

基于植物根系仿生的土壤热湿迁移数值模拟

刘炳成 刘 伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要 以实验数据为依据, 把土壤中的水分含量和水分梯度分布作为影响植物根系生长的环境因子, 结合非饱和多孔介质中传热传质的数学模型, 对冬小麦的根系生长进行仿生模拟, 分析根系吸水对非饱和土壤湿分与热量传递的影响。在相同环境条件下, 对裸土和有作物覆盖的土壤床中的热、湿迁移也进行了模拟比较。

关键词 根系; 仿生; 水分梯度; 热湿迁移

中图分类号: S152.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2004)Suppl.-0115-04

SIMULATION OF HEAT AND MOISTURE MIGRATION IN SOIL WITH THE BIOLOGICAL MODELLING OF PLANT ROOT GROWTH

LIU Bing-Cheng LIU Wei

(College of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract Basing on measured data, a biological modeling of wheat root growth was processed with the evolution idea whilst water content and moisture gradient were defined as the dominating environment factors in plant root growing. The effect of root system water absorption on the heat and moisture migration in unsaturated soil was analyzed. Under same environmental condition, the comparisons of temperature and moisture distribution in soil between vegetation soil-bed and bare soil-bed were also conducted.

Key words root system; biological modeling; moisture content gradient; heat and moisture migration

1 引 言

根系是陆生植物吸水的主要器官, 它从土壤中吸取大量水分, 满足植物蒸腾的需要。根系吸水规律是土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 系统水分转移的一个重要环节, 也是在分析作物生长条件下非饱和土壤水分运动时需要考虑的重要因素。目前, 研究根系吸水主要有两种方法: 一种是研究单根的吸水性质, 即微观模型^[1,2]; 另一种是把根系作为一个整体看待, 综合考虑根系对土壤水分吸收, 即宏观模型^[3,4]。

宏观方法一般能够方便地考虑到植物生长发育对水分吸收的影响, 根系吸水模型的定解条件容易确定, 因而, 大多数学者在研究根系吸水率时, 均采用综合考虑根系吸水作用的宏观模型。但是, 这种模型大多是针对一维垂向水流运动建立起来的, 也就是假定根系在平面上是均匀分布, 仅考虑垂直方

向的根系吸水规律。实际情况并非如此, 根系分布在水平方向上存在差异, 根系吸水在平面上是有变化的。因此, 这就需要对根系的空分布进行研究, 建立二维根系吸水率模式, 而至今这一方面的研究成果尚不多见。本文利用试验观测到的植物根系分布资料, 结合非饱和多孔介质中传热传质的数学模型, 用进化的观点对冬小麦根系生长进行二维仿生模拟, 并对作物生长条件下非饱和土壤内的热、湿迁移进行了数值模拟。

2 根系生长仿生模拟

2.1 土壤剖面上成根有效根量分布

不同品种的冬小麦根系在空间和时间上的分布也有着较大的差别, 但在垂直和水平剖面上均呈指数分布形式, 并且在水平方向上根系一般主要集中在离植株 20 cm 的范围内。文献 [5] 采自河北省望都

收稿日期: 2004-03-01; 修订日期: 2004-06-20

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

作者简介: 刘炳成 (1975-), 男, 山东高密人, 博士研究生, 主要从事多孔介质中的传质与传热及土壤与地下水污染方面的研究。

灌溉实验站的田间试验资料, 冬小麦不同生育期在土壤垂直剖面上的平均分布可以用下式描述:

$$\frac{W_i}{W} = Ae^{[-B(z/v(\bar{t})-C)^2]} \quad (1)$$

其中, W_i 为第 I 层土壤的根量; W 为剖面上各层土壤的总根量; z 为土壤深度; $V(\bar{t})$ 为根际深度; \bar{t} 为相对时间 ($\bar{t} = t/M$), M 为生育期天数; A 、 B 、 C 为经验常数。

假设单位体积中的根系吸水量与该体积中的有效根量成正比, 因此, 剖面上存在根的节点的吸水函数可以描述为:

$$S_r(z, t) = W_r \cdot E_f \cdot EP \quad (2)$$

式中 EP 为作物蒸腾量, 采用彭曼 - 蒙特斯模式^[6] 计算:

$$EP = \frac{\Delta \cdot R_p + \rho c_p D_a / r_1}{[\Delta + \gamma(1 + r_c / r_1)] / L_a} \quad (3)$$

E_f ^[3] 为土壤水分影响因子:

$$E_f = 1, \varepsilon_c < \varepsilon < \varepsilon_u, \quad E_f = 0, \varepsilon < \varepsilon_L;$$

$$E_f = \frac{\varepsilon - \varepsilon_L}{\varepsilon_c - \varepsilon_L}, \quad \varepsilon_L < \varepsilon < \varepsilon_c \quad (4)$$

式中, ε 、 ε_u 、 ε_c 和 ε_L 分别为土壤含水量、田间最大持水量、有效含水量和永久凋萎含水量; W_r 为单节点吸水系数, 与剖面上成根节点占总节点数的比例有关。

2.2 新生根的生长

生命体的演化和与之赖以生存的大自然间始终是和谐的, 人们总在试图认识演化的规则, 并进行合理的描述。生命体的自然演化是一个“寻优”过程。植物作为一种生命体, 其根系生长发育也会遵循一定的演化规则: 寻找水源。根系在生长过程中通常会向湿度较大一侧弯曲的特性称作“向水性^[7]”。根系的向水性是陆生植物对干旱土壤的一种适应性, 它促使植物将有限的同化物分配到可吸收水量最多的地方, 也即根系发育时, 在深度方向, 单位根长与水平方向的夹角逐渐增大, 在半径方向, 单位根长与水平方向的夹角逐渐减小。在土壤 - 植物 - 大气系统中, 水分运动的基本规律是从高水势处向低水势处流动, 其流动速率与水势梯度成正比, 而且, 在水势梯度大的方向, 根系的长势较强, 反之则较弱。因此, 新生根的生长方向受土壤中水分梯度分布的影响较大。另外, 土壤的温度、肥力、通气性、植物的生理和遗传特征等因素, 都会影响根系的生长和发育, 这些基本信息都包含在根系分布的实验规律内, 在根的仿生研究中, 需要通过建立若干判断准则, 将这些因素对根系的影响分别反映出来。

图 1 为本文建立的根系生长控制体模型。新生根的每一个生长控制体包含 4×4 个土壤网格单元和 9 个可能的生长方向 (见图)。其中: θ 为新生根的生长角, 它决定下一层新生根生长控制体的位置 (由图中虚线表示); θ' 为下一层新生根的生长角; θ'' 为下一层次生根的生长角。

作为初步研究, 本文将基于计算机模拟的新生根仿生原则简化为: (1) 新生根在深度方向每一层的生长量服从于实验规律; (2) 新生根选择水分梯度最大的方向生长, 其单位根长与水平方向的夹角沿纵向为增大趋势, 沿径向为减小趋势; (3) 土壤床的其它基本物理量场以一定的权重影响新生根的生长方向; (4) 只有那些存在已生根的网格单元, 才存在向其它网格单元生长新生根的趋势; (5) 主根或次生根的长度大于一定值才能产生次生根或下一级次生根; (6) 次生根或下一级次生根只有在比较有利的水分梯度和其它条件下才能产生。

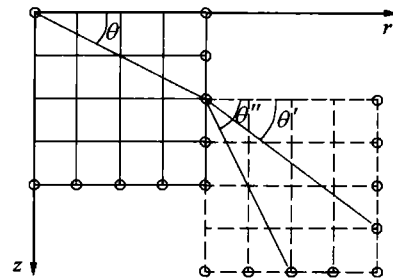


图 1 根系生长控制体模型

2.3 有冠层覆盖非饱和土壤中热、湿迁移数学模型^[8]

2.3.1 连续性方程

液相:

$$\frac{\partial(\rho_l \varepsilon_l)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_l \varepsilon_l \vec{V}_l) = -\dot{m} - S_r \quad (5)$$

水蒸气:

$$\frac{\partial(\rho_v \varepsilon_g)}{\partial \tau} + \nabla \cdot [\rho_v \varepsilon_g (\vec{V}_g + \vec{V}_v)] = \dot{m} \quad (6)$$

气相混合物:

$$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon_g)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_g \varepsilon_g \vec{V}_g) = \dot{m} \quad (7)$$

2.3.2 动量方程

液相:

$$\frac{\partial \vec{V}_l}{\partial \tau} + (\vec{V}_l \cdot \nabla) \vec{V}_l - \frac{\dot{m}}{\rho_l \varepsilon_l} \vec{V}_l = -\frac{g D_l}{K_l} \nabla \varepsilon_l - \vec{g}$$

$$\frac{g \varepsilon_l}{K_l} \vec{V}_l - \frac{g \varepsilon_g}{K_g} (\vec{V}_l - \vec{V}_g) + v_l \nabla^2 \vec{V}_l - \frac{g D_{Tl}}{K_l} \nabla T \quad (8)$$

气相:

$$\frac{\partial \vec{V}_g}{\partial \tau} + (\vec{V}_g \cdot \nabla) \vec{V}_g + \frac{\dot{m}}{\rho_g \varepsilon_g} (\vec{V}_g + \vec{V}_v) = -\frac{1}{\rho_g} \nabla P - \frac{g \varepsilon_g}{K_g} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) + v_g \nabla^2 \vec{V}_g - \vec{g} \quad (9)$$

2.3.3 蒸汽扩散方程

$$\vec{V}_v = -D_{TV} \nabla T - D_{LV} \nabla \varepsilon_l \quad (10)$$

2.3.4 能量方程

$$c_{P,l} T [\vec{V}_l \cdot \nabla (\rho_l \varepsilon_l)] + c_{P,g} T [\vec{V}_g \cdot \nabla (\rho_g \varepsilon_g)] + \varepsilon_l c_{P,l} [\vec{V}_l \cdot \nabla (\rho_l T)] + \varepsilon_g c_{P,g} [\vec{V}_g \cdot \nabla (\rho_g T)] = \nabla \cdot (\lambda_m \nabla T) - L_a \dot{m} \quad (11)$$

2.3.5 边界条件

$$X = 0: \varepsilon_l = \varepsilon_{l,s}, u_l = u_g = v_l = v_g = 0$$

$$X = H: -\lambda_m \frac{\partial u_l}{\partial r} = G, u_l = v_l = 0$$

$$r = 0:$$

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

$$v_l = v_g = v_v = 0$$

$$r = M:$$

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

土壤表面热通量:

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

2.4 植物根系仿生的模拟步骤

(1) 对上节中的数学模型进行离散和求解, 获得土壤剖面的初始物理量场;

(2) 根据本文建立的根系生长控制体模型和仿生原则, 确定下一层新生根和次生根生长的网格单元;

(3) 在土壤垂直剖面的任一层上, 若根系所占的网格单元数满足限定条件式 (1), 则在该层中的新生根停止生长;

(4) 对每一层根系已经占据的网格单元, 在连续性方程中加入根系吸水源项, 再对数学模型进行离散和求解, 获得土壤剖面的精确物理量场;

(5) 重复上述步骤, 直至整个根系生长完毕。

3 结果与分析

3.1 根系仿生结果

图 2~4 为小麦挑旗期根系生长的仿生结果。从图 2 可见, 根系生长呈现出明显的“向水性”。地

表蒸发使土壤从表层开始出现干旱, 并逐渐向下发展, 土壤的水势剖面通常是上低下高, 因而促使根系向下生长。主根或次根到一定长度后开始产生次根或下一级次根, 并向不同的方向生长。

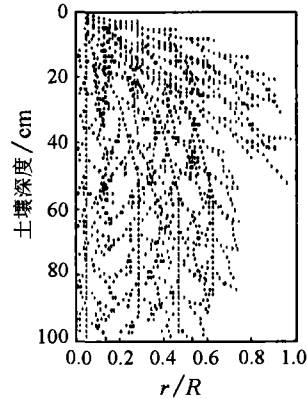


图 2 根系仿生图

由图 3~4 可以观察到, 冬小麦根量在垂直和水平剖面上均呈近似指数分布, 40 cm 深处的根量比最大, 然后随着深度的增加而逐渐减少。而在水平方向上, 根系主要分布在离植株 20 cm ($r/R = 0.7$) 的范围内, 在大约 $r/R = 0.20$ 时, 根量分布达到最大。比较文献 [2], 冬小麦根系仿生结果与试验观测值基本吻合。

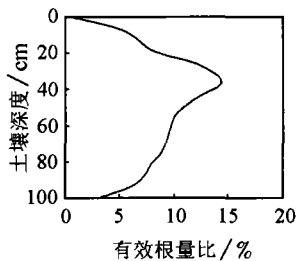


图 3 垂直方向根量比

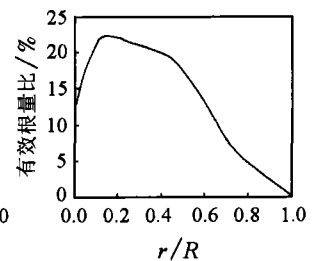


图 4 水平方向根量比

3.2 有作物覆盖土壤床与裸土床中的场量比较

在大气温度为 30°C, 太阳辐射热流为 300 W/m², 环境风速为 3 m/s, 空气相对湿度为 60% 的环境条件下, 对裸土床和有作物覆盖土壤床内的各场量进行比较。土壤初始温度为 20°C, 作物根系分布取本文的仿生模拟结果。

比较图 5 可以看出, 在相同环境条件下, 有作物覆盖时由于冠层的遮蔽作用, 到达土壤表面的太阳辐射减弱, 土壤床获得的热量相对较少。因此, 相比于裸土床, 有作物覆盖土壤床温度较低, 土壤内部温差较小且土壤床升温较慢。图 6 所示, 尽管有作物覆盖土壤床的温度较低, 土壤表面水分蒸发强

度较弱,但由于根系的吸水作用,使得内部液相含量低于裸土床。由于根系并不是充满整个土壤床空间,因此,在同一水平面上,液相分布不均匀。观察图 6 还可以发现,由于裸土表面温度比有作物覆盖土壤表面温度高,土表蒸发较强,因而,其表层土壤含水量低于有作物覆盖土壤床。

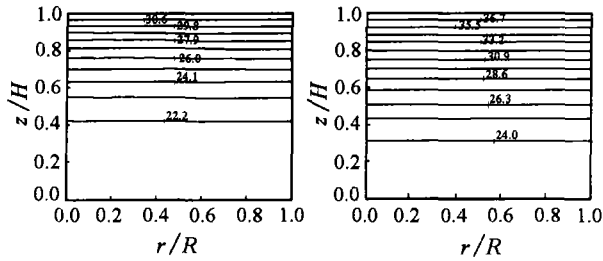


图 5(a) 有作物覆盖土壤床温度场 图 5(b) 裸土床温度场

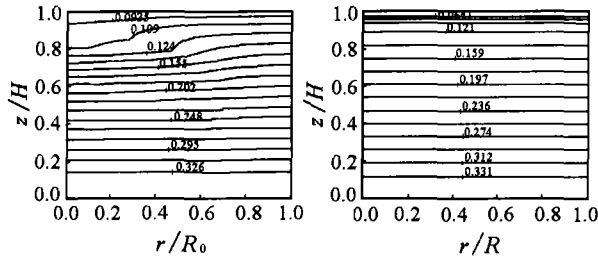


图 6(a) 有作物覆盖土壤床 图 6(b) 裸土床水分含量场

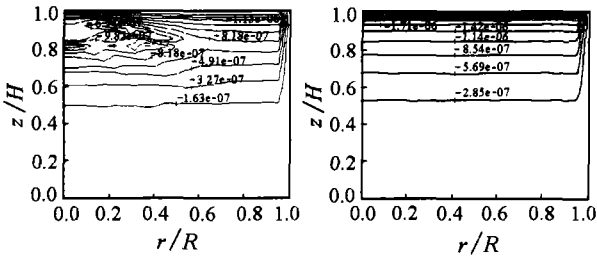


图 7(a) 有作物覆盖土壤床内部蒸发量场 图 7(b) 裸土床内部蒸发量场

由方程 (10) 可知,土壤内水蒸汽的扩散受温度梯度和湿分梯度的共同作用。在恒定环境条件下,土壤温度从上到下是逐渐降低的,水分蒸发主要发

生在土壤近表面区域,绝大部分水蒸汽由蒸发锋面向大气迁移,另有少部分则在温度梯度的控制下向土壤内部扩散,遇到较低温度的土壤即发生冷凝。因此,由图 7 可见,土壤内部蒸发量为负值,且随着深度增加,冷凝率逐渐降低。比较图 7(a) 和图 7(b) 可以看到,由于裸土床内温度梯度相对较大,其内部蒸汽冷凝量也较大;而在作物覆盖土壤床中,由于植物根系的作用,蒸汽冷凝量等高线有明显弯曲。

5 结 论

(1) 以实际作物根系试验的观测值为限制性条件,从生命进化的观念,对植物根系进行仿生模拟,得到了根系在土壤剖面的水平和垂直方向上的分布,基于这一分布,模拟了土壤内的热、湿迁移过程。

(2) 由于作物冠层的遮蔽和根系的吸水等作用,使得在相同环境条件下,有作物覆盖土壤床内部温度、蒸汽冷凝量和水分含量均低于裸土床;同时,由于根系在土壤床中的不均匀分布对蒸汽扩散运动的影响,有作物覆盖土壤床内的水分含量场和蒸汽冷凝场的等势线出现明显弯曲。

参 考 文 献

- [1] Gardner W R. Dynamic Aspects of Water Availability to Plants. Soil Sci., 1960, 89: 63-67
- [2] Adiku S G K, Braddock C W, Simulating Root Growth dynamics. Environmental Software, 1996, 11(1-3): 99-103
- [3] Molz F J. Extraction Term Model of Soil Moisture Use by Transpiring Plants. Water Resources Research, 1970, 6(5): 1346-1356
- [4] 康绍忠, 刘晓明, 高新科. 土壤-植物-大气连续体水分传输动态计算机仿真. 水利学报, 1992, (3): 1-12
- [5] 李会昌. SPAC 中水分运移与作物生长动态模拟及其在灌溉预报中的应用研究. [博士论文]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1997
- [6] Monteith J L, Vegetation and the Atmosphere Principles. London: Academic Press, 1975
- [7] 金明现, 王天铎. 玉米根系生长及向水性的模拟. 植物学报, 1996, 38(5): 384-390
- [8] Liu W. 2D Numerical Simulation for Simultaneous Heat, Water and Gas Migration in Soil Bed Under Different Environmental Conditions. Heat and Mass Transfer, 1998, 34(4): 307-316