

非饱和土壤中溶质运移 对流占优问题的通量校正运移解法

徐绍辉,张佳宝,刘建立

(中国科学院南京土壤研究所,江苏南京 210008)

摘要: 描述非饱和土壤中溶质运移的对流弥散方程可分成两部分:对流部分用通量校正运移(FCT)算法求解;弥散部分用常规的隐式差分方法求解. FCT算法包括两个阶段,一个是低阶运移阶段,这一阶段的解,可能会引进过量的数值弥散;另一个是高阶通量校正阶段,通过对反扩散通量进行校正(限定),可有效地消除数值弥散和数值振荡. 而水体积分数用FUCG方法求得,能保持质量守恒. 通过数值例子验证了FCT算法的有效性.

关键词: 非饱和土壤;对流占优;FCT算法.

中图分类号: P642.11⁺4 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)05-0529-04

作者简介: 徐绍辉(1963—),男,博士,副研究员,主要从事水流和溶质在地下介质中运移的数值模拟、土壤水和地下水资源管理,以及土壤和地下水的污染治理等方面的研究.

近些年来,定量研究溶质通过非饱和土壤的运移,已成为土壤物理中的热点领域之一. 由于非饱和土壤的非均质性和优势流等因素的影响,溶质在其中的运移往往是对流占优势的. 有关对流占优问题(大网格 Peclet 数)的数值算法,在地下水的研究中已有许多例子,但在非饱和土壤中的研究还不多见. 通量校正运移(flux-corrected transport)方法是由 Boris 等^[1] 和 Book 等^[2] 提出的,其后, Zalesak^[3]、Hills 等^[4] 在这方面又做了很多研究. FCT 方法是一种混合有限差分格式,它利用了低阶近似和高阶校正格式,这种方法可以减少数值弥散和数值振荡误差. 本文是在 Hills 研究的基础上,结合用 FUCG 算法解 Richards 方程,以数值例子验证了 FCT 方法的有效性.

1 方程的分解

考虑溶质在非饱和土壤中的二维运移:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta c) + \frac{\partial}{\partial x}(q_x c) + \frac{\partial}{\partial z}(q_z c) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\theta D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\theta D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z}). \quad (1)$$

式中, c 是溶质的浓度, θ 是水体积分数, q_x, q_z 为 x 方向和 z 方向上的通量, D_{xx}, D_{zz} 分别是 x 方向和 z 方向上的水动力弥散系数.

边界条件是:

$$\alpha c + \beta n_j (q_j c - \theta D_{jj} \frac{\partial c}{\partial j}) = f(x, z, t), \quad \text{在 } \Gamma \text{ 上.} \quad (2)$$

式中, α, β 是参数, $\alpha = 1, \beta = 0$ 说明是第一类边界条件; $\alpha = 0, \beta \neq 0$ 则是第二类边界条件; n_j 是方向指向 Γ 外侧并与 γ 垂直的单位向量; j 表示 x 或 z ; θ 是水体积分数.

把(1)式中的时间导数项用差分近似得出:

$$\frac{(\theta c)^{n+1} - (\theta c)^n}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x}(q_x c) + \frac{\partial}{\partial z}(q_z c) = \frac{\partial}{\partial x}(\theta D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\theta D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z}). \quad (3)$$

引进中间变量 $(\theta c)^M$, 把(3)式分成两部分:

$$\frac{(\theta c)^M - (\theta c)^n}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x}(q_x c) + \frac{\partial}{\partial z}(q_z c) = 0; \quad (4)$$

$$\beta n_j q_j c = f(x, z, t), \quad \text{在 } \Gamma \text{ 上.} \quad (5)$$

式(4), (5)组成一纯对流问题,可用 FCT 方法来解. 把式(4), (5)代入式(2), (3)得

$$\frac{(\theta c)^{n+1} - (\theta c)^n}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{(\theta c)^M - (\theta c)^n}{\Delta t}; \quad (6)$$

$$\alpha c - \beta n_j \theta D_{jj} \partial c / \partial j = 0, \quad (j = x, z) \text{ 在 } \Gamma \text{ 上.} \quad (7)$$

(6), (7) 式构成了一纯弥散问题, 可以用常规的交替方向隐式差分方法来求解。

2 二维 FCT 算法

对于二维溶质运移问题, (4) 式可以写成:

$$\frac{(\theta c)^{n+1} - (\theta c)^n}{\Delta t} + \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial z} = 0, \quad (8)$$

式中, $f = q_x c$, $g = q_z c$ 。

FCT 算法包括两个主要阶段: 低阶对流或运移阶段和高阶反扩散或校正阶段。

2.1 低阶对流阶段的解

低阶对流阶段的解可通过预测—校正算法来实现。下列各式中的 $(i + \frac{1}{2}, j)$ 和 $(i, j + \frac{1}{2})$ 分别是 (i, j) 和 $(i+1, j)$ 的算术平均值, 以及 (i, j) 和 $(i, j+1)$ 的算术平均值。

预测步:

$$f_{i+\frac{1}{2},j}^* = q_{x_{i+\frac{1}{2},j}}^n c_{i,j}^n, \quad q_{x_{i+\frac{1}{2},j}}^n \geq 0; \quad (9a)$$

$$f_{i+\frac{1}{2},j}^* = q_{x_{i+\frac{1}{2},j}}^n c_{i+1,j}^n, \quad \text{其他}; \quad (9b)$$

$$g_{i,j+\frac{1}{2}}^* = q_{z_{i,j+\frac{1}{2}}}^n c_{i,j}^n, \quad q_{z_{i,j+\frac{1}{2}}}^n \geq 0; \quad (9c)$$

$$g_{i,j+\frac{1}{2}}^* = q_{z_{i,j+\frac{1}{2}}}^n c_{i,j+1}^n, \quad \text{其他}; \quad (9d)$$

$$\theta_{i,j}^{n+1} c_{i,j}^* = \theta_{i,j}^n c_{i,j}^n - (\Delta t / \Delta x) (f_{i+\frac{1}{2},j}^* - f_{i-\frac{1}{2},j}^*) - (\Delta t / \Delta z) (g_{i,j+\frac{1}{2}}^* - g_{i,j-\frac{1}{2}}^*). \quad (10)$$

校正步:

$$f_{i+\frac{1}{2},j}^L = q_{x_{i+\frac{1}{2},j}}^n \frac{c_{i,j}^n + c_{i,j}^*}{2}, \quad q_{x_{i+\frac{1}{2},j}}^n \geq 0; \quad (11a)$$

$$f_{i+\frac{1}{2},j}^L = q_{x_{i+\frac{1}{2},j}}^n \frac{c_{i+1,j}^n + c_{i+1,j}^*}{2}, \quad \text{其他}; \quad (11b)$$

$$g_{i,j+\frac{1}{2}}^L = q_{z_{i,j+\frac{1}{2}}}^n \frac{c_{i,j}^n + c_{i,j}^*}{2}, \quad q_{z_{i,j+\frac{1}{2}}}^n \geq 0; \quad (11c)$$

$$g_{i,j+\frac{1}{2}}^L = q_{z_{i,j+\frac{1}{2}}}^n \frac{c_{i,j+1}^n + c_{i,j+1}^*}{2}, \quad \text{其他}; \quad (11d)$$

$$\theta_{i,j}^{n+1} c_{i,j}^L = \theta_{i,j}^n c_{i,j}^n - (\Delta t / \Delta x) (f_{i+\frac{1}{2},j}^L - f_{i-\frac{1}{2},j}^L) - (\Delta t / \Delta z) (g_{i,j+\frac{1}{2}}^L - g_{i,j-\frac{1}{2}}^L). \quad (12)$$

(10), (12) 是两个显式差分方程, 可方便地求出未知值 $c_{i,j}^*$ 和 $c_{i,j}^L$ 。

2.2 高阶校正阶段的解

在第一阶段的解中, 可能会引进过量的数值弥

散, 因此, FCT 算法的第二阶段是通过反扩散通量来校正第一阶段的解。

首先, 由下列步骤求出高阶通量 $F_{i+\frac{1}{2},j}^H$ 和 $G_{i,j+\frac{1}{2}}^H$:

$$f_{i,j}^* = c_{i,j}^n (q_{x_{i-\frac{1}{2},j}}^n + q_{x_{i+\frac{1}{2},j}}^n) / 2, \quad (13a)$$

$$g_{i,j}^* = c_{i,j}^n (q_{z_{i,j-\frac{1}{2}}}^n + q_{z_{i,j+\frac{1}{2}}}^n) / 2. \quad (13b)$$

高阶通量表示为:

$$F_{i+\frac{1}{2},j}^* = (7/12) (f_{i+1,j}^* + f_{i,j}^*) - (1/12) (f_{i+2,j}^* - f_{i-1,j}^*), \quad (14a)$$

$$G_{i,j+\frac{1}{2}}^* = (7/12) (g_{i,j+1}^* + g_{i,j}^*) - (1/12) (g_{i,j+2}^* - g_{i,j-1}^*). \quad (14b)$$

那么, 浓度的临时值 (即预测值) $c_{i,j}^L$ 可用下面的方程显式求出:

$$\theta_{i,j}^{n+1} c_{i,j}^L = \theta_{i,j}^n c_{i,j}^n - (\Delta t / \Delta x) (F_{i+\frac{1}{2},j}^* - F_{i-\frac{1}{2},j}^*) - (\Delta t / \Delta z) (G_{i,j+\frac{1}{2}}^* - G_{i,j-\frac{1}{2}}^*). \quad (15)$$

用 $c_{i,j}^L$ 来修正通量 $f_{i,j}$ 和 $g_{i,j}$,

$$f_{i,j} = \frac{c_{i,j}^n + c_{i,j}^L}{2} \left[\frac{q_{x_{i-\frac{1}{2},j}}^n + q_{x_{i+\frac{1}{2},j}}^n}{2} \right], \quad (16a)$$

$$g_{i,j} = \frac{c_{i,j}^n + c_{i,j}^L}{2} \left[\frac{q_{z_{i,j-\frac{1}{2}}}^n + q_{z_{i,j+\frac{1}{2}}}^n}{2} \right]. \quad (16b)$$

这样, 再用下列方程得出校正的高阶通量:

$$F_{i+\frac{1}{2},j}^H = (7/12) (f_{i+1,j} + f_{i,j}) - (1/12) (f_{i+2,j} + f_{i-1,j}), \quad (17a)$$

$$G_{i,j+\frac{1}{2}}^H = (7/12) (g_{i,j+1} + g_{i,j}) - (1/12) (g_{i,j+2} + g_{i,j-1}). \quad (17b)$$

其次确定反扩散通量 $A_{i+\frac{1}{2},j}$ 和 $A_{i,j+\frac{1}{2}}$:

$$A_{i+\frac{1}{2},j} = F_{i+\frac{1}{2},j}^H - f_{i+\frac{1}{2},j}^L, \quad (18a)$$

$$A_{i,j+\frac{1}{2}} = G_{i,j+\frac{1}{2}}^H - g_{i,j+\frac{1}{2}}^L. \quad (18b)$$

假定 $c_{i,j} > c_{i+1,j}$, 反扩散通量 $A_{i+\frac{1}{2},j}$ 的作用总是趋于增大 $c_{i,j}$, 而减小 $c_{i+1,j}$. 反扩散通量 $A_{i,j+\frac{1}{2}}$ 的作用与此类似. 这种效应与粘滞性的作用刚好相反, 粘滞性使数值解趋向比较均一。

如果把反扩散通量 $A_{i+\frac{1}{2},j}$ 和 $A_{i,j+\frac{1}{2}}$ 直接加到低阶通量中去并用它来解方程, 会使方程的解产生振荡. 为了消除这种振荡, 必须对反扩散通量加以校正 (限制). 具体做法如下:

$$\text{如果 } A_{i+\frac{1}{2},j} (c_{i+1,j}^L - c_{i,j}^L) < 0,$$

$$\text{或 } A_{i+\frac{1}{2},j} (c_{i+2,j}^L - c_{i+1,j}^L) < 0,$$

$$\text{或 } A_{i+\frac{1}{2},j} (c_{i,j}^L - c_{i-1,j}^L) < 0,$$

$$\text{那么, 反扩散通量 } A_{i+\frac{1}{2},j} = 0. \quad (19a)$$

同样地,

$$\text{如果 } A_{i,j+\frac{1}{2}} (c_{i,j+1}^L - c_{i,j}^L) < 0,$$

$$\begin{aligned} &\text{或 } A_{i,j+\frac{1}{2}}(c_{i,j+\frac{1}{2}}^t - c_{i,j+1}^t) < 0, \\ &\text{或 } A_{i,j+\frac{1}{2}}(c_{i,j}^t - c_{i,j-\frac{1}{2}}^t) < 0, \\ &\text{则反扩散通量 } A_{i,j+\frac{1}{2}} = 0. \end{aligned} \quad (19b)$$

在完成了上述情况下反扩散通量 $A_{i+\frac{1}{2},j}$ 和 $A_{i,j+\frac{1}{2}}$ 的校正后,还须对其他情况下的反扩散通量 $A_{i+\frac{1}{2},j}$ 和 $A_{i,j+\frac{1}{2}}$ 进行校正.校正后的反扩散通量为:

$$A_{i+\frac{1}{2},j}^c = \omega_{i+\frac{1}{2},j} A_{i+\frac{1}{2},j}, \quad 0 \leq \omega_{i+\frac{1}{2},j} \leq 1; \quad (20a)$$

$$A_{i,j+\frac{1}{2}}^c = \omega_{i,j+\frac{1}{2}} A_{i,j+\frac{1}{2}}, \quad 0 \leq \omega_{i,j+\frac{1}{2}} \leq 1. \quad (20b)$$

式中, $\omega_{i+\frac{1}{2},j}$ 和 $\omega_{i,j+\frac{1}{2}}$ 为校正因子,它们都是小于 1 的正数.

最后,用校正后的反扩散通量求得低阶中间浓度 $c_{i,j}^M$:

$$\begin{aligned} \theta_{i,j}^{n+1} c_{i,j}^M &= \theta_{i,j}^{n+1} c_{i,j}^t - (\Delta t / \Delta x)(A_{i+\frac{1}{2},j}^c - A_{i-\frac{1}{2},j}^c) - \\ &(\Delta t / \Delta z)(A_{i,j+\frac{1}{2}}^c - A_{i,j-\frac{1}{2}}^c). \end{aligned} \quad (21)$$

至此,FCT 算法就算完成了.

3 整个问题的解

当用(21)式求得中间值 $c_{i,j}^M$ 后,把 $c_{i,j}^M$ 代入(6)式,并结合其边界条件(7)式,用隐式差分解法即可求得 $c_{i,j}^{n+1}$,这样就完成了一个时段 Δt 的计算,连续进行下去,就可达到解得所指定的某一时刻 t 时的浓度的目的.

即在 x 方向:

$$\begin{aligned} &[(\theta_{i,j}^t c_{i,j}^t) - (\theta_{i,j}^n c_{i,j}^n)] / (\Delta t / 2) = \\ &[(\theta_{i+\frac{1}{2},j}^t D_{i+\frac{1}{2},j}^t)(c_{i+\frac{1}{2},j}^t - c_{i+\frac{1}{2},j}^n) - \\ &(\theta_{i+\frac{1}{2},j}^n D_{i+\frac{1}{2},j}^n)(c_{i+\frac{1}{2},j}^n - c_{i+\frac{1}{2},j}^t)] / (\Delta x)^2 + \\ &[(\theta_{i,j-\frac{1}{2}}^t D_{i,j-\frac{1}{2}}^t)(c_{i,j-\frac{1}{2}}^t - c_{i,j-\frac{1}{2}}^n) - \\ &(\theta_{i,j-\frac{1}{2}}^n D_{i,j-\frac{1}{2}}^n)(c_{i,j-\frac{1}{2}}^n - c_{i,j-\frac{1}{2}}^t)] / (\Delta z)^2 + \\ &[(\theta_{i,j}^{n+1} c_{i,j}^M) - (\theta_{i,j}^n c_{i,j}^n)] / \Delta t; \end{aligned} \quad (22)$$

在 z 方向上:

$$\begin{aligned} &[(\theta_{i,j}^{n+1} c_{i,j}^{n+1}) - (\theta_{i,j}^n c_{i,j}^n)] / (\Delta t / 2) = \\ &[(\theta_{i+\frac{1}{2},j}^t D_{i+\frac{1}{2},j}^t)(c_{i+\frac{1}{2},j}^t - c_{i+\frac{1}{2},j}^n) - \\ &(\theta_{i+\frac{1}{2},j}^n D_{i+\frac{1}{2},j}^n)(c_{i+\frac{1}{2},j}^n - c_{i+\frac{1}{2},j}^t)] / (\Delta x)^2 + \\ &[(\theta_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} D_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1})(c_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} - c_{i,j+\frac{1}{2}}^n) - \\ &(\theta_{i,j+\frac{1}{2}}^n D_{i,j+\frac{1}{2}}^n)(c_{i,j+\frac{1}{2}}^n - c_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1})] / (\Delta z)^2 + \\ &[(\theta_{i,j}^{n+1} c_{i,j}^M) - (\theta_{i,j}^n c_{i,j}^n)] / \Delta t. \end{aligned} \quad (23)$$

(22),(23)式都是三对角方程,可用追赶法求解.为了保持质量守恒,我们用 Kirkland 等^[5]提出的新通量迭代共轭梯度(flux-updating iterative conjugate gradient, FUCG)算法来求水体积分数,方法如下:

以压力形式表示的 Richards 方程可写为:

$$C \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k - k \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right). \quad (24)$$

用 FUCG 算法对(24)进行差分近似:

$$\begin{aligned} &\frac{C_{i,j}^n}{\Delta t} (h_{i,j}^* - h_{i,j}^n) - \frac{k_{i,j+\frac{1}{2}}^n}{(\Delta z)^2} (h_{i,j+1}^* - h_{i,j}^*) + \\ &\frac{k_{i,j-\frac{1}{2}}^n}{(\Delta z)^2} (h_{i,j}^* - h_{i,j-1}^*) - \frac{k_{i+\frac{1}{2},j}^n}{(\Delta x)^2} (h_{i+1,j}^* - h_{i,j}^*) + \\ &\frac{k_{i-\frac{1}{2},j}^n}{(\Delta x)^2} (h_{i,j}^* - h_{i,j-1}^*) = \left(\frac{k_{i,j+\frac{1}{2}}^n - k_{i,j-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} \right). \end{aligned} \quad (25)$$

式中, $C = \partial \theta / \partial h$ 为比水容量, h^* 是新的时间步长对 h 的估计.(25)式可用交替方向隐式差分法求解.

$h_{i,j}^*$ 求出后,通量用下列方程计算:

$$q_{x_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1}} = -\frac{k_{i-\frac{1}{2},j}^n}{\Delta x} (h_{i,j}^* - h_{i-1,j}^*); \quad (26)$$

$$q_{z_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1}} = k_{i,j-\frac{1}{2}}^n - \frac{k_{i,j-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} (h_{i,j}^* - h_{i,j-1}^*); \quad (27)$$

则水体积分数

$$\begin{aligned} \theta_{i,j}^{n+1} &= \theta_{i,j}^n - \Delta t \cdot \left(\frac{q_{x_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1}} - q_{x_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1}}}{\Delta x} \right) - \\ &\Delta t \cdot \left(\frac{q_{z_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1}} - q_{z_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1}}}{\Delta z} \right). \end{aligned} \quad (28)$$

4 数值例子

考虑 1 个 $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ 的垂向($X-Z$)土壤剖面,该土壤的非饱和水力传导率 $K(h)$ 适合 van Genuchten-Mualem 模型.模型中的参数 $K_s, \theta_s, \theta_r, \alpha$ 和 n 采用 Tseng 等^[6]给出的值,即 $K_s = 0.3 \text{ cm/min}, \theta_r = 0.05, \theta_s = 0.4, \alpha = 0.019, n = 1.59$.另外,土壤的初始水体积分数给定为: $\theta(x, z, 0) = 0.3$,弥散系数为 $D = 0.01 \text{ v}(\text{cm}^2/\text{min})$, v 为水分的运动速率.

假定在研究的土壤剖面顶部连续注入质量浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溶质 1 h,那么,水分和溶质运移问题的初边值边界条件分别为:

$$\begin{cases} \theta(x, z, 0) = 0.3; \\ q(x, 0, t) = 0.3 \text{ cm/min}, \quad t \leq 60 \text{ min}; \\ q(x, 0, t) = 0, \quad t > 60 \text{ min}; \\ q(0, z, t) = q(100, z, t) = q(x, 100, t) = 0; \\ q(x, z, t) \text{ 为水分通量.} \end{cases}$$

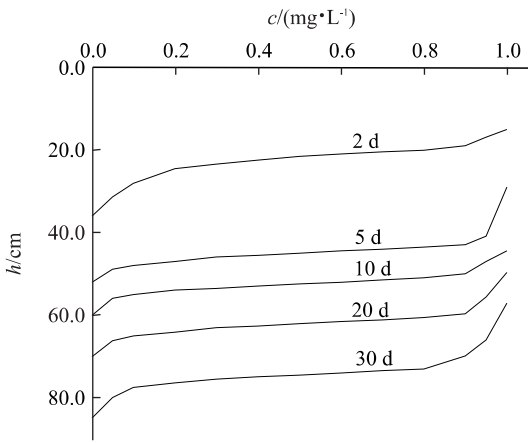


图 1 质量浓度随深度的变化曲线

Fig. 1 Variation curves of mass concentration with depth

$$\begin{cases} c(x, z, 0) = 0; \\ c(x, 0, t) = 1, & t \leq 60 \text{ min}; \\ c(x, 0, t) = 0, & t > 60 \text{ min}; \\ \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=100} = \left. \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=100} = 0. \end{cases}$$

取空间步长 $\Delta x = \Delta z = 10 \text{ cm}$, 时间步长 $\Delta t = 60 \text{ min}$, 用前面提到的方法解上述定解问题, 则在剖面的任一垂直方向上, 溶质随深度的变化如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 在 $t = 2 \text{ d}, 5 \text{ d}, 10 \text{ d}, 20 \text{ d}$ 和 30 d 的质量浓度锋面都近于陡立, 说明用 FCT 方法解非饱和土壤中溶质运移问题是可行的。

5 结论

用 FCT 算法解对流占优(大网格 Peclet 数)问题, 实质上是把原对流弥散问题分裂成对流和弥散二部分, 对流部分用 FCT 法模拟, 弥散部分用常规

的交替方向隐式差分法求解。在一个时段内, 用 FCT 法求出的浓度作为模拟弥散部分时的初值, 而解得弥散部分的值, 即为整个问题在该时段内的解。尽管推导 FCT 算法的过程比较烦琐, 但由于各式都是一些显式方程, 并不需要通过形成方程组来求解, 求解非常简单, 且容易编程, 提高了计算效率。数值例子表明 FCT 算法可有效地消除数值弥散和数值振荡。另外, 用 FUCG 方法解 Richards 方程, 得到水体积分数, 保持了质量守恒, 为下一步用 FCT 算法解对流弥散问题做了有效的保证。

参考文献:

- [1] Boris J P, Book D L. Flux-corrected transport. I: SHASTA, a fluid transport algorithms [J]. J Comput Phys, 1973, 11: 38—54.
- [2] Book D L, Boris J P. Flux-corrected transport. II: generalization of the method [J]. J Comput Phys, 1975, 18: 248—283.
- [3] Zalesak S T. Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluid [J]. J Comput Phys, 1978, 31: 335—362.
- [4] Hills R G, Fisher K A, Kirkland M R, et al. Application of flux-corrected transport to the Las Cruces Trench site [J]. Water Resour Res, 1994, 30(8): 2377—2385.
- [5] Kirkland M R, Hills R G, Wierenga P J. Algorithms for solving Richards' equation for variably saturated soils [J]. Water Resour Res, 1992, 28(8): 2049—2058.
- [6] Tseng P H, Jury W A. Comparison of transfer function and deterministic modeling of area-average solute transport in a heterogeneous field [J]. Water Resour Res, 1994, 30(7): 2051—2063.

FCT ALGORITHM FOR CONVECTION-DOMINATED SOLUTE TRANSPORT IN UNSATURATED SOIL

Xu Shaohui, Zhang Jiabao, Liu Jianli

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Convection-dispersion equation describing convection-dominated solute transport in unsaturated soil may be divided into two parts: convection and dispersion. They are resolved by the FCT (flux-corrected transport) algorithm and conventional alternate direction implicit finite difference method,

(下转 550 页)