

土壤-植物-大气连续体水热动态模拟的研究

康绍忠

(西北农业大学, 陕西杨陵)

摘 要

本文从能量平衡原理和质量守恒定律出发, 描述了土壤-植物-大气连续体中的热量转换和水分输送, 模拟了系统中水分和热量的动态变化过程, 并用所建立的模拟模型计算了冬小麦群落的冠层温度、叶水势及系统的潜热与显热变化关系, 结果表明该模型有一定的可靠性。

关键词: 土壤-植物-大气连续体, 动态, 模拟。

土壤-植物-大气连续体 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum, 简称SPAC) 是农业生态系统的重要组成部分。SPAC水热动态模拟对于了解该系统中潜热、显热、植株蒸腾、土壤蒸发和叶水势、叶温、地面温度等因素的变化规律有极重要作用。

植被内部温度分布、湍流阻力分布十分复杂, 冠层不同层次的叶片蒸腾和消光作用也相差较大。如果假设植被内部的湍流阻力为零、温度、湿度和 CO_2 浓度在冠层内部则处处相等, 问题就大大简化。Goudriaan(1977) 和 Stigter(1977) 的研究都表明这种简化是可行的。依据上述假定, 研究SPAC水热动态模拟时将系统分为地上植物和地下土壤两个部分, 不考虑各状态变量的空间变化而取平均值, 根据能量与水量的平衡方程及水流的连续性方程建立这两个部分的水热交换模式, 即可求解地上植物部分的叶温、叶水势和蒸腾速率与地下部分的土壤表面温度、蒸发速率及SPAC中潜热、显热等状态变量的动态变化过程。

一、SPAC水热动态的数学模拟模型

1. 地上植物冠层的能量平衡

冠层所接收的净辐射白天达到数百 W/m^2 , 夜间达负的数十 W/m^2 , 而光合耗能对于禾本科植物白天为 $6-16\text{W}/\text{m}^2$, 夜间 $-3\text{W}/\text{m}^2$ (Monteith, 1973)。因此, 对于以日为单位的周期时间, 如将冠层光合作用耗能忽略不计, 则冠层所接收的净辐射主要用于蒸腾潜热和显热交换, 根据能量传输理论可写出蒸腾潜热和显热交换的表达式, 代入冠层能量平衡方程, 即有:

$$R_{n0}(1 - e^{-K \cdot LAI}) - LAI \cdot \rho C_p (T_l - T_a) / r_{sl} - LAI \cdot \frac{\rho C_p}{\gamma} [(e_s - e_a) + \Delta (T_l - T_a)] / (r_{sl} + r_{al}) = 0 \quad (1)$$

式中: R_{n0} 为冠层上方总净辐射, LAI 为叶面积指数, K 是冠层消光系数, ρ 是空气密度, C_p 是空气定压比热, T_l 和 T_a 是叶温和气温, e_s 和 e_a 是空气饱和水汽压与实际水汽压, γ 是湿

* 国家自然科学基金资助课题。

本文于1990年1月15日收到。

度计常数, Δ 是饱和水汽压-温度曲线上的斜率, $r_{s,i}$ 是叶气孔阻力, $r_{a,i}$ 是冠层周围空气的水汽扩散阻力。式(1)即为 $f(T_i) = 0$ 形式的隐式方程。

2. 地下土壤部分的能量平衡

土壤表面的净辐射主要用于蒸发潜热、显热交换和土壤热交换。土壤表面的显热交换表达式类似于冠层的, 土壤表面的蒸发潜热用下式表达:

$$\lambda \cdot E = \frac{\rho C_p}{\gamma} (h \cdot e_{s,i} - e_a) / (r_{a,i} + r_{s,i}) \quad (2)$$

式中: λE 是蒸发潜热, $r_{a,i}$ 是土壤表面与空气间的水汽扩散阻力, $r_{s,i}$ 是由于土壤表面干燥下层水汽扩散通过表层的阻力, h 是土壤表层的相对湿度, $e_{s,i}$ 是土壤表层的饱和水汽压。 h 和 $e_{s,i}$ 的计算式(Camillo等, 1983)为:

$$h = e^{\psi_m \cdot g / RT_s} \quad (3)$$

$$e_{s,i} = \frac{RT_s}{1000} \cdot e^{(8.0035 - 4976.0 / T_s)} \quad (4)$$

式中 ψ_m 是地表 0—0.5m 的土壤水分基模势, g 是重力加速度, R 是气体常数, T_s 是地面温度。考虑 1m 土层内土壤热通量的变化, 把土壤表面的能量平衡方程各项代入, 整理后得:

$$R_{s,0} \cdot e^{-k_z L \Delta T} - \rho C_p (T_s - T_a) / r_{a,i} - \frac{\rho C_p}{\gamma} \left(\frac{RT_s}{1000} \cdot e^{(\psi_m \cdot g / RT_s - 4976.0 / T_s + 8.0035)} - e_a \right) / (r_{a,i} + r_{s,i}) - \bar{\lambda}_1 (T_s - T_1) = 0 \quad (5)$$

式中: $\bar{\lambda}_1$ 是 1m 土层中的平均导热率, 其值采用 De Vries (1975) 公式计算, T_1 是 1m 深处的土壤温度。式(5)即为 $f(T_s) = 0$ 形式的隐式方程。

3. SPAC 的水分通量与水分状况

若不考虑植物体内细胞贮水量的微小变化, 则可认为 SPAC 中的水流是恒定流, 通过各部分的水流量相等, 且用 Van den Honert (1948) 方程式计算, 对于从根木质部到叶片蒸腾面的水流量为:

$$CT = (\psi_s - \psi_t) / (R_s + R_p) \quad (6)$$

式中: ψ_s 与 ψ_t 分别是土水势和叶水势, R_s 和 R_p 分别是水从土壤流到根表面的阻力和水流通过植株体的阻力。从蒸腾面到大气的水流量用 Penman-Monteith (1965) 方程计算:

$$CT = [\Delta(1 - e^{-k_z L \Delta T}) \cdot R_{s,0} + \rho C_p (e_s - e_a) / r_{s,i}] / [\lambda(\Delta + \gamma(1 + r_{s,i} / r_{a,i}))] \quad (7)$$

式中: λ 为汽化潜热。

二、SPAC 水热状况的求解

1. 冠层水热状况的求解

式(1)是关于 T_i 的隐式方程 $f(T_i) = 0$, 本文采用迭代法求解。首先假定 $T_i = T_a + 5^\circ\text{C}$, 记为 $T_i^{(1)}$, 用式(10)通过试算法确定 $r_{s,i}^{(1)}$, 代入式(5)求 $f(T_i^{(1)})$, 直至 $|[f(T_i^{(n)}) - f(T_i^{(n-1)})] / f(T_i^{(n-1)})| \leq \varepsilon$ (ε 为给定的相对误差限, 本文令 $\varepsilon = 0.01$) 为止。满足允许误差要求时的 $T_i^{(n)}$ 即为求得的叶温结果, 用所求得的 T_i 和 $r_{s,i}$ 代入显热 A_i 、蒸发潜热 λT 和蒸腾速率 CT 表达式得相应的值。水热状况的求解过程用图 1 中的计算流程表示。

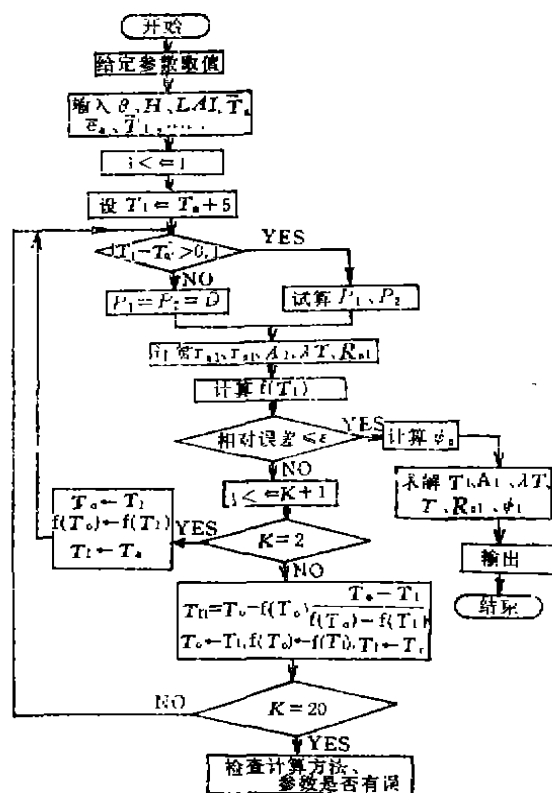


图1 求解植物冠层水热状况流程图

Fig.1 The flow chart for calculation water and heat balance of plant canopy layer by a heration method

2. 土壤水热状况的求解

土壤表面平衡方程(式(5))也是关于 T_s 的隐式方程 $f(T_s) = 0$, 仍采用迭代法求解。其具体步骤与图1中流程类似。

3. 模型中变量的输入和参数取值

(1) 气象因素输入

为了进行连续系统的模拟, 必须设置连续的时间变量 t , 气象因素的日变化需以连续的时间序列输入。假定气温 T_a 、实际水汽压 e_a 、净辐射 $R_{s,0}$ 、地温 T_1 都呈余弦波形式变化, 只不过 T_a 、 e_a 和 T_1 相对于 $R_{s,0}$ 的变化有滞后作用, 分别表示为:

$$T_a(t) = \bar{T}_a + T_{a,R} \cdot \cos \frac{\pi}{12} (t-14) \quad (a)$$

$$\cos \frac{\pi}{12} (t-14)$$

$$e_a(t) = \bar{e}_a + e_{a,R} \cdot \cos \frac{\pi}{12} (t-14) \quad (b)$$

$$\cos \frac{\pi}{12} (t-14)$$

$$T_1(t) = \bar{T}_1 + T_{1,R} \cdot \cos \frac{\pi}{12} (t-16) \quad (c)$$

$$\cos \frac{\pi}{12} (t-16)$$

$$R_{s,0}(t) = \bar{R}_{s,0} + \bar{R}_{s,0,R} \cdot \cos \frac{\pi}{12} (t-12) \quad (d)$$

$$\cos \frac{\pi}{12} (t-12)$$

(8)

式中: $\bar{T}_a$ 、 $\bar{e}_a$ 、 $\bar{R}_{s,0}$ 、 $\bar{T}_1$ 分别为气温、实际水汽压、净辐射和地温的日平均值, $T_{a,R}$ 、 $e_{a,R}$ 、 $R_{s,0,R}$ 和 $T_{1,R}$ 分别为各自的日变幅, t 为时间, 从午夜零点开始以小时计。 $\bar{R}_{s,0}$ 可从日照时数气温和水汽压计算, 即:

$$\bar{R}_{s,0} = 0.75 Q_A \left(a + b \cdot \frac{n}{N} \right) - \sigma (273 + \bar{T}_a)^4 (0.56 -$$

$$0.079 \sqrt{\bar{e}_a}) (0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \quad (9)$$

式中: Q_A 为理论太阳辐射, n/N 分别是实照时数和可照时数, σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 经西安辐射台资料分析 $a = 0.2048$, $b = 0.4325$ 。

风速的瞬时变化大, 模拟时按逐小时的实测值代入。

(2) 其它变量的输入

除了输入上述气象因素外, 还需输入冠层消光系数 K 、叶面积指数 LAI 、冠层高度 H 、

0—50cm和0—100cm土层的含水率及相应的土壤基质势 ψ_m 和 ψ_s 。

(3) 模型中参数的取值

参数的取值如下: ρ 为 1.29kg/m^3 , C_p 为 $1000\text{J/kg}\cdot^\circ\text{K}$, r 为 $0.66\text{hpa}/^\circ\text{K}$, λ 为 $2.453\times 10^3\text{J/kg}$, R 为 $4.615\times 10^2\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot^\circ\text{K}^{-1}$, σ 为 $5.67\times 10^{-8}\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{K}^4$, g 为 9.8m/s^2 , θ_F 为 23.5% (占干土重的%), $\theta_{L,L}$ 为 29.8% (占干土重的%)。土壤孔隙率 ε 为 49% , 水的导热率 λ_w 为 $0.574\text{W/m}\cdot^\circ\text{K}$, 土壤骨架的导热率 λ_s 为 $8.8\text{W/m}\cdot^\circ\text{K}$, 空气的导热率 λ_a 为 $2.51\times 10^{-2}\text{W/m}\cdot^\circ\text{K}$ 。

三、SPAC水热动态模拟结果的验证

用本文提出的SPAC水热动态模拟模型和相应的求解方法模拟了西北农业大学灌溉试验站1989年3—6月冬小麦群落的水热状况。今选择两个代表日为例加以说明, 这两个代表日是1989年4月14日和5月31日。试验在西北农业大学灌溉试验站(东经 $108^\circ 04'$, 北纬 $34^\circ 18'$, 海拔521m)进行, 试验区四周较开阔, 能代表大田的小气候条件。试验过程中观测了土壤含水率、作物冠层叶水势、气孔阻力、蒸腾速率、叶温、作物高度和叶面积指数、冠层的净辐射和空气温、湿度、风速、地表温度和1m土层深处的地温。各种观测项目的具体试验方法见文献〔5〕。

4月14日冬小麦株体高度 $H=39\text{cm}$, $LAI=3.20$, $K=0.55$, 0—50cm土层内的 $\psi_m=-2.6\times 10^5\text{pa}$, 相应的土壤含水率 $\theta=18.05\%$, 0—100cm土层的 $\psi_s=-2.1\times 10^5\text{pa}$, 相应的平均含水率 θ 为 18.54% , 4月 $Q_A=422.43\text{W/m}^2$, $N=13.0\text{h}$ 。4月14日实照时数 $n=7.1\text{h}$, $\overline{R_{s,0}}=154.18\text{W/m}^2$, $R_{s,0R}=289.09\text{W/m}^2$, $\overline{T_a}=15.4^\circ\text{C}$, $\overline{T_{aR}}=9.2^\circ\text{C}$, $\overline{e_a}=10.2\text{hpa}$, $e_s=6.5\text{hpa}$, $\overline{T_1}=12.0^\circ\text{C}$, $T_{1R}=2^\circ\text{C}$ 。

5月31日作物植株高度 $H=81.24\text{cm}$, $LAI=4.60$, $K=0.55$, $\psi_m=-3.2\times 10^5\text{pa}$, 相应的 $\theta=16.16\%$, $\psi_s=-3.0\times 10^5\text{pa}$, 相应的 $\theta=17.01\%$ 。5月 $Q_A=470.16\text{W/m}^2$, $N=13.9\text{h}$ 。5月31日 $n=8.3\text{h}$, $\overline{R_{s,0}}=166.69\text{W/m}^2$, $R_{s,0R}=287.93\text{W/m}^2$, $\overline{T_a}=18.7^\circ\text{C}$, $T_{aR}=13.1^\circ\text{C}$, $\overline{e_a}=11.4\text{hpa}$, $\overline{e_{aR}}=10.6\text{hpa}$, $\overline{T_1}=16.1^\circ\text{C}$, $T_{1R}=2.6^\circ\text{C}$ 。

从图2可知: 蒸腾通量在上午11时达最大值, 土壤蒸发中午12时后达最大值, 蒸腾、蒸发在总散发量中所占的比例在一日内不同的时间不同, 上午11时左右蒸腾所占的比重较大, 早晚所占的比重较小。模拟值和实测值之间是较为一致的, 中午12时至下午3时模拟的蒸腾通量和实测值偏差稍大, 这可能是由于中午气孔部分关闭所产生的“午睡”现象而造成的。两天中4月14日的叶面积小, 虽然5月31日已到小麦生长后期, 但由于田间充分供水, 叶片仍未枯黄, 因而叶面积指数仍然较大, 所以5月31日棵间蒸发占的比重小于4月14日的。因此, 棵间蒸发与植株蒸腾在总散发量中所占的比例与叶面积密切相关, 叶面积指数小, 则棵间裸露部分大, 叶片截光较少, 土壤表面所接收的净辐射较多, 棵间蒸发占的比重增大, 相反则植株蒸腾占的比重较大。模拟结果所表现的这种变化规律是符合实际的。

从图3可看出潜热 λET 亦是在上午11时达最大值, 净辐射在中午12时达最大值, 显热 A 在下午2时左右达最大值。显热通量在早8时前和下午17时后为负值, 显热和潜热在总净辐射中的比例在一日内视天气条件而变化, 当风速为中等且空气较干燥时, 潜热占的比重大;

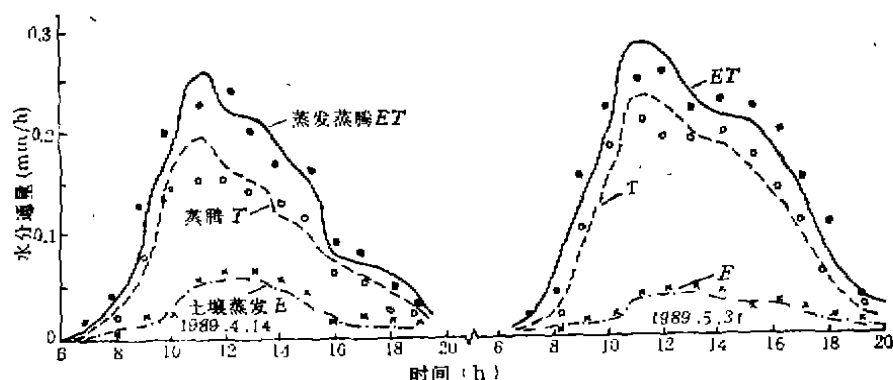


图2 模拟的SPAC水分通量(线)和实测值的比较
Fig.2 Comparison of simulated and measured water flux in SPAC

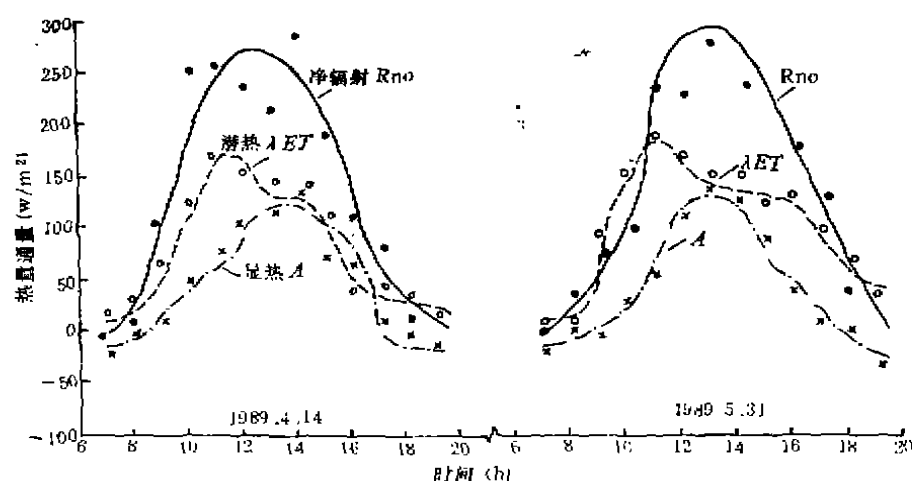


图3 模拟的SPAC热量状况(线)与实测值的比较
Fig.3 Comparison of simulated and measured heat states in SPAC

中午气孔阻力 r_s 增大,因此在中午12:00至下午2:00左右潜热下降,显热相对增加。从图3还可看出模拟值与实测值是较一致的。

我们用该法模拟的叶水势、叶温、地表温度与实测值也较为一致。因此,用本文提出的SPAC水热动态模拟方法具有较好的代表性。本文提出的模型需要1m土层深处的地温和土壤含水量输入资料,若能用土壤水热耦合运移动力学方程和定解条件求解土壤含水量和温度的分布,则不需要输入地温、土壤含水量资料,使试验观测项目减少,但模拟的复杂性会大大增加,这是需要进一步解决的问题。

参 考 文 献

- [1] Monteith, J.L., 1975, *Vegetation and the Atmosphere*, Vol.1, Principles, Academic Press, London, pp. 111—131.
- [2] Camillo, P. I., Gurney, R.J., 1986, A Resistance Parameter for Bare-Soil Evaporation Models, in *Soil Science*, 14(2):95—105.
- [3] B.J.Choudhary, S.B. Jais, 1984, Simulating Sunflower Canopy Temperature to Infer Root-zone Soil Water Potential, in *Agric and Forest Meteorology*, 31(1):69—78.

- [4] H.G. Jones, 1983, *Plants and Microclimate—A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*, Cambridge University Press, Cambridge, London, pp.85—103.
- [5] 康绍忠等, 1990, 土壤-植物-大气连续体水分运移力能关系的田间试验研究, *水利学报*, (7): 1—8.
- [6] 邵明安等, 1986, 土壤-植物-大气连续体中水流阻力及相对重要性, *水利学报*, (9): 8—14.

SIMULATION ON WATER AND HEAT DYNAMICS IN SOIL-PLANT-ATMOSPHERE CONTINUUM

Kang Shao-Zhong

(Northwestern Agriculture University, Yangling, Shanxi Province)

Based on the principles of energy balance and mass conservation the heat transformation and water transport processes in a soil-plant-atmosphere continuum system have been described, and canopy temperature, leaf water potential, latent and sensible heats, and soil surface temperature were calculated for winter wheat with the simulation model established in this paper. The results show that the simulated values are very close to the measured values. This model and method presented in this paper are demonstrated to have a certain reliability.

Key words: soil-plant-atmosphere continuum, dynamics, simulation.