组合模型估算的冠层潜热通量均与涡度相关实测值有比较好的一致性(图 6),图 6a(n =232)和 6b(n =211)模拟值与实测值的直线回归斜率(sl)分别为 0.9369 和 0.6980,R^2分别为 0.8783 和 0.9161。对比拔节-灌浆期间 EC 观测值与模拟值(图 7),结果显示二者有比较高的相关性,sl =

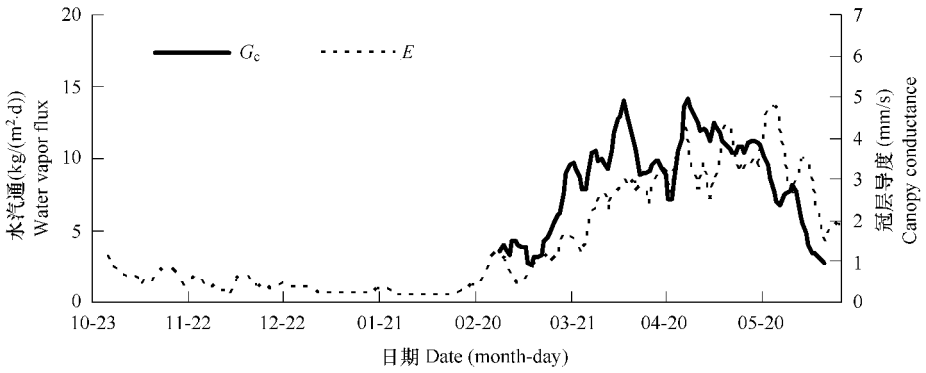

图3 冬小麦生长季内水汽通量(E)和冠层导度(G_c)的连续5日滑动平均值

Fig.3 Five-days slide averages of water vapor flux (E) and canopy conductance (G_c) during the growing season of winter wheat

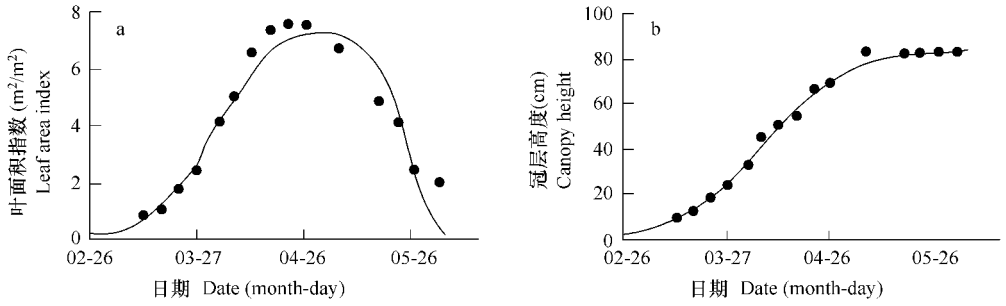

图4 叶面积指数(a)和冠层高度(b)的模拟值(实线)与实测值(点)在生长季内的变化

Fig.4 Seasonal varations of simulated (solid line) and observed (dots) leaf area index (a) and canopy height (b)

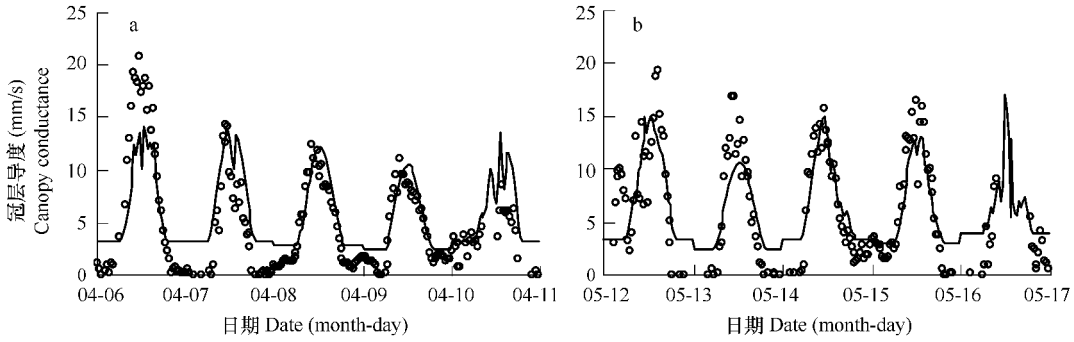

图5 冠层导度模拟值(实线)与P-M方程计算值(点)的日变化

Fig.5 Diurnal variations of simulated (solid line) and P-M calculated (dots) canopy conductance

a. 拔节初期. 5日的天气情况分别是:多云、晴、晴、晴、小雨;b. 灌浆初期. 5日的天气情况分别是:小雨转晴、晴、阴到多云、晴间多云、中雨

a. During the early shooting period. The weather was cloudy on April 6, sunny during April 7-9, and light rain on April 10, respectively; b. During the early filling stage. The weather was sunny with light rain early on May 12, sunny on May 13, mostly cloudy on May 14, mostly sunny on May 15, and middle rain on May 16, respectively

0.7054, $R^2=0.7894$ ($n=1526$)。

4 结论与讨论

通常认为,光是影响气孔开闭的主要因素。Yu 等[16]指出,在不同时间尺度下,环境因子对气孔导度影响的相对重要性不同,在日间尺度上,光是影响气孔的主要因素,而在日际变化中,光并不是主要因素,并把气孔

表 1　估算 *PSC* 和 *RDO* 的不同模型表达的回归决定系数

Table 1　Coefficients of determination for estimating *PSC* and *RDO* from different combination models

模型 Model	模型表达 Model expression	R^2	模型表达 Model expression	R^2
PSC	$P_1(T_{Max})P_1(D_{Max})P(W_{Max})L$	0.88224	$P_1(T_{Max})P_2(D_{Max})L$	0.89433 *
	$P_2(T_{Max})P_1(D_{Max})P(W_{Max})L$	0.85628	$P_2(T_{Max})P_2(D_{Max})L$	0.85618
	$P_1(T_{Max})P_2(D_{Max})P(W_{Max})L$	0.90253 *	$P_1(T_{Max})P(W_{Max})L$	0.88008
	$P_2(T_{Max})P_2(D_{Max})P(W_{Max})L$	0.85655	$P_2(T_{Max})P(W_{Max})L$	0.85454
	$P_1(T_{Max})P_1(D_{Max})L$	0.88195	$P_1(T_{Max})L$	0.87465 *
	$P_2(T_{Max})P_1(D_{Max})L$	0.85296	$P_2(T_{Max})L$	0.85232
RDO	$R(Q_p)R(D)R(T)$	0.62573 *	$R(Q_p)R(T)$	0.59176
	$R(Q_p)R(D)$	0.61443 *	$R(Q_p)$	0.58984 *

* 表示模型表达中决定系数最高的组合　Numbers with stars (*) show the highest coefficient of determination

表 2　*PSC* 和 *RDO* 模型的参数

Table 2　Values of parameters used in *PSC* and *RDO* models

模型 Model	模型表达 Model expression	参数 Parameter	备注 Remark
PSC	$P_1(T_{Max})$ L	a_1 1.387617022; a_2 0.250153969; a_3 −0.008959686	式 (6) Eq. (6)
		k_1 8.840104923; k_2 −19.06684983; k_3 8.228538418	式 (17) Eq. (17)
RDO	$R(Q_p)$	d_1 0.212907996; d_2 0.706795213	式 (12) Eq. (12)

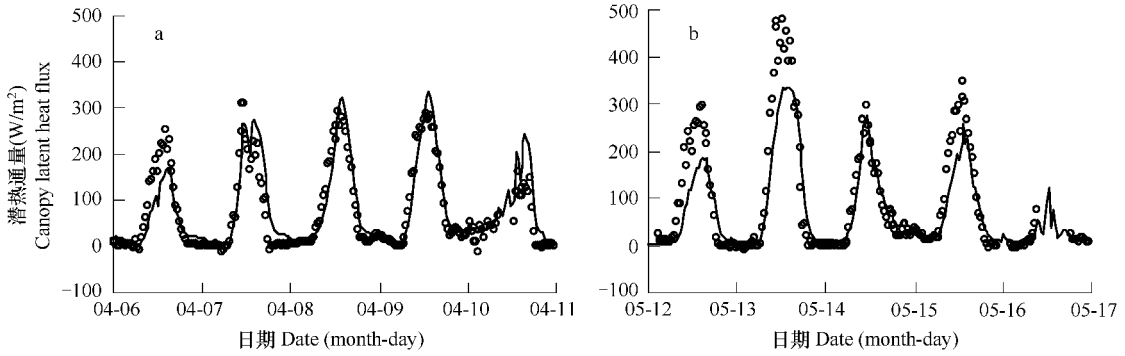

图 6　潜热通量模拟值（实线）与涡度相关法观测值（点）的日变化

Fig. 6　Diurnal variations of simulated (solid line) and measured (dots) latent heat flux

a. 拔节初期;b. 灌浆初期.（图中点为实测值,线条表示模拟值）　a. During the early shooting period; b. During the early filling stage

这种在不同时间尺度上对环境因子的响应特性称为“多尺度响应特性”,提出了气孔导度组合模型。以往 Jarvis 型模型[6]未能考虑到不同时间尺度上环境胁迫对气孔开闭的影响,因此对较长时期的模拟精度有所下降[16],而组合模型考虑到这一点,因而对 4 年这样较长的时期能取得好的模拟效果,并且在土壤水分胁迫条件下也能适用[31]。

通过分析不同时间尺度上冠层导度对环境变量的响应特征,本文进一步证实,冠层水平的气孔行为也表现出“多尺度响应特性”。如果不区分时间尺度(图 8),冠层导度仅对温度表现出明显的负相关关系;如将日最大值视作日际尺度上的变化,半小时的数值则构成日变化,可见,在日际尺度上(图 9),光合有效辐射与冠层导度并没有很好的相关性,温度是主要影响因子(R^2 =0.80),其次是饱和差(R^2 =0.28);而在日间尺度上

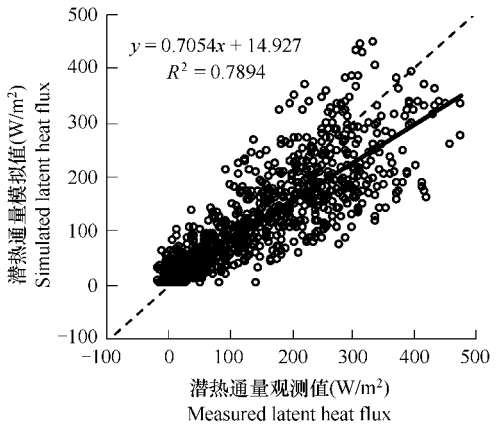

图 7　潜热通量模拟值与观测值的比较

Fig. 7　Comparison between measured and simulated values of latent heat flux

虚线为 1∶1 线,实线为拟合直线,n = 1526　Broken and solid lines are 1∶1 and regression lines, respectively; n = 1526

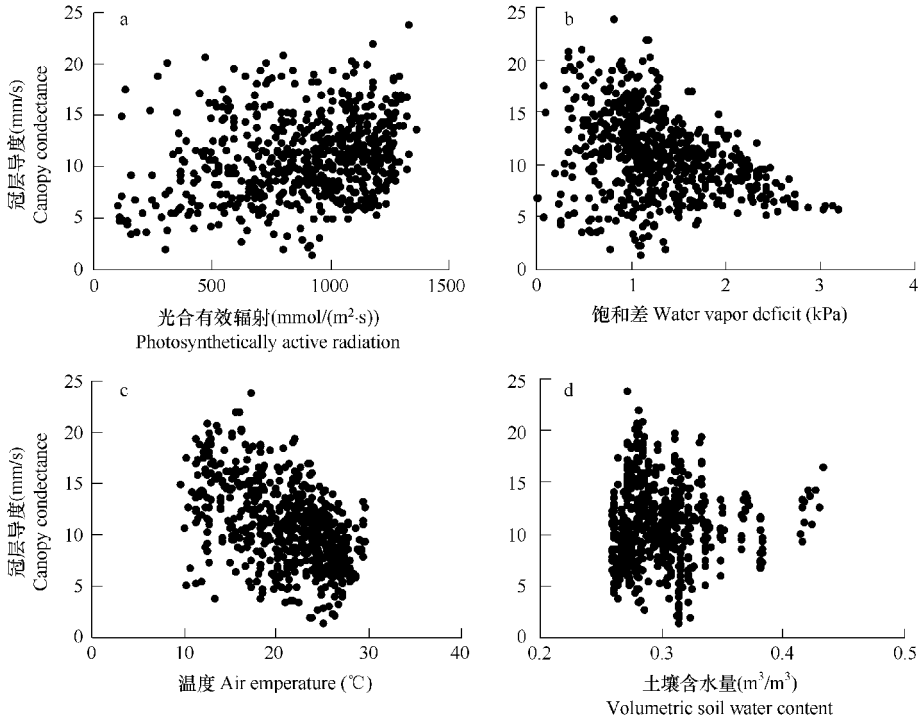

图 8 冠层导度与光合有效辐射(a)、饱和差(b)、温度(c)、土壤水分(c)的关系

Fig. 8 Relationships between canopy conductance and major environmental factors: photosynthetically active radiation (a), water vapor deficit (b), air temperature (c) and volumetric soil water content (d)

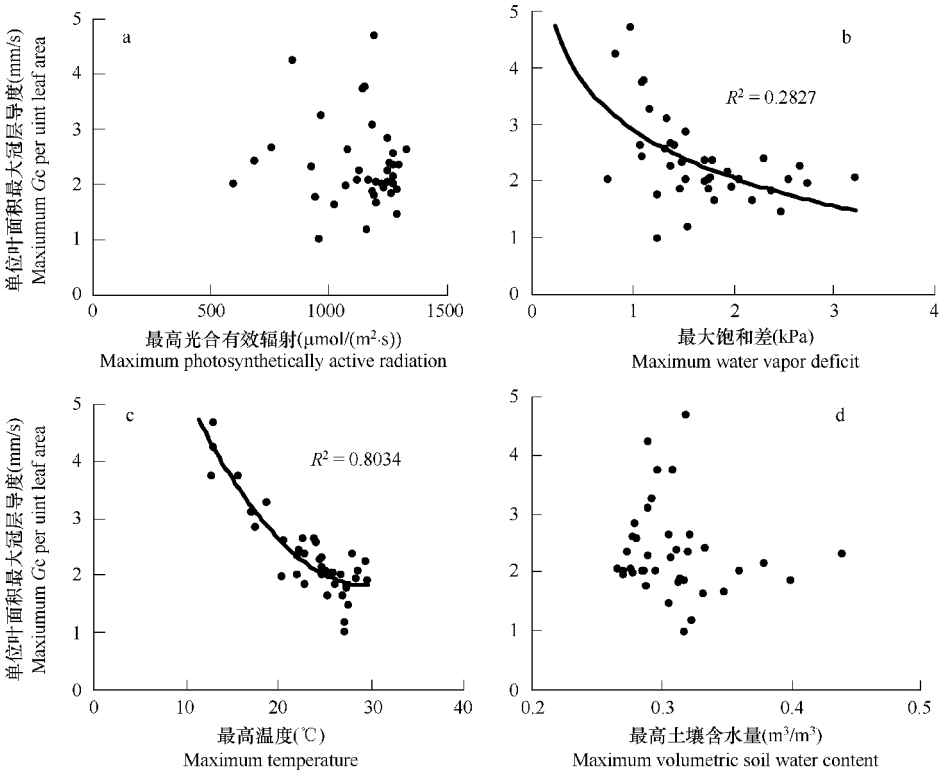

图 9 单位叶面积的日最大冠层导度与环境因子日最大值的关系

Fig. 9 Relationships between maximum canopy conductance (G_{Max}) per unit leaf area and maximum values of major environmental factors

a. 光合有效辐射 photosynthetically active radiation; b. 饱和差 water vapor deficit; c. 温度 air temperature; d. 土壤水分 volumetric soil water content; 实线为拟合曲线 Solid lines are fitted curves

(图 10),光是影响冠层导度的主要因素($R^2=0.35$),这与 Yu 等[16]结果相似。并且基于此分析结果,本研究建立了模型参数化方案的原则,取得了较好的模拟结果,这表明,组合模型的原理不仅在叶片水平适用,同样适用于冠层尺度。

通常,植物在白天的气孔开度受土壤水分和大气湿度影响[32~35],但大气湿度在短时间内即可影响气孔运动,并引起蒸腾的瞬时变化,而土壤水分在一天中变化梯度不如大气相对湿度明显,更多的是影响着蒸腾的日平均值,而土壤水分通常比大气湿度在影响气孔、调节蒸腾方面更为重要[36]。但对于大田水平下生长的作物,其土壤水分的日变化并不明显,本研究显示,冬小麦的冠层导度与土壤水分并没有很好的相关关系(图 9、图 10),而对大气干燥程度(饱和差)则有较好的响应(图 9)。此外,试验的站点对冬小麦生长季内几个主要生态需水期都进行了充足的灌溉,没有出现土壤水分亏缺的情景,因而其冠层导度对土壤水分并不及空气干燥度敏感。本研究分析及模型验证时,对冬小麦选取了拔节-灌浆期间的数据,也是其对水分需求最为旺盛的时期,故可以视作对水分比较敏感的时期,但并不能代表整个生育期的变化。

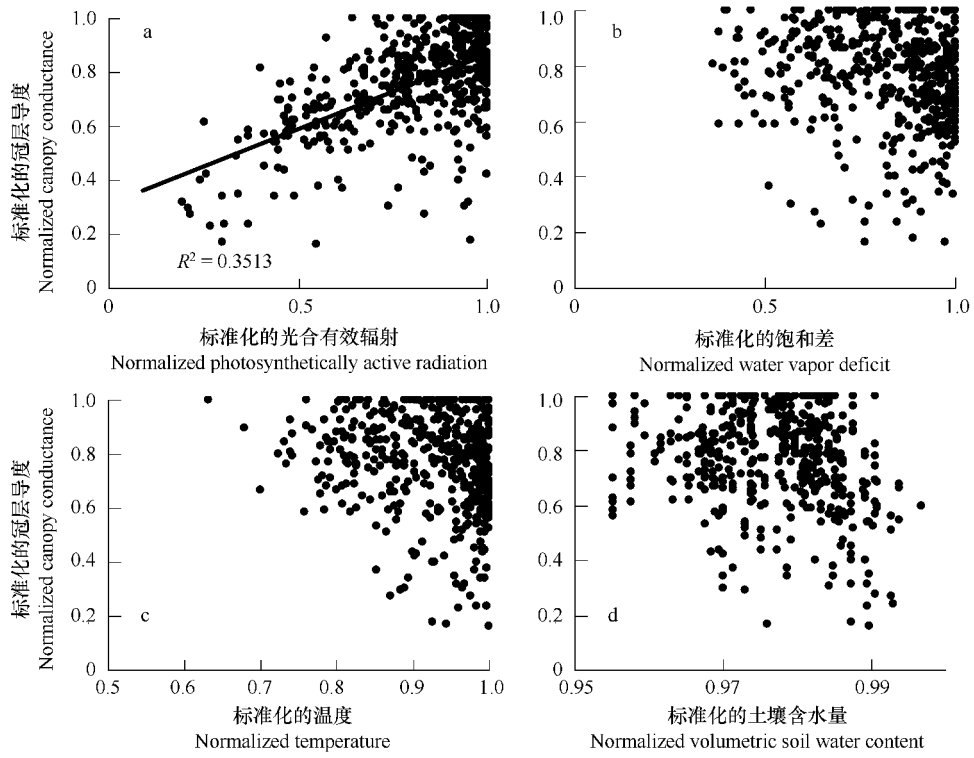

图 10　标准化的冠层导度与标准化的环境因子的关系

Fig. 10　Relationships between G_{Max}-normalized canopy conductance and normalized major environmental factors by maximum values

a. 光合有效辐射 photosynthetically active radiation;b. 饱和差 water vapor deficit;c. 温度 air temperature;d. 土壤水分 volumetric soil water content;实线为拟合曲线 Solid line is fitted curve

本文通过引入叶面积指数,将叶片水平的气孔导度组合模型扩展到冠层水平,模拟了华北平原冬小麦生长旺季内的冠层导度,并将组合模型与电学类比方程结合进一步估算了冠层潜热通量。结果表明,组合模型能以较少的输入变量(温度和光合有效辐射),取得较好的模拟结果,并且在不同天气情况下,模拟值与实测值均有很好的一致性。冠层导度在日际及日间尺度上对环境变量具有多尺度响应特性,即:在日际尺度上,温度是影响冠层导度的主要因子;在日间尺度上,光是影响气孔开闭的主要因素。

本研究将冠层视为“大叶”,基于“单源模型”的假设,没有考虑土壤蒸发的影响,因而仅适用于密植的农田,模型也只能模拟生长旺季时期;如欲将组合模型应用于整个生长季,考虑到土壤蒸发的“双源模型”或许能获得更准确的结果,这在未来的研究中需要考虑。此外,组合模型在其它生态系统类型及环境胁迫条件下

的适用性,也需要进一步的研究。

References:

[1] Collatz G J, Ribas-Carbo M, Berry J. A Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants. Australian Journal of Plant Physiology, 1992, 19: 519 −538.

[2] Kelliher F M, Leuning R, Raupachb M R, *et al*. Maximum conductances for vaporation from global vegetation types, Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 73: 1 −16.

[3] Avissar R and Pielke R A. The impact of plant stomatal control on mesoscale atmospheric circulations, Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 54: 353 −372.

[4] Sellers P, Hall F, Kelly R, *et al*. BOREAS in 1997: Experiment overview, scientific results, and future directions. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 28731 −28769.

[5] Pielke R A, Baron J, Chase T, *et al*. Use of mesoscale models for simulation of seasonal weather and climate change for the Rocky Mountain states. In: Goodchild M F, Steyaert L T, Parks B O, *et al*. GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues. GIS World, Inc., 1996. 99 −103.

[6] Jarvis P G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Philosophical Transactions of Royal Society, Series B, 1976, 273: 593 −610.

[7] 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. In: Biggins I ed. Progress in Photosynthesis Research. the Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers, 1987. 221 −224.

[8] Leuning R. Modeling stomatal behavior and photosynthesis of Eucalyptus grandis. Australian Journal of Plant Physiology, 1990, 17: 159 −175.

[9] Leuning R. A critical appraisal of a combined stomatal- photosynthesis model for C_3 plants. Plant, Cell and Environment, 1995, 18: 339 −355.

[10] Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C_3 species. Planta, 1980, 149: 78 −90.

[11] Collatz G J, Ball J T, Grivet T C, *et al*. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. Agricultural and Forest Meteorology, 1991,54: 107 −136.

[12] Sala A, Tenhunen J D. Site-specific water relations and stomatal response of *Quercus ilex* L. in a Mediterranean watershed. Tree Physiology, 1994, 14: 601 −617.

[13] Baldocchi D D. Flux footprints within and over forest canopies. Boundary-Layer Meteorology, 1997, 85: 273 −292.

[14] Cornic G and Massacci A. Leaf photosynthesis under drought stress. In: Baker N R ed. Photosynthesis and Environment. the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996. 347 −366.

[15] Dickson R E and Tomlinson P T. Oak growth, development and carbon metabolism in response to water stress. Annals of Forest Science, 1996, 53: 181 −196.

[16] Yu G R, Nakayama K, Matsuoka N, *et al*. A combination model for estimating stomatal conductance of maize (*Zea mays* L.) leaves over a long term. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 92: 9 −28.

[17] Lin Z H, Xiang Y Q, Mo X G, *et al*. Normalized leaf area index model for summer maize. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11: 69 −72.

[18] Yu G R. Progress in Evapotranspiration models for terrestrial vegetation of different canopy types. Resources Science, 2001, 23: 72-84.

[19] Brutsaert W. In: Evaporation into the Atmosphere. the Netherlands: Reidel Publishing Company, 1988. 299.

[20] Jones H G. Plants and Microclimate 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1992. 163 −214.

[21] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops-An energy combination theory. The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111: 839 −855.

[22] Zhang Y Q, Yu Q, Liu C M, *et al*. Simulation of CO_2 and latent heat fluxes in the North China Plain. Science in China, Series D, 2004, 34: 152 −160.

[23] Li J, Yu Q, Sun X M, *et al*. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain. Science in China, Series D, 2006, 36: 210 −223.

[24] Allen R G, Prreira L S, Raes D, *et al*. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. FAO Irrigation and Drainage, FAO of UN Rome: 1998. 56.

[25] Goudriaan J. Crop micrometeorology: a simulation study, Wageningen, the Netherlands: Center for Agricultural Publishing and Documentation, 1977. 55 −123.

[26] Mehrez B M, Taconet O, Vidal-Madjar D, *et al*. Estimation of stomatal resistance and canopy evaporation during the HAPEX-Mobilhy experiment. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 58: 285 －313.

[27] Van Bavel C H M, Hillel D I. Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. Agricultural Meteorology, 1976,17: 453 －476.

[28] Shaw R H, Pereira A R. Aerodynamic roughness of a plant canopy: A numerical experiment. Agricultural Meteorology, 1982, 26: 51 －65.

[29] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99: 127 －150.

[30] Webb E K, Pearman G L, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106: 85 －100.

[31] 于貴瑞, 中山敬一, 呂厚橦. 環境変数を用いたトウモロコシ葉の気孔コンダクタンスのモデリング. 農業気象, 1996, 52: 321 －330.

[32] Schulze E D and Hall A E. Stomatal response, water loss and CO_2 assimilation rates of plants in contrasting environments, in: Lange, O L, Nobel, P S, Osmond, C B eds. Physiological plant ecology Ⅱ, Water relations and carbon assimilation. New York: Springer-Verlag, 1982. 12B: 181 －230.

[33] Schulze E D. Carbon dioxide and water vapour exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. Annual Review of plant Physiology, 1986, 37: 247 －274.

[34] Schulze E D. Soil water deficits and atmospheric humidity as environmental signals, in: Smith J A C and Griffiths H ed. Water Deficits: Plant response form cell to community. Oxford: Bios Scientific Publishers, 1993. 129 －146.

[35] Whitehead D. Regulation of stomatal conductance and transpiration in forest canopies. Tree Physiology, 1998, 18: 633 －644.

[36] Rodriguez-Iturbe I, Porporato A. Ecohydrology of water-controlled ecosystems: Soil moisture and plant dynamics. New York: Cambridge University Press, 2004. 86 －88.

参考文献:

[17] 林忠辉, 项月琴, 莫兴国, 等. 夏玉米叶面积指数增长模型的研究. 中国生态农业学报, 2003, 11: 69 ~ 72.

[18] 于贵瑞. 不同冠层类型的陆地植被蒸发散模型研究进展. 资源科学, 2001, 23: 72 ~ 84.

[22] 张永强, 于强, 刘昌明, 等. 植被光合、冠层导度和蒸散的耦合模拟. 中国科学 D 辑, 2004, 34: 152 ~ 160.

[23] 李俊, 于强, 孙晓敏, 等. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制. 中国科学 D 辑, 2006, 36 (增刊 I): 210 ~ 223.