

# 作物覆盖条件下土壤中水热分布的 稳态数值比较

曾海波 刘伟 范爱武

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 本文应用非饱和多孔介质中传热传质的数学模型, 考虑到作物根系和冠层的影响, 对稳态情况下圆柱形土壤床中的水热分布进行了数值计算模拟。在不同环境条件下对土壤中的水热分布也进行了模拟计算。同时, 在相同环境条件下对有作物覆盖的土壤床和无作物覆盖的土壤床中的水热分布也进行了模拟比较。文中数值模拟的结果较好地反映了实际情况。

**关键词** 作物覆盖; 热质; 裸土; 数值模拟

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2002)04-0464-03

## THE STEADY NUMERICAL COMPARISON OF THE HEAT AND MOISTURE DISTRIBUTION IN A CYLINDRICAL SOIL-BED COVERED WITH PLANTS

ZENG Hai-Bo LIU Wei FAN Ai-Wu

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** A mathematical model describing heat and mass transfer in unsaturated porous media is applied. With the consideration of root and crown of the plant, the numerical simulation is made to describe the heat and mass distribution under different environmental conditions in cylindrical vegetation soil-bed on steady state. The simulation is also made to describe the heat and mass distribution under the same environmental conditions between vegetation soil-bed and bare soil-bed. The result is reasonable.

**Key words** vegetation; heat and mass; bare soil; numerical simulation

### 1 引言

对资源-环境-植物-土壤连续体(REPS)水分和热量传输和转换关系的研究, 是地表物质迁移和能量转化研究的重要内容。土壤内的温度分布和水分分布是决定作物生长的重要条件。掌握不同环境条件下土壤中水热分布有重要的意义。掌握不同环境条件下作物的水热状况, 可以科学调配作物需水量, 合理利用资源, 为农业生产决策服务。

本文应用多孔介质中的传热传质数学模型, 考虑了作物根系和冠层的影响, 对几种不同环境条件下土壤内水热分布进行了数值模拟比较。同时, 在相同环境条件下与裸土层中的水热分布进行了比较。

### 2 有作物覆盖土壤中热质迁移数学模型

土壤是一种典型的多孔介质, 包含固体骨架、土壤溶液以及各种气体。刘伟等通过分析 Phillip<sup>[1]</sup>与 DeVries<sup>[2]</sup>提出的土壤水热耦合运移的双场驱动模型, 采用 Whitaker<sup>[3]</sup>理论, 并结合体积平均方法, 建立了描述多孔介质热、湿、气耦合迁移的多驱动机制二维非定常数学模型, 并应用于土壤传输过程的研究<sup>[4]</sup>。本文作者根据坐标转换基本理论, 并考虑了作物根系和冠层的影响<sup>[5,6]</sup>, 推导出圆柱坐标系中有作物覆盖条件下的二维数学模型。模型如下:

连续性方程

收稿日期: 2001-11-05; 修订日期: 2002-04-12

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (No.G2000026303); 国家自然科学基金资助项目 (No.59976010); 教育部博士点基金资助项目 (No.2000048731)

作者简介: 曾海波 (1976-), 男, 河南确山人, 硕士, 主要从事多孔介质传热传质的研究。

$$\text{液相: } \frac{\partial(\rho_l \varepsilon_l)}{\partial \tau} + \nabla(\rho_l \varepsilon_l \vec{V}_l) = -\dot{m} - Sr \quad (1)$$

$$\text{水蒸汽: } \frac{\partial(\rho_v \varepsilon_g)}{\partial \tau} + \nabla[\rho_g \varepsilon_g (\vec{V}_g + \vec{V}_v)] = \dot{m} \quad (2)$$

$$\text{气相混合物: } \frac{\partial(\rho_g \varepsilon_g)}{\partial \tau} + \nabla(\rho_g \varepsilon_g \vec{V}_g) = \dot{m} \quad (3)$$

动量方程

$$\text{液相: } \frac{\partial \vec{V}_l}{\partial \tau} + (\vec{V}_l \cdot \nabla) \vec{V}_l - \frac{\dot{m}}{\rho_l \varepsilon_l} \vec{V}_l = -\frac{g D_l}{K_l} \nabla \varepsilon_l - \frac{g \varepsilon_l}{K_l} \vec{V}_l - \frac{g \varepsilon_g}{K_g} (\vec{V}_l - \vec{V}_g) + \nu_l \nabla^2 \vec{V}_l - \vec{g} \quad (4)$$

$$\text{气相: } (\vec{V}_g \cdot \nabla) \vec{V}_g + \frac{\dot{m}}{\rho_g \varepsilon_g} (\vec{V}_g + \vec{V}_v) = -\frac{1}{\rho_g} \nabla P - \frac{g \varepsilon_g}{K_g} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) + \nu_g \nabla^2 \vec{V}_g - \vec{g} \quad (5)$$

蒸汽扩散方程

$$\vec{V}_v = -D_{TV} \nabla T - D_{LV} \nabla \varepsilon_l \quad (6)$$

能量方程

$$c_{P,l} T [\vec{V}_l \cdot \nabla(\rho_l \varepsilon_l)] + c_{P,g} T [\vec{V}_g \cdot \nabla(\rho_g \varepsilon_g)] + \varepsilon_l c_{P,l} [\vec{V}_l \cdot \nabla(\rho_l T)] + \varepsilon_g c_{P,g} [\vec{V}_g \cdot \nabla(\rho_g T)] = \nabla \cdot (\lambda_m \nabla T) - L_a \dot{m} \quad (7)$$

相应的定解条件为:

$$X = 0 \quad T + T_0(t), \varepsilon_l = \varepsilon_{l,s}, u_l = u_g = v_l = v_g = 0$$

$$X = H \quad -\lambda_m \frac{\partial u_l}{\partial r} = G,$$

$$\rho_v \varepsilon_g v_g + \rho_l \varepsilon_l v_l = Es, u_l = v_l = 0$$

$$r = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{\partial u_l}{\partial r} = 0, \frac{\partial u_g}{\partial r} = 0, \frac{\partial v_v}{\partial r} = 0$$

$$\frac{\partial \varepsilon_l}{\partial r} = 0, v_l = v_g = v_v = 0$$

$$r = M \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{\partial \varepsilon_l}{\partial r} = 0, v_l = v_g = u_l = u_g = 0$$

为了改进文献 [7] 中的根系吸水率, 设水平方向为线性分布。于是吸水率为二维分布:

$$S(x, r) = 4.312 \cdot (1-r/R) \cdot EP \cdot \exp\{-1.8 \cdot (L-x)/L\} / L$$

式中 EP 为作物蒸腾量, 采用彭曼-蒙特斯 (Penman-Monteith) 模式计算:

$$EP = \frac{\Delta \cdot R_p + \rho c_p D_a / r_l}{[\Delta + \gamma(1 + r_c / r_l)] / L_a}$$

土壤表面热通量 G 由下式确定:

$$G = R_s - \rho c_p \cdot \frac{(T_s - T_p)}{r_{sp}} - \frac{\rho c_p}{\gamma} \cdot \frac{e_s - e_p}{r_s + r_{sp}}$$

应用有限差分法, 对以上方程离散化, 进行求解。采用圆柱形土壤床 (砂性土), 其纵剖面左右对称, 故取其一半进行计算。

### 3 有作物覆盖土壤床与裸土床的场量比较

取环境温度均为 30°C, 外部辐射热流为 300 W/m<sup>2</sup>, 环境风速为 3 m/s, 空气相对湿度为 60%, 土壤初始温度为 20°C。比较结果如图 1~6 所示。

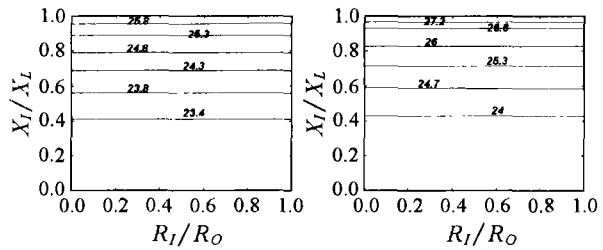


图 1 有作物覆盖土壤床温度场 图 2 裸土土壤床温度场

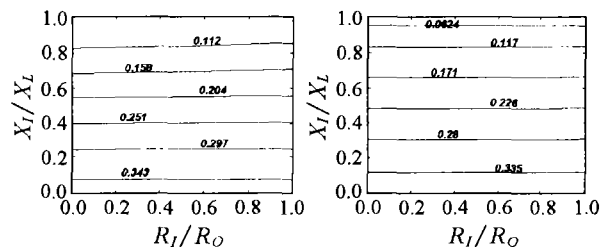


图 3 有作物覆盖土壤床含水量场 图 4 裸土土壤床含水量场

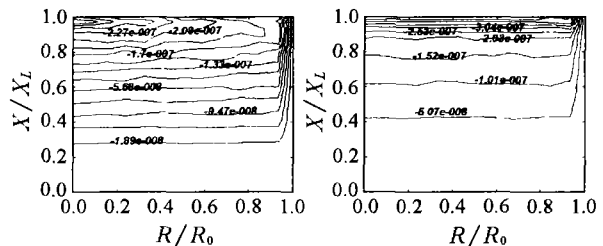


图 5 有作物覆盖土壤床蒸发量场 图 6 裸土土壤床蒸发量场

由图中可看出在相同环境条件下, 无作物覆盖时土壤床内部温度相对要高, 且上下部温差也较大。这是因为有作物覆盖时, 由于冠层的遮蔽作用, 使土壤床获得的热量相对较少, 土温升高幅度也较裸土低。有作物覆盖土壤床中虽然内部温度要低, 表面蒸发量较小, 但由于根系吸收土壤内的水分用于蒸腾, 使得内部液相含量与裸土相比要小。并由于同一水平面根系吸水率不均匀, 使得同一水平面上中部液相含量小于边缘处。图中可见, 内部液体相变量均为负值。是因为水分蒸发主要发生在土壤近表面区域, 表面液态水分不断蒸发, 并向大气扩散。在土壤内部, 则在温度梯度控制下, 部分蒸汽向下扩散, 遇到下部温度较低的土壤便会冷凝。裸土床中温度梯度相对较大, 土壤床内部蒸汽冷凝量也较大。

由以上三组对比图可看出，有作物覆盖土壤床和裸土床相比，内部各物理场量有较为明显的差异。

### 4 有作物覆盖土壤床在不同环境条件下比较

以下对两种不同环境条件，进行了计算模拟比较。文中只比较了温度场和蒸发量场。

#### 4.1 不同环境湿度下，土壤床温度和蒸发量场

环境温度  $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，环境风速  $V_a = 3 \text{ m/s}$ ，辐射热流  $R_s = 300 \text{ W/m}^2$ ，环境相对湿度分别为 80% 和 40% 时比较各场量分布。

由两组对比图 7~10 可以看到，环境相对湿度对土壤内部温度场影响较明显。相对湿度上升，内部温度也上升，上下部温差增加。这是由于随相对湿度增加，土壤床表面蒸发量减少，从而通过相变吸收的热量减少，而表面相变吸热量降低使得土壤向下传递的热量增加，使内部温度上升。蒸气在温度梯度的作用下向下扩散，出现冷凝。且内部冷凝量随相对湿度增加而增大，这是和温度梯度增大相联系的。

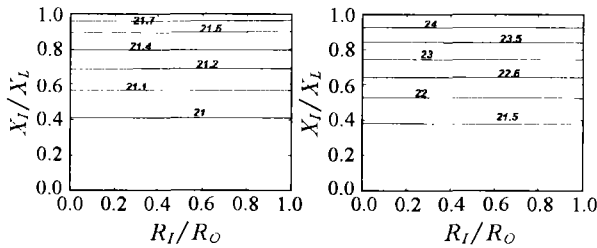


图 7 温度场  $RH = 40\%$       图 8 温度场  $RH = 80\%$

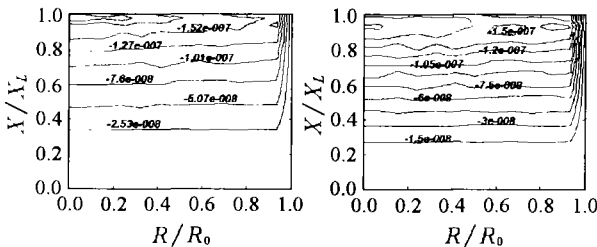


图 9 蒸发量场  $RH = 40\%$       图 10 蒸发量场  $RH = 80\%$

#### 4.2 不同辐射热流下，土壤床的温度和蒸发量场

环境温度  $T_a = 30^\circ\text{C}$ ，环境相对湿度  $RH = 60\%$ ，环境风速  $V_a = 3 \text{ m/s}$ ，辐射热流分别为  $200 \text{ W/m}^2$  和  $400 \text{ W/m}^2$  时比较各场量分布。

由图 11~14 可见，在相同环境条件下，不同的太阳辐射热流对土壤表面及内部温度分布会产生较大的影响。当辐射热流增大时，土壤床表面温度上升，表面向内部的传热量增大，导致内部温度上升，梯度增大。内部冷凝量增大，且冷凝量沿高度方向增加。

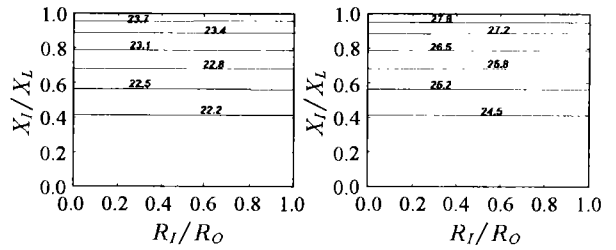


图 11 温度场  $R_s = 200 \text{ W/m}^2$       图 12 温度场  $R_s = 400 \text{ W/m}^2$

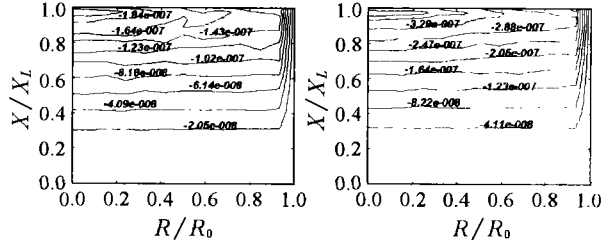


图 13 蒸发量场  $R_s = 200 \text{ W/m}^2$       图 14 蒸发量场  $R_s = 400 \text{ W/m}^2$

## 5 结 论

(1) 在有作物覆盖时，由于作物冠层的遮蔽作用，使得在相同环境条件下，根系土壤床内部的温度会低于裸土床内部的温度。在土壤床内部，二者均会出现水蒸气的冷凝现象。有作物土壤床内部的冷凝量小于裸土床内部的冷凝量。由于根系的吸水作用，有作物覆盖土壤床内部的液相含量会小于裸土床内部的液相含量。

(2) 有作物覆盖时，环境相对湿度增大，外界辐射热流增大时，都会使土壤床内部的温度升高，且土壤床内部水蒸气的冷凝量也增加。水分蒸发主要在土表进行。

## 参 考 文 献

- [1] J R Philip, D A DeVries. Moisture Movement in Porous Materials Under Temperature Gradients. Trans. Am. Geophys. Union, 1957; 38: 222-232
- [2] D A DeVries. Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media. Trans. Am. Geophys, 1958, 39: 909-916
- [3] S Whitaker. The Transport Equations for Multi-Phase System. Chem. Eng. Sci., 1973, 28: 139-147
- [4] W Liu, X X Zhao, K Mizukami. 2D Numerical Simulation for Simultaneous Heat, Water and Gas Migration in Soil Bed Under Different Environmental Conditions. Heat and Mass Transfer, 1988, 34: 307-316
- [5] 康绍忠. 土壤-植物-大气连续体水热动态模拟的研究. 生态学报, 1991, 11(3): 256-261
- [6] 康绍忠. 土壤-植物-大气连续体水分传输的计算机模拟. 水利学报, 1992, 3: 1-11
- [7] 赵绪新. 作物生长的热力系统理论与计算机仿真研究: [博士论文]. 武汉: 华中理工大学, 1997