

作物生长的土壤中氧气浓度场的 稳态数值模拟

范爱武 刘伟 刘炳成

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 建立了一个描述土壤中热、湿、气耦合迁移的数学模型, 对有冬小麦生长的圆柱形土壤床中的氧气浓度场进行了数值模拟。结果表明, 土壤床中的氧气浓度场与冬小麦的生长发育阶段、土壤的孔隙率以及土壤床的高度等因素密切相关。

关键词 冬小麦; 土壤床; 氧气浓度; 数值模拟

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2003)01-0097-03

STEADY NUMERICAL SIMULATION ON THE O₂ CONCENTRATION FIELD OF A VEGETATION SOIL BED

FAN Ai-Wu LIU Wei LIU Bing-Cheng

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

Abstract A mathematical model of simultaneous transport of heat, moisture and gas in the vegetation soil is developed. The O₂ concentration field of a cylindrical soil bed with winter wheat growing is obtained by means of steady numerical simulation, which shows that the soil O₂ concentration has a close relation to the growing stage of the winter wheat, the porosity of the soil and the height of the soil bed, et al.

Key words winter wheat; soil bed; O₂ concentration; numerical simulation

1 引言

土壤空气是土壤肥力的重要因素, 因植物根系和微生物活动及其它生化作用的影响, 土壤空气中 O₂ 含量略低于大气, CO₂ 含量高于大气几十倍^[1]。国外一些研究者对土壤氧气浓度进行过测量^[2], 但精度低, 测量系统复杂且只能得到局部氧气含量而不能得到整个氧气浓度场。本文忽略微生物对土壤氧气浓度的影响, 仅仅考虑植物根系的呼吸作用, 通过数值模拟计算出土壤氧气浓度场, 并对有关影响因素进行了讨论。

2 作物生长的土壤中热、湿、气耦合迁移的数学模型

基于 De Vries 提出的土壤水、热耦合迁移的双

场模型^[3], 结合 Whitaker 的体积平均法^[4], 本文建立了描述有作物生长的土壤中热、湿、气耦合迁移的二维稳态数学模型。

2.1 连续性方程

$$\text{液相: } \nabla \cdot (\rho_l \epsilon_l \vec{V}_l) = -\dot{m} + S_w \quad (1)$$

$$\text{水蒸汽: } \nabla \cdot [\rho_v \epsilon_g (\vec{V}_g + \vec{V}_v)] = \dot{m} \quad (2)$$

$$\text{气相混合物: } \nabla \cdot (\rho_g \epsilon_g \vec{V}_g) = \dot{m} + S_{O_2} + S_{CO_2} \quad (3)$$

2.2 水蒸汽扩散方程

$$\vec{V}_v = -D_{Tv} \nabla T - D_{lv} \nabla \epsilon_l \quad (4)$$

2.3 动量方程

$$\begin{aligned} \text{液相: } (\vec{V}_l \cdot \nabla) \vec{V}_l - \frac{\dot{m}}{\rho_l \epsilon_l} \vec{V}_l &= -\frac{g D_l}{K_l} \nabla \epsilon_l - \\ \frac{g \epsilon_l}{K_l} \vec{V}_l - \frac{g \epsilon_g}{K_g} (\vec{V}_l - \vec{V}_g) + v_l \nabla^2 \vec{V}_l - \vec{g} \end{aligned} \quad (5)$$

收稿日期: 2002-11-02; 修订日期: 2002-12-04

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (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: 范爱武 (1973-), 男, 湖南隆回人, 博士研究生, 主要从事资源-环境-作物系统中的热物理问题及土壤和地下水污染方面的研究。

$$\text{气相: } (\vec{V}_g \cdot \nabla) \vec{V}_g + \frac{\dot{m}}{\rho_g \varepsilon_g} (\vec{V}_g + \vec{V}_v) = -\frac{1}{\rho_g} \nabla P - \frac{g \varepsilon_g}{K_g} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) + v_g \nabla^2 \vec{V}_g - \vec{g} \quad (6)$$

2.4 能量方程

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

2.5 氧气迁移方程

$$\nabla \cdot (\rho_g \varepsilon_g \vec{V}_g C_{O_2} M_{O_2}) = \nabla \cdot (\rho_g \varepsilon_g D_{O_2} M_{O_2} / M_g \nabla C_{O_2}) + S_{O_2} \quad (8)$$

$$\lambda_m = \varepsilon_s \lambda_s + \varepsilon_l \lambda_l + \varepsilon_g \lambda_g \quad (9)$$

$$\varepsilon_g = 1 - \varepsilon_s - \varepsilon_l \quad (10)$$

式中 D_l 和 K_l 分别为土壤水的扩散系数和水力传导系数; K_g 为气体传导系数; ε 为各相的体积含量; \dot{m} 为土壤水的蒸发(冷凝)率; L_a 为水的汽化潜热; λ 为导热系数; c_p 为定压比热容; D_{O_2} 氧气的扩散系数; C_{O_2} 为氧气的体积浓度; S_{O_2} , S_{CO_2} 和 S_w 分别为根系对氧气、二氧化碳和水分的吸收速率; D_{T_v} 和 D_{l_v} 分别为由温度梯度和土壤水含量梯度引起的水蒸汽扩散系数。下标 s, l, g, v, O_2 和 CO_2 分别代表固相、液相、气相、水蒸汽、氧气和二氧化碳。

2.6 边界条件

计算对象为有冬小麦生长的圆柱形土壤床, 沿圆周对称分布。土壤床底部绝热且水饱和; 四周绝热且不透水; 上表面敞开。边界条件描述如下:

$$z = 0: \quad \partial T / \partial z = \partial C_{O_2} / \partial z = 0$$

$$\varepsilon_g = 0, v_l = v_g = v_v = 0$$

$$z = Z: \quad -\lambda_m \partial T / \partial z = G$$

$$\rho_v \varepsilon_g (u_v + u_g) + \rho_l \varepsilon_l u_l = E_s,$$

$$v_g = v_l = v_v = 0, C_{O_2} = 21\%$$

$$r = 0: \quad \partial T / \partial r = \partial u_l / \partial r = \partial u_g / \partial r = \partial u_v / \partial r =$$

$$\partial \varepsilon_l / \partial r = \partial C_{O_2} / \partial r = 0, v_l = v_g = v_v = 0$$

$$r = R: \quad \partial T / \partial r = \partial \varepsilon_l / \partial r = \partial C_{O_2} / \partial r = 0$$

$$v_l = v_g = U_l = u_g = 0$$

式中 Z 和 R 分别为土壤床的高度和半径, G 是土壤表面的热通量, 根据能量平衡可得:

$$G = R_S + H + LE \quad (11)$$

式中 R_S 为土壤表面获得的净辐射, LE 为土壤表面水分的蒸发潜热, H 为土壤表面和大气之间交换的显热^[5]。 G 的最终表达式为^[6]:

$$G = R_S - \rho c_p \cdot \{(T_s - T_p) / r_{sp} + (e_s - e_p) / [\gamma \cdot (r_s + r_{sp})]\} \quad (12)$$

式中 T_s 和 T_p 分别为土表和作物冠层的气温; e_s 和 e_p 分别为土表和作物冠层的水蒸汽压 (kPa); r_{sp} 和 r_s 分别为显热的空气动力学阻力和土表的蒸发阻力 (s/m)。

2.7 源项的确定

文献 [7] 中, 我们已经建立了根系吸水率函数, 如下所示:

$$S(r, z) = 2.156 EP \cdot (1 - r/R) \cdot e^{-1.8z/Z} / (R \cdot Z) \quad (13)$$

式中 EP 为作物蒸腾量, 采用 Penman-Monteith 公式计算^[6]。对于单位土壤体积中作物根的呼吸速率 S_{O_2} , 采用单位体积土壤中根的长度乘以单位长度根的呼吸速率来计算。假设所有根的活性都相同, 单位长度的小麦幼根的呼吸速率可由文献 [8] 查得, 从而有:

$$S_{O_2} = -S_{O_2} \times [1 - r / (1.8R)] / R \times \exp[10.58 - 5.3 \cdot (Z - z)] \quad (14)$$

式中 S_{O_2} 为单位长度根的呼吸速率。假定根系的呼吸商为 1^[8], 则有:

$$S_{O_2} + S_{CO_2} = 0 \quad (15)$$

2.8 有关系数的确定

在 $-10 \sim 50^\circ\text{C}$ 范围内氧气在空气中的扩散系数 (cm^2/s) 与温度和压力的关系如下:

$$D_a = [0.1751 + 0.0012 \cdot (T - 273)] / P \quad (16)$$

式中 P 为大气压 (Pa), T 为绝对温度。土壤中氧气的扩散系数与土壤水含量有关, 本文采用 De JONG 通过实验得到的关系式^[9], 即:

$$0 \sim 15\text{cm}: \quad D_{O_2} / D_a = 0.38 - 0.0069 \varepsilon_l \quad (17)$$

$$15 \sim 150\text{cm}: \quad D_{O_2} / D_a = 0.31 - 0.0059 \varepsilon_l \quad (18)$$

其它系数的确定参见文献 [10]。

3 土壤氧气浓度场的稳态数值模拟

本文应用控制容积积分法进行数值模拟, 对冬小麦的生长发育阶段, 土壤孔隙率和土壤床高度三

个因素对土壤氧气浓度场的影响进行讨论, 结果如图 1 至图 4 所示。图 2~4 这三种情况与图 1 的情况相比只有一个因素不同。

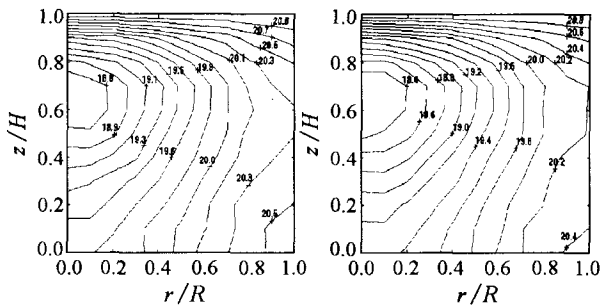


图 1 挑旗期的土壤氧气浓度场 图 2 抽穗-开花期的土壤氧气浓度场

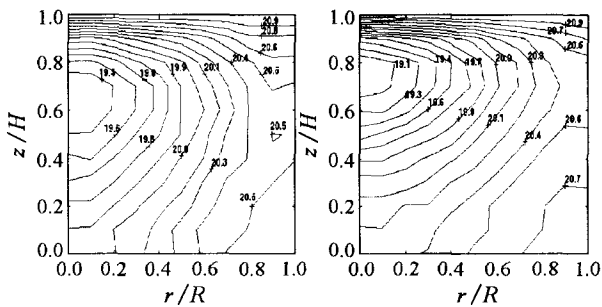


图 3 空隙率为 49% 的土壤氧气浓度场 图 4 高度为 40 土壤床氧气浓度场

图 1 为冬小麦挑旗期土壤床的氧气浓度场, 土壤孔隙率为 39%, 土壤床高度为 30 cm。从图 1 可以看到, 土壤床中的氧气含量水平在 15% 以上, 能满足植物根系生长的需要^[1]。在同一深度处, 靠近土壤床中心处的氧气浓度比边缘处低, 这是由于中心处冬小麦的根系较密集, 而边缘处则根系较稀疏。从图 1 还可以看出, 氧气浓度的等值线形成一个环形, 这是因为深层土壤含水量大, 气相空间小, 氧气扩散系数小, 然而该区域根系稀疏, 耗氧少; 而浅层土壤中根系密布, 耗氧多, 但该区水含量低, 氧气扩散系数大, 且靠近土壤表面, 氧气能得到及时补充。因而只有在土壤床中部形成一个氧气浓度相对较低的区域。

图 2 为冬小麦在抽穗-开花期土壤床的氧气浓度场。由于抽穗-开花期冬小麦根系比挑旗期更发达, 因而呼吸作用更加旺盛, 消耗更多的 O_2 , 模拟计算时假设根的呼吸速率是挑旗期的 1.2 倍, 因此可以预测, 这时土壤的氧气含量水平会比挑旗期低。从图 2 可以看到, 抽穗-开花期土壤中的氧气浓度水平比挑旗期大约低 0.1%~0.4%, 且越靠近边缘处, 二

者的差别越小。

图 3 给出了孔隙率为 49% 时土壤中的氧气浓度场。从图 3 和图 1 的比较可以看出, 土壤孔隙率较大时, 由于气相空间较大, 氧气在土壤孔隙空间中迁移时受到的阻力相对较小, 即土壤通气性较好, 从而土壤中的氧气浓度也较高。由图 3 和图 1 还可以看到, 孔隙率为 49% 的土壤床, 其氧气浓度比孔隙率为 39% 的土壤床平均高 0.1%~0.6%, 从而能够更好地满足冬小麦根系生长的需要。

图 4 示出了高度为 40 cm 的土壤床中的氧气浓度场。比较图 4 和图 1 可以看出, 在相同的相对深度处, 高度为 40 cm 的土壤床中的氧气浓度比高度为 30 cm 时大约高 0.1%~0.3%。这是由于土壤床较高时土壤的容积较大, 含氧量较多, 同时整个根系的分布空间也较大, 从而氧气浓度水平较高。

4 结 论

通过以上的分析和讨论可以看到, 作物生长较旺盛时, 根系需要消耗较多的氧气, 使得土壤氧气浓度相对较低; 土壤孔隙率越大, 其通气性越好, 土壤氧气浓度也越高; 土壤床较高时, 相应的土壤氧气浓度水平较高。此外, 土壤氧气浓度场还与土壤水含量和地表的空气流动状况有关, 本文对这些不再一一进行讨论。

参 考 文 献

- [1] 丘华昌. 土壤学. 北京: 中国农业科技出版社, 1995
- [2] Greenwood D J, Goodman D. Direct Measurements of the Distribution of Oxygen in Soil Aggregates and in Cores of Fine Soil Crumbs. *J. Soil Science*, 1967, 18: 181-196
- [3] De Vries D A. Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media. *Trans. Am. Geophys.*, 1958, 39: 909-916
- [4] Whitaker S. The Transport Equations for Multi-phase System. *Chem. Eng. Sci.*, 1973, 28: 139-147
- [5] Norman J. Rosenberg. *Microclimate: The Biological Environment*. U.S.A.: John Wiley & Sons, 1974
- [6] 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
- [7] 曾海波, 刘伟, 范爱武. 作物覆盖条件下土壤中水热分布的稳态数值比较. *工程热物理学报*, 2002, 23(7): 464-466
- [8] 颜启全. *种植基础*. 北京: 高等教育出版社, 1995
- [9] De Jong E. Calculation of Soil Respiration and Activity from CO_2 Profiles in the Soil. *Soil Science*, 1972, 119: 328-333
- [10] Liu W, Zhao X X, Mizukami K. 2D Numerical Simulation for Simultaneous Heat, Water and Gas Migration in Soil Bed Under Different Environmental Conditions. *Heat and Mass Transfer*, 1998, 34: 307-316