

一种新的植被热红外辐射模型*

李正直 董国权

(杭州大学物理系, 浙江, 杭州, 310028)

摘要: 以植被的能量平衡方程为基础, 根据植被内的湍流交换模式及辐射能的传输过程, 考虑了风速、气温和水汽压廓线等影响, 建立了一个适合于林冠的3层植被热红外辐射模型。用了新的计算方法, 大大地提高了模型收敛速度。实验数据检验结果表明: 所建的模型能正确地模拟植被各层温度随不同气象条件、不同植被结构等参数的变化。

关键词: 植被, 红外辐射, 热模型, 遥感模型。

引言

植被的热辐射受到植被所处环境和本身的结构及生理等因素的影响, 目前普遍采用模型来研究它的热红外辐射特性。植被热红外辐射模型常可分为单层与多层模型, 单层模型^[1,2]仅适合低矮的植被; 对较高的植被, 因冠顶与底部间环境变量变化较大, 用多层模型对植被分层, 可以详细地分析天空、各层植被和土壤组成系统的辐射能交换, 以及冠层内风速、水汽压力与气温的变化。

本文根据植被冠层内辐射能的传输过程及湍流交换模式, 以大气—植被—土壤三者的能量平衡为基础, 在 Kimes 和 Smith 3层模型^[3,4]基础上, 并考虑到植被冠层内风速、水汽压及气温廓线的变化, 采用新的计算方法, 建立了新的3层植被热红外辐射模型; 模型经实验检验表明: 本文所建立的植被热辐射模型能正确地模拟植被冠层温度随不同的气象条件、植被结构等参数的变化。

1 模型基本原理

对于较高的植被(如林冠), 冠层内的气温、水汽压等环境变量变化较大, 我们把它分成三个子层, 即相当于把冠层内的气温、水汽压及冠层温度分成三个独立的变量。每一子层植被接收来自天空、其它两子层及土壤的热辐射能; 接收天空与太阳的短波辐射能; 同时通过该子层本身的发射、蒸发及热传导三种方式传递能量保持本身的能量平衡。对所考

本文 1991 年 7 月 31 日收到, 修改稿 1992 年 3 月 16 日收到。

*国家自然科学基金资助项目。

察的系统而言, 植被上方的大气、3子层植被与土壤构成一整体. 图1即表示了其感热、潜热与净辐射能的输送过程. 对3层植被我们可列出其稳态热平衡方程为:

$$R_{ni} + H_i + LE_i = 0, \quad (i = 1, 2, 3). \quad (1)$$

由感热与潜热交换的连续性可以得到:

$$H_{ai-1} = H_i + H_{ai}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

$$LE_{ai-1} = LE_i + LE_{ai}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

在图1及式(1)~(3)中, R_{ni} 为*i*层植被子层的净辐射能通量密度, H_i 与 LE_i 分别表示*i*子层植被得到的感热与潜热通量密度, H_{ai} 与 LE_{ai} 分别为*i*层空气层输送至下一层空气的感热与潜热通量密度, T_a 与 e_a 为参考高度处大气的气温与水汽压, T_g 与 e_g 分别为土壤表面温度和 T_g 时的饱和水汽压.

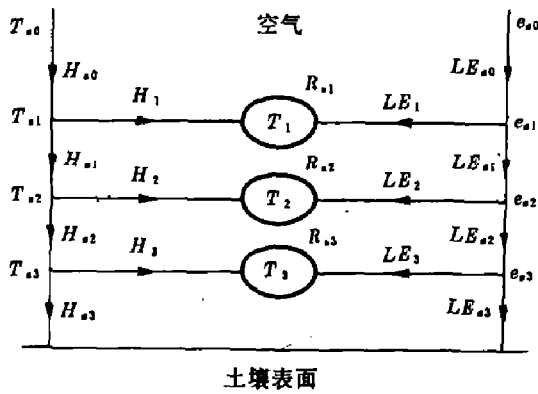


图1 感热与潜热在大气—植被—土壤系统中的分配

Fig. 1 Arrangement of sensible heat, latent heat fluxes in the soil-canopy-atmosphere continuum

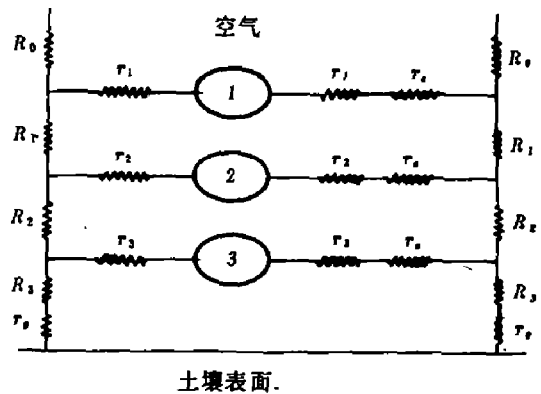


图2 感热与潜热通量传输阻力图

Fig. 2 Arrangement of resistances to both heat and latent heat flow

在式(1)中, 我们忽略了植被冠层中的水平辐射通量, 物理的存贮以及生物化学的存贮^[5].

仿照欧姆定律, 我们以阻力的形式来表示感热与潜热通量密度(见图2). 并设 R_0 为植被上方参考高度处至第一子层间的空气动力学阻力, R_1 、 R_2 、 R_3 和 r_g 分别为3个子层和土壤表面处的空气动力学阻力, r_s 表示植物叶子的气孔阻力. 由上述各阻力, 相应的感热、潜热通量密度可表示为:

$$H_i = \rho C_p (T_{ai} - T_i) / r_i, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

$$LE_i = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{e_{ai} - e_i}{r_i + r_s}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

$$H_{ai} = \frac{\rho C_p (T_{ai} - T_{ai+1})}{R_i}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

$$LE_{ai} = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{e_{ai} - e_{ai+1}}{R_i}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

$$LE_{a3} = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{e_{a3} - e_g M_g}{R_3 + r_g}, \quad (8)$$

$$H_{a3} = \frac{\rho C_p (T_{a3} - T_g)}{R_3 + r_g}, \quad (9)$$

式(4)~(9)中 ρ 为空气密度, C_p 为空气定压比热, γ 为湿度常数, T_i 为第 i 子层植被温度; T_{ai} 与 e_{ai} 分别为 i 子层的气温与水汽压, e_i 与 e_g 分别代表在 T_i 和 T_g 温度时的饱和水汽压, M_g 为地表含水因子, r_i 为边界层阻力.

式(4)~(9)中的各阻力值可根据风速廓线, 由空气动力学方法求出^[5].

植被冠层内部的风速廓线通常可以用指数函数表示, 而植被上方的风速廓线可以分为惯性层和粗糙层两个区域, 可分别用两种不同的数学表示式来表示^[6]. 在中性层结的情况下, 风速 u 的廓线可以表示为(见图 3):

$$u = \begin{cases} \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right), & (Z_0 \leq Z) \\ u_w - \frac{u_*}{k} \left(1 - \frac{Z_a - d}{Z_w - d}\right), & (Z_1 \leq Z < Z_w) \\ u_h \exp\left(-\frac{n\xi}{2}\right), & (0 < Z < Z_1) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中 u_* 为摩擦速度, k 为卡曼常数, Z_0 与 d 分别为粗糙度系数与零平面位移. n 是风速在冠层内的衰减系数, 一般植被 n 取 2~4. u_w 为 Z_w 处的风速, $\xi = 1 - Z/Z_1$, 其中 Z_1 为植被的高度. $Z_w = d(1 - \alpha) + \alpha Z_1$, 其中 α 为处在 1~2 间的常数.

根据参考高度处的风速, 由式(10), 可以得到 u_* , 还可得到 Z_w 处的风速 u_w 及植被冠层顶端处的风速 u_h 分别为:

$$u_w = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{Z_w - d}{Z_0}\right), \quad (11)$$

$$u_h = u_w - \frac{u_*}{k} \left(1 - \frac{Z_1 - d}{Z_w - d}\right). \quad (12)$$

确定了植被上方及内部的风速廓线, 也就确定了植被上方及内部的湍流交换模式, 在各区域, 其湍流交换系数可分别表示为:

$$\begin{cases} K_1 = ku_* (Z - d), & (Z \geq Z_w) \\ K_2 = ku_* (Z_w - d), & (Z_1 \leq Z \leq Z_w) \\ K_3 = u(Z)K_h / u_h, & (0 < Z < Z_1) \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中 $K_h = ku_* (Z_1 - d)\alpha$, 即为高度 Z_1 处的湍流交换系数.

如果所需的气象参数均在参考高度 Z_a 处测量得到, 那么各空气动力学阻力为:

$$\begin{aligned} R_0 &= \int_{Z_w}^{Z_a} \frac{1}{K_1} dZ + \int_{Z_1}^{Z_w} \frac{1}{K_2} dZ + \int_{\frac{Z_1+Z_2}{2}}^{Z_1} \frac{1}{K_3} dZ \\ &= \frac{1}{ku_*} \ln\left(\frac{Z_a - d}{Z_w - d}\right) + \frac{1}{ku_*} \ln\left(\frac{Z_w - Z_1}{Z_w - d}\right) + \frac{2Z_1}{nK_h} [e^{\frac{n}{2}(1 - \frac{Z_1+Z_2}{2Z_1})} - 1], \quad (14) \end{aligned}$$

$$R_1 = \int_{\frac{Z_2+Z_3}{2}}^{\frac{Z_1+Z_2}{2}} \frac{1}{K_3} dZ = \frac{2Z_1}{nK_h} [e^{\frac{n}{2}(1-\frac{Z_2+Z_3}{2Z_1})} - e^{\frac{n}{2}(1-\frac{Z_1+Z_2}{2Z_1})}], \quad (15)$$

$$R_2 = \int_{\frac{Z_3}{2}}^{\frac{Z_2+Z_3}{2}} \frac{1}{K_3} dZ = \frac{2Z_1}{nK_h} [e^{\frac{n}{2}(1-\frac{Z_3}{2Z_1})} - e^{\frac{n}{2}(1-\frac{Z_2+Z_3}{2Z_1})}], \quad (16)$$

$$R_3 = \int_0^{\frac{Z_3}{2}} \frac{1}{K_3} dZ = \frac{2Z_1}{nK_h} [e^{\frac{n}{2}} - e^{\frac{n}{2}(1-\frac{Z_3}{2Z_1})}], \quad (17)$$

用 τ 表示冠层内植被所受到的切应力, 那么由式 (10) 便可以得到切应力廓线为:

$$\tau = \rho K(Z) \frac{du(Z)}{dZ} = \tau_0 \exp(-n\xi), \quad (18)$$

式 (18) 中 $\tau_0 = \rho u_h K_h n / (2Z_1)$.

由式 (10) 和式 (18) 可得到 3 个子层植被与相应的周围空气间的边界层阻力为:

$$r_1 = \rho u \left(\frac{Z_1 + Z_2}{2} \right) / \Delta\tau_1, \quad (19)$$

$$r_2 = \rho u \left(\frac{Z_2 + Z_3}{2} \right) / \Delta\tau_2, \quad (20)$$

$$r_3 = \rho u \left(\frac{Z_3}{2} \right) / \Delta\tau_3, \quad (21)$$

$$r_g = \rho u(0) / \Delta\tau_g, \quad (22)$$

式 (19)~(22) 中 $\Delta\tau_1$ 、 $\Delta\tau_2$ 、 $\Delta\tau_3$ 和 $\Delta\tau_g$ 分别代表 3 层植被子层与地面土壤上所受的切应力.

植物叶子气孔的开启直接影响着植物与大气间的水汽交换及植物叶温的变化. 在本文所建的 3 层模型中, 考虑到模型模拟对象为高大的树林, 植被土壤含水量较少, 气孔阻力 r_s 随环境因子的变化很小. 如对橡树林中太阳直射光照射到的叶子, 其叶面气孔阻力约在 (0.06~0.11)s/m 间变动^[4], 然而冠层中叶子的边界层阻力 r_i 在一般的气象条件下往往高达 10s/m, 因而 r_s 对模型模拟结果影响很小, 我们取 r_s 为常数值进行计算.

3 子层植被的净辐射能 R_{ni} 分为净短波辐射能与净长波辐射能^[1,4]. 净短波辐射能 $A(i)$ 的计算可根据植被的双向反射模型^[7]或吸收模型^[8]计算出每个子层的平均短波吸收系数 $\alpha(i)$, 再由参考高度处测得的太阳辐射能 SW , 得到每个子层的净吸收的短波辐射能为:

$$A(i) = SW \cdot \alpha(i). \quad (i = 1, 2, 3) \quad (23)$$

把大气、3 子层植被及土壤看成是一个 5 层的辐射源, 同时 3 子层植被又吸收各层的辐射能. 那么大气、3 子层植被及土壤的长波辐射能的交换可以用一个 5×3 的 S 矩阵表示^[4]; 其中矩阵元素 S_{ij} 表示 j 层产生的热辐射能被 i 层吸收的概率, S_{ij} 中的 i 取为 1~3, 分别代表 1 至 3 子层植被; j 取为 1~5, 分别代表各项辐射源, 即为天空、3 个子层植被与下垫面土壤.

由式 (23) 及 S 矩阵可得:

$$R_{ai} = \frac{1}{2} \varepsilon(i) \sigma [B(T_a)S_{i1} + B(T_1)S_{i2} + B(T_2)S_{i3} + B(T_3)S_{i4} + B(T_g)S_{i5}] + A(i), \quad (i = 1, 2, 3) \quad (24)$$

式中 σ 为玻尔兹曼常数, $\varepsilon(i)$ 为第 i 层植被的发射率, $B(T) = \varepsilon T^4$.

至此, 我们已分析了式 (1)~(3) 中各项的物理意义及相应的计算方法. 由植被各子层的叶面积指数 (LAI) 及相应的叶倾角分布函数, 计算出 S 矩阵^[4]. 只要给定参考高度处大气的温度、水汽压、风速、太阳辐射能及下垫面土壤表面温度, 便可从式 (1)~(3) 算出 3 子层植被温度 T_1 、 T_2 和 T_3 ; 3 子层植被周围空气的气温 T_{a1} 、 T_{a2} 和 T_{a3} 及水汽压 e_{a1} 、 e_{a2} 和 e_{a3} . 式 (1)~(3) 实际上是关于 T_i 、 T_{ai} 和 e_{ai} ($i = 1, 2, 3$) 共 9 个变量的非线性方程组. 对于这样一个多变量的非线性方程组的求解, 用已有的牛顿-拉夫逊法计算, 其收敛速度甚慢. 我们用最小二乘阻尼方法^[9]求解, 从而大大地提高了模型的收敛速度.

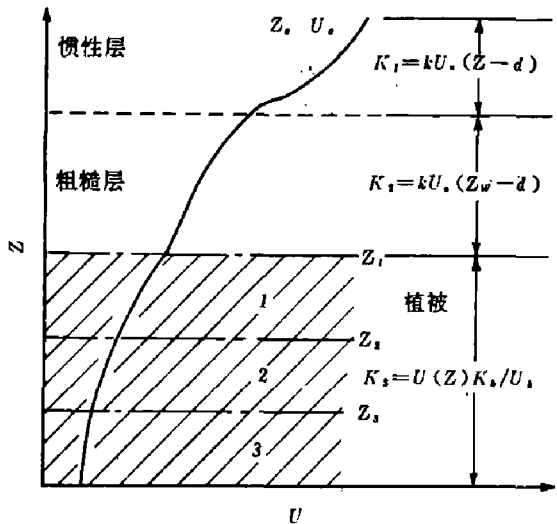


图 3 植被上方及内部的风速分布曲线及相应的交换系数.

Fig. 3 The diffusivities for momentum transport and wind profile in the inertial sublayer, the roughness sublayer and canopy air space

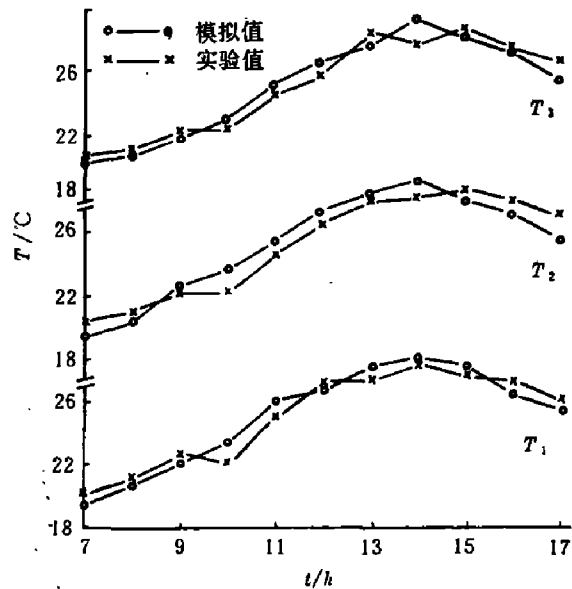


图 4 模拟得到的冠层温度与实测温度的比较

Fig. 4 Comparison of measured and simulated canopy temperature

2 模型检验与结果分析

用美国田纳西州的野外实测数据^[10]检验模型, 测量场地为橡树与山胡桃木的混合林, 林地平均树高为 21.5m, 叶面积指数为 5.6. 植被冠层温度用红外测温仪测得, 各气象参数由自动测量系统记录. 有关测量场地及方法的详细情况参见文献 [11].

模型输入环境气象参数及测量高度为: (1) 气温 T_a , 在离地 23m 处测量, (2) 土壤表面温度 T_g , 在土壤表面下 1.0cm 处测量, (3) 风速 u_a , 相对湿度 RH 和太阳辐射能 SW 在离地 44m 高处测量. 3 个子层植被的平均温度分别在离地 20m、13m 和 6m 高处四个

不同方位方向上测量, 并取平均值代表3子层植被中间位置的冠层温度。

模型计算中气孔阻力 r_s 取为0.11s/m, 各子层植被及地表的发射率均取为1.0。实测得到的3个子层植被的叶面积指数及相应的叶倾角分布概率见表1。

表1 3子层植被的叶面积指数及相应的叶倾角分布概率
Table 1 Leaf area index and foliage angle distribution of three layers

倾角(°)	叶倾角分布概率			倾角(°)	叶倾角分布概率		
	第1层	第2层	第3层		第1层	第2层	第3层
5	.067	.155	.233	55	.043	.019	.000
15	.086	.177	.157	65	.033	.002	.000
25	0.98	.135	.154	75	.000	.000	.000
35	.076	.037	.047	85	.000	.000	.000
45	.087	.019	.010	LAI	3.40	0.80	0.40

本文建立的3层植被热红外辐射模型模拟得到的3个子层植被温度与实验数据相比(见图4), 其偏差均小于2.0℃。相比还表明, 模拟结果很好地反映了植被各层温度均随大气辐射能的增加而增加的特性。

3 结论

本文建立的3层植被热红外辐射模型, 保留了Kimes和Smith模型中简便计算净辐射能的优点, 克服了现存3层模型中不考虑植被内风速、气温、水汽压梯度变化的不足。因而本模型不但可以得到植被各层温度, 而且还可以得到现存3层热模型所无法得到的植被冠层中对植被小气候、生态环境各方面研究具有十分重要意义的气温和水汽压廓线。

致谢: 感谢M.J. McGuire博士热情地提供了模型检验中的实验测量数据。

参考文献

- 1 Soer GJR. *Remote Sens. Environ.*, 1980,9(1):27
- 2 Chouldhury BJ. *Remote Sens. Environ.*, 1986,19(3):253
- 3 Kimes DS et al. *Appl. Opt.*, 1981,20(4):623
- 4 Smith JA et al. *Remote Sens. Environ.*, 1981,11(3):311
- 5 Monteith JL. *Vegetation and Atmosphere Vol. 1 Principle*, London, Academic Press, 1975, p57-109
- 6 Vander Griend A A et al. *Water Resour. Res.*, 1989,25(5):949
- 7 Suits GH et al. *Remote Sens. Environ.*, 1972,2(2):117
- 8 Kimes DS et al. *Appl. Opt.*, 1980,19(16):2801
- 9 万耀青等, 最优化计算方法常用程序汇编, 北京, 工人出版社, 1983, p.80-97
- 10 McGuire MJ. *Ph. D. Dissertation*, Colorado State University, Fort Collins, Co80523, 1986, p51~59
- 11 McGuire MJ et al. *Remote Sens. Environ.*, 1989,27(2):169

A NEW THERMAL VEGETATION CANOPY MODEL *

Li Zhengzhi, Dong Guoquan

(*Department of Physics, Hangzhou University, Hangzhou, Zhejiang 310028, China*)

Abstract: A three-layer thermal vegetation canopy model applicable to forest canopies was developed and tested by field experiments. The model is based on the energy budget equations that describe the interactions between short and long wave radiation, sensible heat flux and latent heat flux within three horizontally infinite canopy layers. Particularly it concerns the wind, air temperature and water vapor pressure profiles in the canopy, which were never considered in the earlier models. In solving the nonlinear energy budget equations, a new method was adopted, resulting in the reduction of the model computer time greatly. The calculated results of the model are in good coincidence with the observed data, which shows that the new model is able to simulate exactly the variation of canopy temperature with vegetation structure and environmental conditions.

Key words: vegetation canopy, infrared radiation, thermal model, remote sensing model.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China.