

剩余阻抗在植被热红外辐射特性 理论模拟中的应用

张建奇 张海兴 白长城 方小平 杨宜禾

(西安电子科技大学技术物理系, 陕西, 西安, 710071)

摘要 将剩余阻抗引入到植被热红外辐射特性理论模拟中, 通过求解植被层稳态热平衡方程, 对含与不含剩余阻抗的模拟结果进行了对比分析。

关键词 剩余阻抗, 植被, 红外辐射。

引言

在植被热红外辐射特性理论模拟时, 普遍采用植被稳态热平衡方程求得植被层温度, 结合植被组分辐射特征参数研究植被的红外辐射特性。现有的理论模型中^[1~4], 关于植被与大气的潜热和显热交换量的计算多采用空气动力学阻抗模式, 但都没有将剩余阻抗包含进去。本文将剩余阻抗引入到植被与大气之间潜热和显热交换的计算模式中, 通过求解植被层稳态热平衡方程获得了植被层辐射温度随时间和大气状态的变化关系, 并对含和不含剩余阻抗公式的模拟结果进行了对比分析。

1 计算模式

在有关植被层稳态热平衡方程中, 现有计算显热通量的模型普遍采用如下公式:

$$H = \frac{\rho C_p (T_c - T_a)}{R_a}, \quad (1)$$

式(1)中 H 是显热通量; ρ 是空气密度; C_p 是空气定压比热; T_a 是大气温度; T_c 是植被层温度; R_a 是空气动力学阻抗。文献[5]在研究植被蒸发时, 从植物小气候的原理出发, 提出了剩余阻抗的新概念, 并将式(1)改为:

$$H = \frac{\rho C_p (T_c - T_a)}{R_a + R_{bm}}, \quad (2)$$

对比式(1)和式(2)可以看出, 式(2)中多了 R_{bm} 阻抗, 公式(1)中忽略了这一项, 这是由于对植

被的动量汇高度和热量源汇高度的混淆所致. 根据文献[5]的讨论, 对应于热量传输的下垫面粗糙度 z_0' 和对应于动量传输的下垫面粗糙度 z_0 的关系为 $z_0' = 0.2z_0$. 由该式可知热量源汇高度 ($d+z_0'$) 低于动量汇高度 ($d+z_0$), 其中 d 为与植株高度有关的零平面位移. 虽然这两个假想高度相差很小, 但由于气温随高度呈对数分布, 由植被上方的气温廓线外推所得到的这两个高度上的温度可能会相差几度^[6~7].

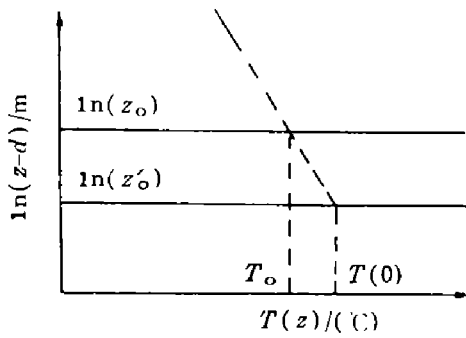


图 1 动量汇温度 (T_0) 和热量源温度 ($T(0)$) 间的比较
Fig. 1 The comparison between the momentum join temperature (T_0) and the heat source temperature ($T(0)$)

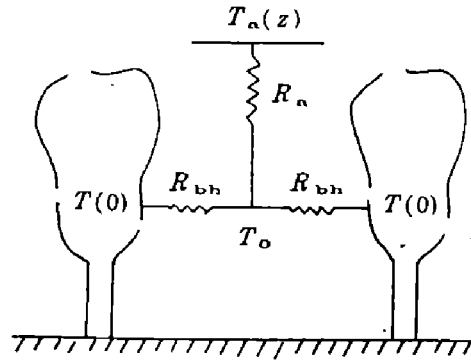


图 2 植被的热量传输阻力模型
Fig. 2 The heat transfer resistance model of a canopy

图 1 为动量汇温度 (T_0) 和热量源温度 ($T(0)$) 的比较. 图 2 为植被热量传输阻力模型, 它表示了动量汇和热量源汇温度与各空气动力学阻抗之间的关系. 式(1)将 T_0 当作遥测的平均叶子温度 T_c , 严格地说, T_0 是动量汇上的气温, 也可以看作是植被层内的平均气温, 而它不能被红外测温仪遥测到. $T(0)$ 是有效植被温度, 也可以当作是平均叶温或辐射层温 T_c . 由图 2 可以看出, 剩余阻抗是调节叶温和植被层内气温之间差异的重要机制, 是不能被忽略的. 将剩余阻抗公式应用到能量平衡-空气动力学阻抗模式中计算作物蒸发, 其结果表明, 可提高计算精度, 平均相对误差仅 12~13%, 在同类计算方法中其误差最小^[8].

潜热蒸发项的计算是比较复杂的, 气象学家对此进行了大量的工作, 提出了许多种计算方法. 本文采用以植物生理测定技术和能量平衡为基础, 并与红外遥感相结合的空气动力学阻抗模式.

在作物完全覆盖土壤后, 作物总蒸发主要是蒸腾, 蒸腾是通过作物叶子表面进行的, 作物叶子表皮的气孔起着作物与大气中的二氧化碳和水汽交换的阀门作用, 水汽从叶子内向周围空气扩散就受到气孔开闭的阻抗作用. 1963 年 Monteith^[9] 就把 Penman^[10] 等人提出的单片叶子气孔阻抗概念推广到植物冠层表面, 建立了计算作物总蒸发量的阻抗公式, 即根据植物生理测定技术所得到的公式. 1973 年 Monteith^[11] 将此式写为:

$$\lambda E = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{[e_w(T_c) - e_a]}{R_c + R_a}; \tag{3}$$

式(3)中 λ 为水汽气化潜热; E 为蒸发量; γ 为干湿表常数; $e_w(T_c)$ 为叶面温度下的饱和水汽压; e_a 为叶面温度下的实际水汽压; R_c 为叶面的气孔阻抗. 由于叶面水汽压和叶面气孔阻抗很难直接测量, 故式(3)并未得到推广应用. Monteith^[12] 在 1981 年根据能量平衡原理, 并结合式(1)对式(3)进行了修改, 提出了新的 Penman-Monteith 公式:

$$\lambda E = \frac{\Delta R_n (1 - \tau) + DC_p / R_H}{\Delta + \gamma [(R_a + R_c)] / R_H}; \quad (4)$$

式(4)中 R_n 是植物冠层温度与空气温度相等时作物冠层上空的净辐射; τ 是透射系数, Δ 是在空气温度下的饱和水汽压斜率; D 是空气水汽饱和差; R_H 是热和长波传输的等效空气动力学阻抗; R_c 是蒸发表面阻抗, 即植被冠层的总气孔阻力. 作物冠层上空的净辐射 R_n 和等效空气动力学阻抗 R_H 的计算公式为

$$R_n = (1 - \alpha)S + (\epsilon_a - \epsilon_c)\sigma T_a^4, \quad (5)$$

$$R_H^{-1} = R_a^{-1} + (C_p / 4\epsilon_c \sigma T_a^3)^{-1}; \quad (6)$$

式中 α 是植被表面反射率, S 是太阳总辐射; ϵ_a 是大气长波发射率; ϵ_c 是植被表面发射率; σ 是 Stefan-Boltzmann 常数. 若考虑剩余阻抗 R_{bh} , 则式(3)、(4)和(6)应改写为

$$\lambda E = \frac{\rho C_p [e_w(T_c) - e_a]}{\gamma \frac{R_c + R_a + R_{bh}}{R_H}}, \quad (7)$$

$$\lambda E = \frac{\Delta R_n (1 - \tau) + DC_p / R_H}{\Delta + \gamma [(R_a + R_{bh} + R_c)] / R_H}, \quad (8)$$

$$R_H^{-1} = (R_a + R_{bh})^{-1} + (C_p / 4\epsilon_c \sigma T_a^3)^{-1}; \quad (9)$$

有了 λE 和 H 的计算模式后, 力求以遥感信息计算植被层温度的参数空气动力学阻抗 R_a 和植被表面蒸发阻抗 R_c . 在中性层结条件下^[13]有:

$$R_a = \frac{\ln^2 \left[\frac{z-d}{z_0} \right]}{k^2 u}; \quad (10)$$

式(10)中 k 为 von Karman 常数; u 为高度 z 上的实测风速. 在非中性层结下, 必须对 R_a 进行稳定度订正. 有关订正形式有许多种, 这里选用 Paulson^[14]和 Businger^[15]所提出的订正模式, 其数学描述为:

$$R_a = \frac{\left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - P_1 \right] \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - P_2 \right]}{k^2 u}; \quad (11)$$

式(11)中 P_1 和 P_2 为订正参数.

热传输对应于动量传输的剩余阻抗 R_{bh} , 其量级与 R_a 相当. 它的计算可采用经验公式:

$$R_{bh} = 75 \left(\frac{l}{\bar{u}} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (12)$$

式(12)中 l 为作物叶子的特征尺度(对于小麦可取 $l = 1.3\text{cm}$); \bar{u} 为冠层内的平均风速. 在小气候资料不足时, 可用 $R_{bh} = \frac{4}{u^*}$ 计算, 其中 u^* 为植被的磨擦风速.

蒸发表面阻抗(即总气孔阻力)与叶子水势的负压值成正比, 与光照强度和植被叶面积指数成反比关系. 对于单层而不是冠层内叶面积指数和净辐射不相同的多层模式, 其经验公

式为^[16]：

$$R_s = \frac{1000[1 + (-\Psi/230.8)^{0.51}]}{0.5LAI + 0.021R_n(1-\tau)} \quad (13)$$

式(13)中 Ψ 为叶子水势; LAI 为植被层叶面积指数。

式(13)中含有叶子水势, 即叶子含水量的表征值. 由于叶子含水量随着植被的水蒸发而发生变化, 因此在利用式(13)时必须同时考虑叶子水势的变化. 根据水平衡原理, 植被所蒸发的水分应等于植物根系从土壤中所抽吸的水, 而后者可类似电流流动那样表示为与土壤水势和叶子水势的梯度成正比:

$$\lambda E = L_w \frac{\Psi_s - \Psi}{R_s + R_p}; \quad (14)$$

式(14)中 Ψ_s 为土壤水势; R_s 为从块状土壤到根表皮的水流阻力; R_p 为从根表皮到叶子气孔的水流阻力; L_w 为容积蒸发热. R_s 与土壤中作物根系的密度以及土壤的导水率有关^[17]; R_p 可利用蒸发量进行估算^[18]. 式(4)或式(5)与式(14)结合便可求得植物叶子水势 Ψ 的变化.

2 结果分析

若忽略植被层与土壤之间的热传导, 则植被层的稳态热平衡方程为:

$$R_n + H + \lambda E = 0. \quad (15)$$

根据以上讨论, 只要输入有关气象参数、植被组分光学参数和植被形态结构参数, 便可利用以上各式, 求解式(15)得到植被层温度. 我们模拟计算了小麦辐射温度的周日分布, 并与测量值进行了对比. 1994年5月25~26日在西安市长安县选择了一片成熟期的麦田进行了野外测量. 25日为阴天, 云为蔽光高积云; 26日为多云, 云为透光高层云. 大气温度(采用WJ1型双金属温度计)、湿度(采用HJ1型毛发湿度计)和压强(采用空盒气压表)在距地面2.0m处的百叶箱内测量. 风速利用DEM6型轻便三杯风向风速表和EY3-2A电子微风仪在距地面2.0m处每隔10min同时测量. 植被层温度采用西北光学仪器厂生产的IRT-1200D红外测温仪测量, 其主要性能参数如下: 工作波段为8~14 μm ; 距离系数为40; 发射率调整范围为0.10~1.00; 测量精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ (100 $^\circ\text{C}$ 以下); 测量距离为2.0m; 高度为1.7m. 测量为倾斜测量, 被测目标充满仪器视场. 叶面指数根据定义采用抽样求平均的方法计算. 土壤含水量因子测量采用称重法. 土壤样品利用环刀在现场取得, 并采取密封措施以备实验室测量. 主要模型输入数据有: 叶面指数 LAI=3.50; 植被高度 h=0.90m; 发射率 $\epsilon_s=0.976$; 叶子角分布类型为球面型. 实测的大气温度及风速如图3所示; 热传输阻抗模拟计算值如图4所示; 植被层温度值如图5所示; 显热和潜热量模拟值如图6所示. 为了讨论剩余阻抗的影响, 图5和图6中分别给出了含与不含剩余阻抗时的模拟值. 从图4可知, R_c 比 R_a 和 R_{bs} 要大得多; 而 R_a 和 R_{bs} 相比则相差不多. 因此, R_{bs} 对显热的影响要比对潜热的影响要

大. 由图 5 可以看出, 在白天, 含有剩余阻抗的植被层温度模拟值要比不含的模拟值大; 在夜晚则相反, 含有剩余阻抗的植被层温度模拟值要比不含的模拟值小. 也就是说, 含有剩余阻抗的植被层温度的周日变化幅度要比不含剩余阻抗的变化幅度要大. 根据前面的讨论可知, 这是因为不含剩余阻抗时所计算出的应是植被层内的空气温度, 所以其变化幅度要比植被层温度要小. 尽管含与不含剩余阻抗的植被层温度模拟值的差别不大(最大约 0.6), 但要以此计算植被层的辐射量, 其差别是不能忽略的. 同时, 从图 6 中还可看到, 含与不含剩余阻抗时的潜热蒸发量 λE 和显热量 H 的模拟计算值的差别在白天是比较明显的, 这种差别在显热量 H 中要比在潜热蒸发量 λE 中大, 这和前面的讨论是一致的. 因此, 剩余阻抗不但在植被蒸发现理论研究时不可忽略, 在植被热红外辐射特性理论模拟中也必须考虑. 另外需要说明的是, 模型中有关太阳辐射采用的是理论模拟值, 由于模型较为简单, 而且由于云层的观测

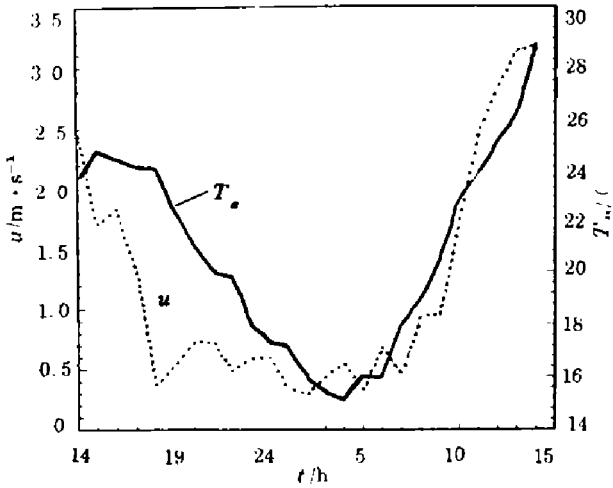


图 3 实测大气温度及风速
Fig. 3 The measured air temperature and wind speed

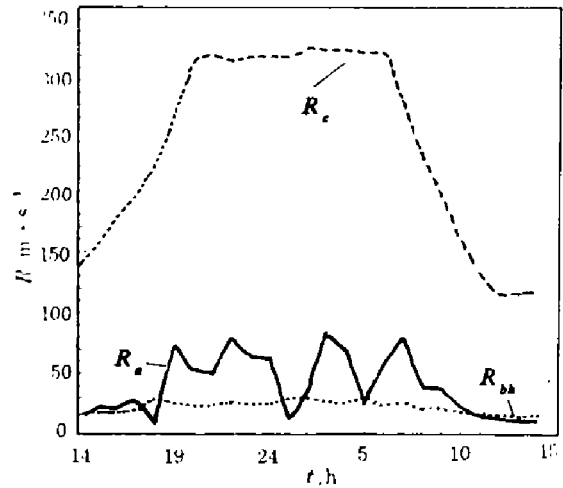


图 4 热量传输阻抗模拟结果
Fig. 4 The simulated results for heat transfer resistance

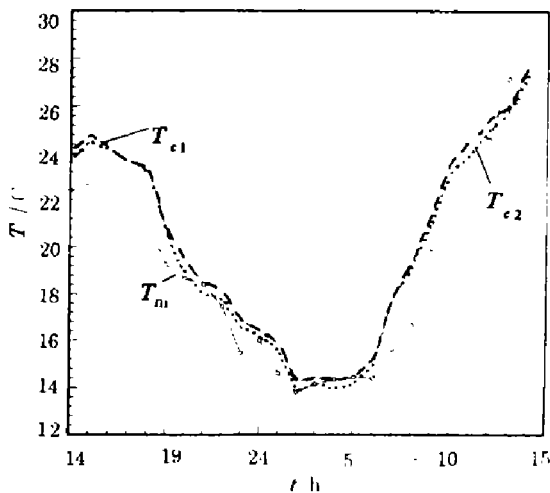


图 5 植被温度模拟值和观测值
(下标 1、下标 2 和下标 m 分别指含与不含剩余阻抗及观测结果)
Fig. 5 The calculated and observed canopy temperature

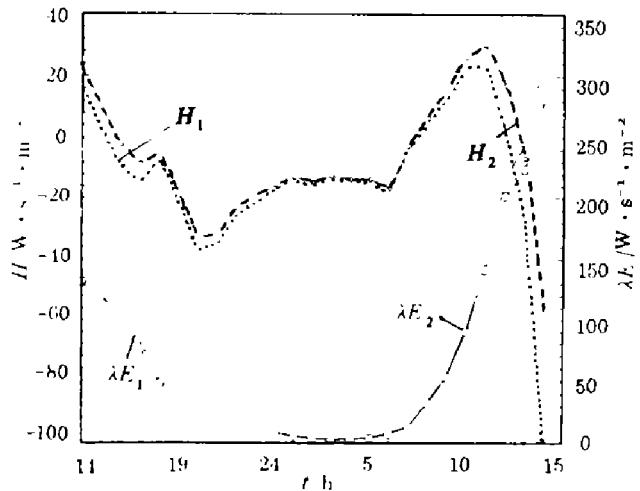


图 6 显热和潜热交换模拟值
(下标 1 和下标 2 分别指含与不含剩余阻抗)
Fig. 6 The simulated results for sensible and latent heat exchange

经验不足等因素,所以理论值和测量值相比白天误差要比夜晚误差要大.从图 5 可知夜晚最大偏差为 1.3;而白天最大偏差为 2.7.

参考文献

- 1 Hope A S, Goward S N, Petzold D E. *Remotesens sens. Environ*, 1988, **26**:287
- 2 Smith J A, Goltz S M. *Remote Sens. Environ.*, 1994, **47**:167
- 3 McGuire M J, Smith J A, Balick L K, et al. *Remote Sens. Environ.*, 1989, **27**:197
- 4 Kimes D S, Smith J A, Link L E. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(4):623
- 5 陈镜明. *科学通报*, 1988, **33**(6):454
- 6 Huband N D S, Monteith J L. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, **36**:107
- 7 Monteith J L. *Vegetation and the Atmosphere*, V01. 1, Academic Press, New York, 1975, 57
- 8 左大康, 谢贤群. *农田蒸发研究*, 北京:气象出版社, 1991, 128
- 9 Monteith J L. *Environmental Control of Plant Growth*, Academic Press, New York, 1963, 95
- 10 Penman H L. *Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A*, 1948, **193**:120
- 11 Montrith J L. *Principles of Environmental Physics*, Edward Arnold, London, 1973, 241
- 12 Montrith J L. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1981, **107**:1
- 13 Brown K W, Rosenberg N J. *Agron. J.*, 1973, **65**:635
- 14 Paulson C A. *J Appl. Meteorol.*, 1970, **9**:857
- 15 Businger J A, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. *J. Atm. Soi.*, 1971, **28**:181
- 16 Choudhury B J, Idso S B, Reginato R J. *Agri. For. Meteorol.*, 1985, **36**:65
- 17 Soer G I R. *Remote Sens. Environ.*, 1980, **9**:27
- 18 Choudhury B J, Idso S B, Reginato R J. *Remote Sens. Environ.*, 1986, **19**:253

APPLICATION OF THE EXCESS RESISTANCE TO THE THEORETICAL MODELING OF THERMAL IR EXITANCE OF A VEGETATION CANOPY*

Zhang Jianqi Zhang Haixing Bai Changcheng

Fang Xiaoping Yang Yihe

(Department of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract The excess resistance is applied to the theoretical modeling of thermal IR exitance of a vegetation canopy. Based on the steady state energy budget equations, the simulated results with excess resistance are compared with that without excess resistance.

Key words excess resistance, vegetation canopy, infrared radiation.