

土壤盐分运移温度效应的数值研究

范爱武 刘伟 许国良

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要 分析了土壤盐分运移的各种机理, 在同时考虑水分和盐分运移温度效应的基础上, 建立了非饱和土壤热、湿、气及盐分耦合运移的数学模型, 继而通过数值计算考察了 20 cm 深的砂土中盐分运移温度效应的大小, 结果显示: 5 年后温度效应对 4 个不同深度处土壤溶液中盐分浓度的相对影响分别达 7.8、4.8、0.8 和 0.34 倍。

关键词 土壤; 水分运移; 盐分运移; 温度效应; 数值计算

中图分类号: TK124; S152.8 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2005)04-0647-03

NUMERICAL INVESTIGATION IN THE TEMPERATURE EFFECT ON THE TRANSPORT OF SOIL SOLUTE

FAN Ai-Wu LIU Wei XU Guo-Liang

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

Abstract In the present paper, a thorough analysis was conducted on solute migration in soil. Based on previous work of us, a mathematical model has been developed in which the temperature effects on the transports of soil water and solute are taken in account. Numerical calculation showed that, five years later, the temperature effect might cause relative differences in soil solute concentration at four different depths of a soil-bed of 20cm depth by 7.8, 4.8, 0.8 and 0.34 times.

Key words soil; water movement; solute movement; temperature effect; numerical investigation

1 引言

盐分在土壤中的迁移机制包括盐分随土壤水的流动、在浓度梯度下的分子扩散、机械弥散以及温度梯度的作用等。盐分必须溶解于土壤水中才能运动, 即俗语说的“盐随水来, 盐随水走”。通常很难将分子扩散和机械弥散区分开来, 故常常用一个扩散系数来综合描述这两种机制, 称之为水动力弥散系数。此外, 大部分研究者往往忽略土壤水分和盐分运移的温度效应, 然而越来越多的实验证明, 温度对土壤水分和盐分运移的影响有时是不能忽略的。否则会与实际情况形成较大的偏差。本文通过建立数学模型来定量计算土壤盐分运移的温度效应。

2 土壤盐分运移的温度效应

前已述及, 土壤盐分运移离不开水, 而水的运移又与温度密切相关。本人基于文献 [1~4] 中提出

的表面张力 - 粘滞流理论 (STVF), 对土壤水分运移的温度效应进行了数值研究 [5], 结果表明: 在相同的条件下, 60 天后, 考虑温度效应与不考虑温度效应的土壤水分含量的计算结果, 相对偏差可达 8.7% 以上。因此, 要考察土壤中盐分运移的温度效应, 首先必须考虑土壤水分运移的温度效应。此外, 盐分自身的扩散系数也与温度为强相关关系, 表 1 给出几个典型温度下 NaCl 在水中的扩散系数:

表 1 NaCl 在水中的扩散系数与温度之间的关系

温度 (°C)	5	15	25	35
扩散系数 ($\times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$)	0.919	1.241	1.612	2.031

从表 1 可以看到, 35°C 时 NaCl 在水中的扩散系数比 5°C 时高出一倍以上, 可见温度对盐分扩散的影响非常强烈。NaCl 在水中的扩散系数 D_w 与温度 t 之间的关系可拟合成为如下的关系式:

$$D_w(t) = 0.77669 + 0.0272t + 0.00025t^2 \quad (1)$$

收稿日期: 2005-03-13; 修订日期: 2005-04-27

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.50376015); 教育部博士点基金资助项目 (No.20040487037); 中国博士后基金资助项目 (No.2004036128)

作者简介: 范爱武 (1973-), 男, 湖南隆回人, 讲师, 博士, 主要从事含湿非饱和和多孔介质中的传热传质研究。

土壤是一种多孔介质,盐分在土壤溶液中的扩散与水中不同,还需考虑土壤水分含量和土壤骨架迂曲度的影响,此时的有效扩散系数为:

$$D_s = D_w \cdot \varepsilon_l / \sigma \quad (2)$$

式中, σ 为土壤骨架的迂曲度。

3 考虑温度效应的土壤热、湿、气及盐分耦合运移的数学模型

笔者在刘伟^[6]提出的“六场-相变-扩散模型”的基础上,考虑温度对土壤水分和盐分运移的影响,建立了非饱和土壤中热、湿、气及盐分耦合运移的数学模型,其矢量形式如下:

(1) 连续性方程

$$\text{液相: } \frac{\partial(\rho_l \varepsilon_l)}{\partial \tau} + \nabla(\rho_l \varepsilon_l \vec{V}_l) = -\dot{m} \quad (3)$$

$$\text{水蒸汽: } \frac{\partial(\rho_v \varepsilon_g)}{\partial \tau} + \nabla[\rho_v \varepsilon_g (\vec{V}_g + \vec{V}_v)] = \dot{m} \quad (4)$$

$$\text{气相混合物: } \frac{\partial(\rho_g \varepsilon_g)}{\partial \tau} + \nabla(\rho_g \varepsilon_g \vec{V}_g) = \dot{m} \quad (5)$$

(2) 液相和气相的动量方程

$$\frac{\partial \vec{V}_l}{\partial \tau} + (\vec{V}_l \cdot \nabla) \vec{V}_l - \frac{\dot{m}}{\rho_l \varepsilon_l} \vec{V}_l = -\frac{g D_l}{K_l} \nabla \varepsilon_l - \frac{g \varepsilon_l}{K_l} \vec{V}_l - \frac{g \varepsilon_g}{K_g} (\vec{V}_l - \vec{V}_g) + \nu_l \nabla^2 \vec{V}_l - \vec{g} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \vec{V}_g}{\partial \tau} + (\vec{V}_g \cdot \nabla) \vec{V}_g + \frac{\dot{m}}{\rho_g \varepsilon_g} (\vec{V}_g + \vec{V}_v) = -\frac{1}{\rho_g} \nabla P - \frac{g \varepsilon_g}{K_g} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) + \nu_g \nabla^2 \vec{V}_g - \vec{g} \quad (7)$$

(3) 蒸汽扩散方程

$$\vec{V}_v = -D_{T_v} \nabla T - D_{l_v} \nabla \varepsilon_l \quad (8)$$

(4) 能量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} [(\rho c)_m T] + c_{P,l} T [\vec{V}_l \cdot \nabla(\rho_l \varepsilon_l)] + c_{P,g} T [\vec{V}_g \cdot \nabla(\rho_g \varepsilon_g)] + \\ c_{P,v} T [(\vec{V}_g + \vec{V}_v) \cdot \nabla(\rho_v \varepsilon_g)] + \varepsilon_l c_{P,l} [\vec{V}_l \cdot \nabla(\rho_l T)] + \\ \varepsilon_g c_{P,g} [\vec{V}_g \cdot \nabla(\rho_g T)] + \varepsilon_g c_{P,v} [(\vec{V}_g + \vec{V}_v) \cdot \nabla(\rho_v T)] = \\ \nabla \cdot (\lambda_m \nabla T) - L_a \dot{m} + S_h \end{aligned} \quad (9)$$

(5) 盐分运移方程

$$\frac{\partial(\rho_l \varepsilon_l C_s)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_l \varepsilon_l C_s \vec{V}_l) = \nabla \cdot (\rho_l \varepsilon_l D_s \nabla C_s) \quad (10)$$

其中:

$$D_{T_v} = D_v \sigma \varepsilon_g \frac{P}{P - P_v} \left(\frac{1}{\rho_{v,s}} \frac{d\rho_{v,s}}{dT} - \frac{\varepsilon_l \psi}{RT^2} \right)$$

$$D_{l_v} = D_v \sigma \varepsilon_g \frac{P}{P - P_v} \frac{g}{RT} \frac{\partial \psi}{\partial T}$$

$$D_v = 5.893 \times 10^{-6} T^{2.3} / P$$

$$\psi(\theta, T) = \psi_{Tre}(\theta) \cdot \sigma_T / \sigma_{Tre}$$

$$K(\theta, T) = K_{Tre}(\theta) \cdot \mu_T / \mu_{Tre}$$

$$D(\theta, T) = D_{Tre}(\theta) \cdot (\sigma_T / \sigma_{Tre}) \cdot (\mu_{Tre} / \mu_T)$$

$$1/\rho_{v,s} = 194.4 \exp[-0.06374(T - 273.15) + 0.1634 \times 10^{-3}(T - 273.15)^2]$$

4 土壤盐分运移温度效应的数值分析

本节通过数值计算考察砂土中盐分运移温度效应的大小。以 NaCl 为代表, 25°C 作为参考温度, 文献 [6] 拟合了该温度下砂土水势和水分的输运系数与水分含量之间的关系式, NaCl 在土壤中的扩散系数与温度之间的关系见式 (1)。本文中 NaCl 的扩散系数均放大了 100 倍, 以便于更加明显地反映温度对土壤盐分运移的影响。计算区域为宽和高均为 20 cm 的二维砂土剖面, 左右边界绝热、不透水, 下表面绝热但持续供水且盐分浓度始终保持为 2.0 g/kg; 上表面与大气环境接触, 各气象因子均取定值: 气温为 35°C, 太阳辐射强度为 600 W/m², 大气相对湿度为 60%, 风速为 1 m/s。假设初始温度场为 20°C 的均匀温度场, 土壤水分从下到上为逐渐减小的线性分布, 初始盐分浓度场为零。应用有限差分法对以上偏微分方程组进行离散, 网格数为 25×25。代数方程组采用交替方向块迭代法 (ADI) 求解, 气相动量方程中压力和速度的解耦采用 “SIMPLE” 算法。从初始状态开始, 共计算了 5 年。图 1(a)、(b)、(c) 和 (d) 分别给出了第 4 cm、10 cm、16 cm 和 18 cm 深处, 两种情况下土壤盐分含量随时间变化情况的比较, 其中, 实线代表同时考虑土壤水分和盐分温度效应的土壤盐分动态变化, 虚线则为不考虑温度效应的土壤盐分动态变化。

从图 1(a)、(b)、(c) 和 (d) 可以看出, 随着时间的推移, 土壤溶液中盐分的浓度逐渐升高。同时, 土壤盐分的浓度在靠近底部的薄层土壤中较高, 而在浅层土壤中盐分的浓度相当低。这是因为土壤中盐分的扩散系数相当小, 同时, 在砂土中, 水分的毛细作用也较小, 故土壤水分的运动速度较小, 导致盐分的运移速度相对较慢。

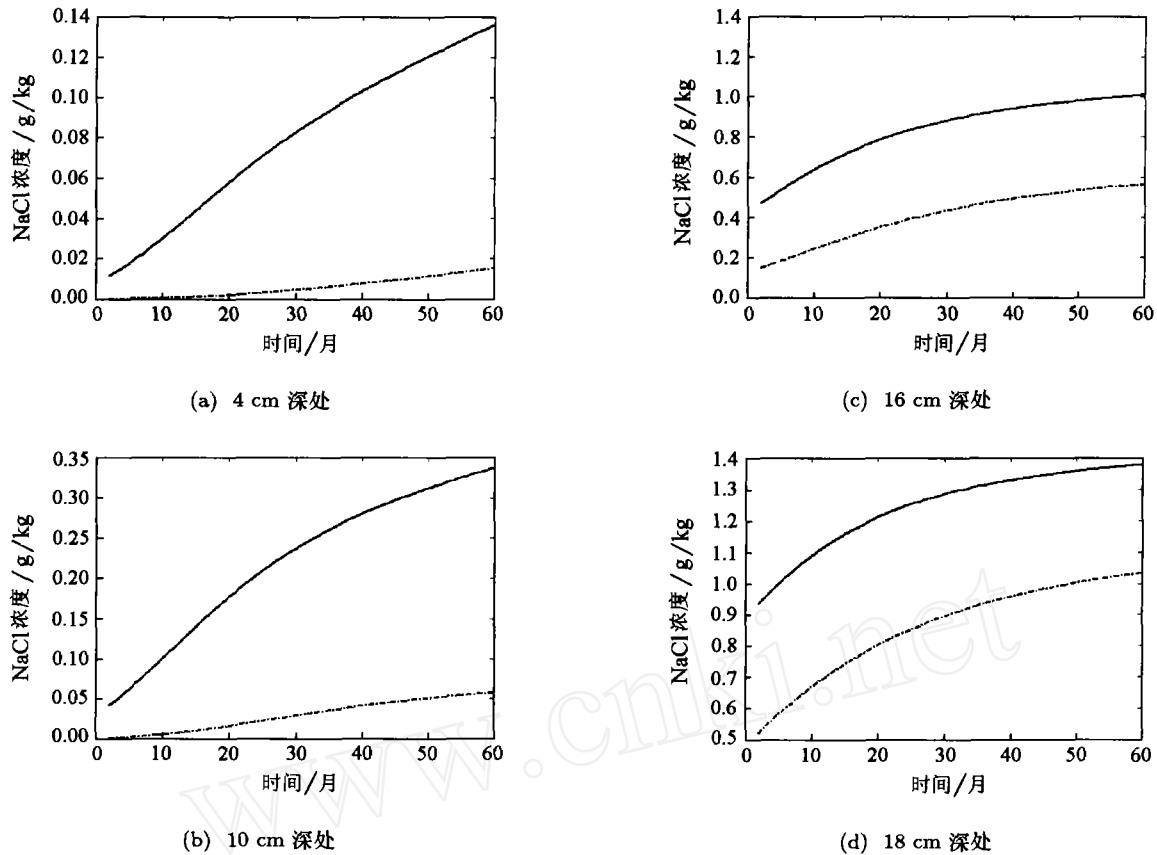


图1 考虑与不考虑土壤水分和盐分运移温度效应的比较,
实线和虚线分别为考虑和未考虑温度效应的盐分动态变化

此外, 分别比较以上四个图中的两条曲线可以看出, 由考虑水分和盐分运移温度效应的数学模型计算出来的土壤盐分含量, 均比未考虑温度效应时相同深度处的土壤盐分含量高。这是因为考虑温度效应时, 土壤水分的能量水平(土水势)以及土壤水分运移的输运系数(水力传导系数和扩散系数)以及盐分的扩散系数均比未考虑温度效应时大, 因此土壤水分和盐分向上迁移的速度加快, 从而得到一个较高的土壤盐分浓度。5年后温度效应对4个不同深度处土壤溶液中盐分浓度的相对影响分别达7.8、4.8、0.8和0.34倍。

5 结 论

本文的数值计算表明, 对于长年累月来说, 考虑土壤水分和盐分运移的温度效应与不考虑温度效应时, 土壤溶液中盐分浓度的计算结果相差很大。因此, 在数学模型中考虑土壤水分和盐分运移的温度效应, 能使模型更准确、更全面地反映土壤盐分

运移的机理。

参 考 文 献

- [1] Philip J R, De Vries D A. Moisture Movement in Porous Materials Under Temperature Gradients. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1957, 38(2): 222-232
- [2] Haridaan M, Jensen R D. Effect of Temperature on Pressure Head-Water Content Relationship and Conductivity of Two Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 1972, 36(3): 703-708
- [3] Philip J R. The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and Algebraic Infiltration Equations. *Soil Science*, 1957, 84(8): 257-264
- [4] Giakoumakis S G. Eliminating the Effect of Temperature form Unsaturated Soil Hydraulic Functions. *J. Hydrology*, 1991, 129(5): 109-125
- [5] 范爱武, 刘伟. 土壤水分运移温度效应的数值研究. 见: 中国工程热物理学会传热传质学术年会论文集(上册). 吉林, 2004. 409-412
- [6] Liu W. A General Mathematical Modeling for Heat and Mass Transfer in Unsaturated Porous Media: an Application to Free Evaporative Cooling. *Heat and Mass Transfer*, 1995, 31(1): 49-55