

# 在蒸发条件下土壤水盐运动的 数值模拟

孙菽芬 姚德良 冀 伟

(中国科学院力学研究所)

**摘要** 本研究对土壤中水盐运动对流扩散方程进行了数值计算。利用省时的一阶精度的特征-分步法及使对流项作保留迎风特性的二阶精度的差分法,对在蒸发条件下土壤盐分向上运动积盐过程进行模拟。两个方法的计算结果与实验结果总体上都重合较好。

**关键词** 水盐运动、迎风二次型插值、特征-分步法

## 一、导 言

在自然界中,由于蒸发、蒸腾或者由于它们的联合作用而形成相当常见的表面积盐过程——盐渍化。土壤在表面形成盐分浓度较高且梯度也很大的积盐薄层,它类似一个有限薄厚度的峰面区。描述非饱和土壤中溶质运动是用对流扩散型方程。由于运动方程非线性及边界条件的复杂,一般只能采用数值解。常规数值方法有有限差分方法及有限元方法<sup>[2,3]</sup>。在对流项较小或者扩散项作用较大时(即 Peclet 数较小时),一般结果不会有太大问题,但当 Peclet 数较大时,由于处理对流项低阶格式可能出现伪扩散,以致令陡峭的峰面过快抹平;如果格式处理不妥,可能会造成峰面薄层模拟失真。为了研究这个现象,同时也为了研究不同精度格式对描述积盐过程的性能,本文采用了一般认为性能较好的特征线方法并结合分步法及二阶高精度的差分格式,对积盐过程中水盐运动进行了数值模拟,并与相应实验室的蒸发条件下土柱积盐过程作了对比,以说明两种差分格式不同点。

## 二、水盐运动数学模型

土壤中的水分由于表面蒸发而不断由下向上运动,则溶于水中的盐分也随之而向上运移,造成表面积盐过程。如忽略土壤温度及溶质对水的输运过程的影响,则土壤水分的输运方程可由以下方程给出:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (2.1 a)$$

本文 1988 年 2 月 3 日收到,1988 年 11 月 2 日收到修改稿。

$$q = K(\theta) - D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (2.1 \text{ b})$$

其中  $\theta$  为土壤的体积含水量,  $q$  为单位面积土壤水通量,  $K(\theta)$  和  $D(\theta)$  分别为土壤水分的导水度和扩散系数,  $z$  为深度, 方向向下为正。

作为土壤水的输运物质的盐分, 在忽略它在土壤中的化合与分解、溶解与沉淀及离子交换等影响时, 盐分的输运方程可写为:

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial t} + \frac{\partial q_c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_s(\theta, q) \cdot \theta \frac{\partial C}{\partial z} \right] \quad (2.2)$$

其中  $C$  为盐分在水中浓度,  $D_s(\theta, q)$  为扩散系数。

为了求解(2.1)及(2.2), 必须给出水分及盐分的边界条件及初始条件。

### 1. 水分运动的边界条件

$$\theta = \theta_b(z) \quad \text{或} \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = q_b(z) \quad (\text{在 } z = L_b, \text{ 底部}) \quad (2.3 \text{ a})$$

$$K(\theta) - D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} = -E \quad (\text{在 } z = 0, \text{ 表面}) \quad (2.3 \text{ b})$$

其中  $\theta_b$  在本研究中等于土壤饱和体积含水量  $\theta_s$ ,  $E$  为表面蒸发率,  $q_b$  为底部水分含量梯度值。

### 2. 盐分运移的边界条件在本模拟中取为

$$C = C_b \quad (z = L_b) \quad (2.4 \text{ a})$$

$$qC - D_s(\theta, q) \cdot \theta \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (C < C_s) \quad (2.4 \text{ b})$$

$$C = C_s \quad (C \geq C_s) \quad (2.4 \text{ c})$$

其中  $C_b$  为底部盐分浓度,  $C_s$  为饱和值。

### 3. 盐分及水分的初始条件为

$$\theta = \theta_0(z) \quad (2.5 \text{ a})$$

$$C = C_0(z) \quad (2.5 \text{ b})$$

当给定了  $K(\theta)$ ,  $D(\theta)$  及  $D_s(\theta, q)$ , 方程(2.1)–(2.5)构成了一组适定的求解问题。图 3 给出了本模拟的  $C_0(z)$ 。

## 三、数值方法

已有不少关于方程(2.1)及(2.3)的求解方法, 这里不详细说明。本文是为了模拟土壤表面积盐过程, 故重点描述盐分方程(2.2)和(2.4)的求解方法。当土壤含水量  $\theta(z, t)$  和水通量  $q(z, t)$  给定后, 方程(2.2)是一个线性变系数对流扩散方程。本文采用了两种不同的数值方法来求解: 具有二阶精度二次迎风插值差分隐格式及特征-分步差分格式。

### 1. 二次迎风插值差分隐格式<sup>[1]</sup>

若已知  $\theta_j^m$ ,  $q_{j+\frac{1}{2}}^m$  ( $j = 1, 2, \dots, K$ ,  $m = 0, 1, \dots, N$ ) 和  $C_j$  (其中  $m$  表示时间步,  $j$  为空间的格点数), 则:

$$\frac{(\theta C)_i^{n-1} - (\theta C)_i^n}{\Delta t} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\bar{f}_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - \bar{f}_{i-\frac{1}{2}}^{n+1}}{z_{i+\frac{1}{2}} - z_{i-\frac{1}{2}}} + \frac{\bar{f}_{i+\frac{1}{2}}^n - \bar{f}_{i-\frac{1}{2}}^n}{z_{i+\frac{1}{2}} - z_{i-\frac{1}{2}}} \right] \quad (3.1)$$

其中通量项  $\bar{f}$  中的对流项采用文献[1]中提出的二阶精度格式, 而扩散项采用中心差分格式, 也具有二阶精度, 如:

$$\begin{aligned} \bar{f}_{i+\frac{1}{2}}^n &= q_{i+\frac{1}{2}}^n \left[ \frac{1}{2} (C_i^n + C_{i+1}^n) - \frac{1}{8} (C_{i+1}^n - 2C_i^n + C_{i-1}^n) \right] \\ &\quad - (D_i \cdot \theta)_{i+\frac{1}{2}}^n \frac{C_{i+1}^n - C_i^n}{z_{i+1} - z_i} \end{aligned} \quad (3.2)$$

上标  $n$  为时间步指标.

取盐分扩散系数  $D_i(\theta, q)$  为:

$$D_i(\theta, q) = \alpha q / \theta + D_0 \quad (3.3 a)$$

则

$$(D_i \cdot \theta)_{i+\frac{1}{2}}^n = \alpha q_{i+\frac{1}{2}}^n + D_0 \frac{\theta_i^n + \theta_{i+1}^n}{2} \quad (3.3 b)$$

上式中  $\alpha, D_0$  分别为与土壤结构有关的常数. 方程(3.1)~(3.3)整理后可得

$$E_i C_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} + A_i C_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} + B_i C_i^{n+1} + F_i C_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} = D_i \quad (3.4)$$

方程(3.4)为一四对角方程组, 其求解法可采用高斯消去法, 或变形为:

$$A_i C_{i-\frac{1}{2}}^{(n+1)(m)} + B_i C_i^{(n+1)(m)} + F_i C_{i+\frac{1}{2}}^{(n+1)(m)} = D_i - E_i C_{i-\frac{1}{2}}^{(n+1)(m-1)} \quad (3.5)$$

可采用追赶法进行迭代求解, ( $m$ ) 为迭代次数.

### 2. 特征-分步差分方法

为了消除计算过程中的迭代, 并保持迎风效应特点, 我们提出另一种特征-分步方法,

将方程(2.2)分裂为

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \theta C}{\partial t} + \frac{\partial q C}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_i(\theta, q) \cdot \theta \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (3.7)$$

在已知  $C_i^n$  后, 求解  $C_i^{n+1}$  采用二步法. 首先, 从  $n$  到  $(n + \frac{1}{2})$  步, 用(3.6)求解对流效应, 然后从

$(n + \frac{1}{2})$  到  $(n + 1)$  步, 用(3.7)求解扩散效应.

将方程(3.6)变形为:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial z} + \zeta \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (3.8)$$

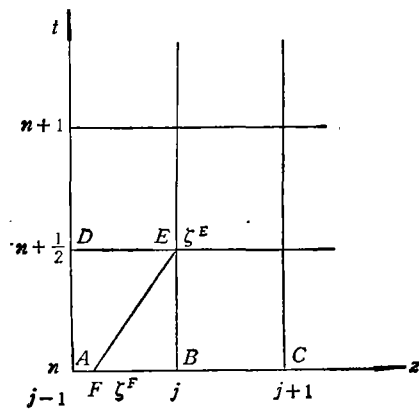


图1 网格示意图

其中  $\zeta = \theta C$ ,  $u = q/\theta$ .

沿方程(3.8)的特征线有:

$$\frac{dz}{dt} = 2u \quad (3.9 a)$$

$$\frac{1}{2} \frac{d\zeta}{dt} + \zeta \frac{du}{dz} = 0 \quad (3.9 \text{ b})$$

方程 (3.9 a) 为特征线方程, 可用来求解特征线。方程 (3.9 b) 为特征线上应满足的特征关系, 是求解  $(n + 1/2)$  时间步上各点(如图 1 中的 E 点值  $\zeta^E$ )的基本方程。由于  $u$  为  $(t, z)$  函数, 这里用有限分析法思想求解, 在网格内近似特征线 FE 为

$$\frac{dz}{dt} = 2\bar{u} \quad (3.10)$$

其中  $\bar{u}$  取上图 ABDE 区域中一个常值。

特征方程 (3.9 b) 成为:

$$1/2 \frac{d\zeta}{dt} + \zeta \frac{du}{dz} = 0 \quad (3.11)$$

在从  $n$  至  $(n + 1/2)$  的  $\Delta t$  步长中, 令  $t = \frac{1}{2} \Delta t \cdot \bar{t}$ , 并让  $\frac{\partial u}{\partial z}$  对时间作线性插值, 则有:

$$\frac{1}{\Delta t} \frac{d\zeta}{d\bar{t}} + \zeta \left[ \bar{t} \frac{\partial u^{n+1/2}}{\partial z} + (1 - \bar{t}) \frac{\partial u^n}{\partial z} \right] = 0 \quad \bar{t} \in [0, 1] \quad (3.12)$$

积分(3.12)得:

$$\ln(\zeta^E/\zeta^F) = -\Delta t \int_0^1 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^n + \bar{t} \left( \frac{\partial u^{n+1/2}}{\partial z} - \frac{\partial u^n}{\partial z} \right) \right] d\bar{t} \quad (3.13)$$

可以证明, 在一定条件满足下, 特征线法可具有二阶精度。在本文计算中, 鉴于分步法具有一阶精度, 所以下推导仅保证一阶精度。取:

$$\bar{u} = \frac{1}{2} (u_i^{n+1/2} + u^*) \quad (3.14)$$

$$\left. \begin{aligned} u^* &= \lambda u_{i-1}^n + (1 - \lambda) u_i^n \\ z^* &= \lambda z_{i-1} + (1 - \lambda) z_i \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

由方程(3.10), (3.14)及(3.15)得

$$\lambda = \frac{u_i^{n+1/2} + u_i^n}{2 \frac{(z_i - z_{i-1})}{\Delta t} + (u_i^n - u_{i-1}^n)} \quad (3.16)$$

对  $u^*$  和  $u^{n+1/2}$  采用 Lagrange 二阶精度插值公式, 代入(3.13), 并利用

$$z = z^* + \bar{u} \cdot \Delta t \cdot \bar{t} \quad (3.17)$$

得:

$$\zeta_i^E = \zeta_i^F \cdot \exp[-\Delta t(A_1 + B_1)] \quad (3.18)$$

其中  $A_1, B_1$  仅为已知  $u$  及坐标  $z$  的显函数。然后  $C_i^{n+1/2}$  可由:

$$C_i^{n+1/2} = \zeta_i^E / \theta_i^{n+1/2} \quad (3.19)$$

可得。

方程(3.7)可用 Crank-Nicolson 方法求解, 得

$$\frac{1}{2} \frac{(\theta C)_i^{n+1} - (\theta C)_i^{n+\frac{1}{2}}}{\frac{1}{2} \Delta t} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{z_{i+\frac{1}{2}} - z_{i-\frac{1}{2}}} \left[ (D_i \cdot \theta)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} \frac{C_{i+1}^{n+1} - C_i^{n+1}}{z_{i+1} - z_i} \right. \right. \\ \left. \left. - (D_i \cdot \theta)_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} \frac{C_i^{n+1} - C_{i-1}^{n+1}}{z_i - z_{i-1}} \right] + \frac{1}{z_{i+\frac{1}{2}} - z_{i-\frac{1}{2}}} \left[ (D_i \cdot \theta)_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \frac{C_{i+1}^{n+\frac{1}{2}} - C_i^{n+\frac{1}{2}}}{z_{i+1} - z_i} \right. \right. \\ \left. \left. - (D_i \cdot \theta)_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \frac{C_i^{n+\frac{1}{2}} - C_{i-1}^{n+\frac{1}{2}}}{z_i - z_{i-1}} \right] \right\} \quad (3.20)$$

简化整理后,得

$$A_i \cdot C_{i-1}^{n+1} + B_i C_i^{n+1} + E_i C_{i+1}^{n+1} = D_i \quad (3.21)$$

方程(3.21)可采用追赶法求解。

二个时间步的联合作用结果为:

$$C^{n+1} = L_2 L_1 C^n \quad (3.22)$$

其中  $L_1$  为特征算子,  $L_2$  为 Crank-Nicolson 算子。Yaneko<sup>[9]</sup> 已证明方程(3.22)的解收敛到原方程的真解,数值实验结果也说明了这一点。

#### 四、边界条件处理

为了更好地求解方程(2.3)及(2.4),网格安排及边界条件处理是十分重要的。由于表面

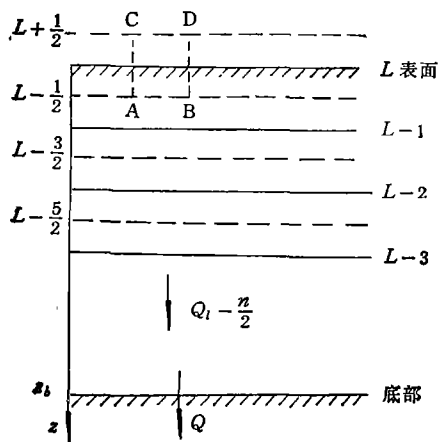


图 2 网格布置图

处含盐量大而且分布又陡,所以有必要在表面处加密网格,而在中间及下部可采用疏网格。在本计算中,二种差分格式都采用了相同的变网格步长安排。在表面处,边界条件处理要小心,在没有达到盐分饱和前,表面处应满足方程(4.1),即

$$Q = D_i(\theta, q) \cdot \theta \frac{\partial C}{\partial z} - qC = 0 \quad (4.1)$$

这是一个不稳定的边界条件,这种特殊的边界条件会给数值计算造成困难,处理不当会造成表面负浓度现象。本

文从保证总体盐分守恒的原则出发提出了不同的处理方法。

##### 1. 二阶精度的隐式差分格式

本计算中网格布置如图 2,二种计算都采用守恒格式,故在  $L, L-1, L-2, \dots$

等处求解盐分  $C_L, C_{L-1}, C_{L-2}, \dots$  值,而在  $L - \frac{1}{2}, L - \frac{3}{2}, \dots$  等处,给盐分通量值。

对于隐式差分格式,对图示单元  $ABCD$  进行积分得:

$$\int_{z_{L-\frac{1}{2}}}^{z_{L+\frac{1}{2}}} (\theta C)^{n+1} dz - \int_{z_{L-\frac{1}{2}}}^{z_{L+\frac{1}{2}}} (\theta C)^n dz = \int_{t^n}^{t^{n+1}} Q_{L+\frac{1}{2}} dt - \int_{t^n}^{t^{n+1}} Q_{L-\frac{1}{2}} dt \quad (4.2)$$

其中  $Q = qC - D_s(\theta, q) \cdot \theta \frac{\partial C}{\partial z}$ 。由于网格  $ABDC$  上半部中  $C \equiv 0$ , 且  $Q \equiv 0$ , 则方程(4.2)简化为:

$$\int_{z_{L-\frac{1}{2}}}^{z_L} (\theta C)^{n+1} dz - \int_{z_{L-\frac{1}{2}}}^{z_L} (\theta C)^n dz = \int_{t^n}^{t^{n+1}} Q_{L-\frac{1}{2}} dt \quad (4.3)$$

令  $\theta C = (\theta C)_L$  (在  $z \in [z_{L-\frac{1}{2}}, z_L]$ ) 及  $Q_{L-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (Q_{L-\frac{1}{2}}^n + Q_{L-\frac{1}{2}}^{n+1})$  (在  $t \in [t^n, t^{n+1}]$ ),

则得土壤表面点的相容条件:

$$\frac{(\theta C)_L^{n+1} - (\theta C)_L^n}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{[Q_{L-\frac{1}{2}}^{n+1} + Q_{L-\frac{1}{2}}^n]}{[z_L - z_{L-\frac{1}{2}}]} \quad (4.4)$$

## 2. 特征-分步法

由于采用算子分裂法, 将方程(2.3)的解算子分裂为两个算子。虽然两个算子的联合作用等价于原始方程的解算子, 但每个算子对应的方程均不是原方程, 故必须建立相容的边界条件与每个算子对应, 方程得出原初边值方程的解。

在特征线方法步中, 方程为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial \theta C}{\partial t} + \frac{\partial q C}{\partial z} &= 0 \quad (t \in [t^n, t^{n+\frac{1}{2}}]) \\ C &= C_0 \quad (z = L_b) \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

方程(4.5)求解只需一个边界条件即可, 所以不存在处理上边界条件困难。

在  $(n+1/2)\Delta t$  到  $(n+1)\Delta t$  步, 主要为扩散作用, 方程为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial \theta C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left( D_s(\theta, q) \cdot \theta \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\ D_s(\theta, q) \cdot \theta \frac{\partial C}{\partial z} - qC &= 0 \quad (z = 0) \quad (t \in [t^{n+\frac{1}{2}}, t^{n+1}]) \\ C &= C_b \quad (z = L_b) \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

边界条件(4.1)可用来推导表面盐分未达到饱和值  $C_s$  值之前的盐分浓度值。由于表面处,  $q/(D_s(\theta, q) \cdot \theta)$  值较大, 为使  $C$  在表面处值不出现负值, 若用差分格式,  $\Delta z$  必须足够小才行。为了克服此困难, 本文采用以下方法进行处理。当  $\Delta z^* = z_{L-1} - z_L$  足够小时, 认为方程(4.1)式在区域  $[z_{L-1}, z_L]$  内成立, 积分得:

$$C_p = C_{L-1} \cdot \exp \left[ \int_{z_p}^{z_{L-1}} \frac{q}{D_s \cdot \theta} dz \right] = C_{L-1} \cdot \exp [K^*(z_p - z_{L-1})] \quad (4.7)$$

$z_p \in [z_{L-1}, z_L]$

其中  $K^*$  的选取应从盐分总体守恒方程(4.8)给出

$$\int_0^{z_b} [(\theta C)^{n+1} - (\theta C)^n] dz = -Q_b \cdot \Delta t \quad (4.8)$$

其中  $Q_b$  为底部盐分通量。

### 五、数值结果及讨论

为了检验这两种计算方法功能,并比较它们之间的特点,本文用此两种方法对一土壤积盐过程的实验过程进行数值模拟。

模拟对象为实验室的土柱实验,土柱高 1 米,直径为 12 cm,底部水柱含盐量为 3 g/l,  $P_r$  值为 400—500。土柱实验给出土壤含水量及含盐量随高度及随时间的变化剖面,结果见表 1,模拟所需的含水量用表 2 值插值而得,而水通量  $q(z, t)$  可由 (2.1 a) 式用  $\theta(z, t)$  的插值结果算得,在已知  $\theta(z, t)$  及  $q(z, t)$  下,本研究对盐分变化作了十天的模拟。盐分扩散系数为表达式 (3.3 a) 中的系数,  $\alpha$  及  $D_0$  按文献[4]所给的方法而定,即

$$\alpha = 0.241 \text{cm}, D_0 = 0.000434 \text{cm}^2/\text{hr}$$

表 1 表面附近盐分浓度结果比较

时间(Date) 深度 (cm)		1 2 3 4 5 6 7 8 9								
		0.0	I	73.271	174.60	164.71	183.40	190.82	157.68	204.22
	II	115.38	109.80	127.22	137.16	128.48	147.06	169.32	168.48	148.60
0.2	I	53.378	79.018	82.965	86.845	91.094	97.168	95.926	105.51	109.27
	II	57.548	63.835	72.724	75.985	75.878	81.301	89.341	90.941	90.071
0.6	I	23.512	20.808	22.839	23.166	23.897	26.829	25.008	24.964	26.682
	II	37.337	32.589	30.151	30.765	32.418	31.806	32.799	34.923	36.641
2.0	I	8.5374	6.9019	6.7501	6.4252	6.1752	6.1861	5.8838	5.5560	5.4298
	II	7.7134	7.6684	7.4465	7.2504	7.3082	7.0611	7.7684	6.7083	6.7541
	III	9.9350	10.048	11.364	10.804	9.6760	12.676	16.258	14.010	12.794

注: I 二阶精度差分格式 II 特征-分步法 III 实验值  
盐分浓度单位: g/l

表 2 含水量的分布变化(测量值)(重量%)

时间(Date)		1 2 3 4 5 6 7 8 9								
5	深度(cm)	27.1	26.8	26.8	26.8	26.8	26.8	26.8	26.4	26.4
20		28.2	27.85	27.65	27.65	27.4	27.65	27.65	27.4	27.4
35		28.2	27.7	27.7	27.7	27.4	27.7	27.7	27.4	27.7
50		29.0	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.2
65		30.2	29.2	29.7	29.5	29.5	29.7	29.7	29.5	29.5
80		30.2	30.2	30.2	30.2	30.2	30.2	30.2	30.2	30.2

图 3 给出了两种方法模拟的结果,由图可见,二种计算方法结果总体上是相当接近的,

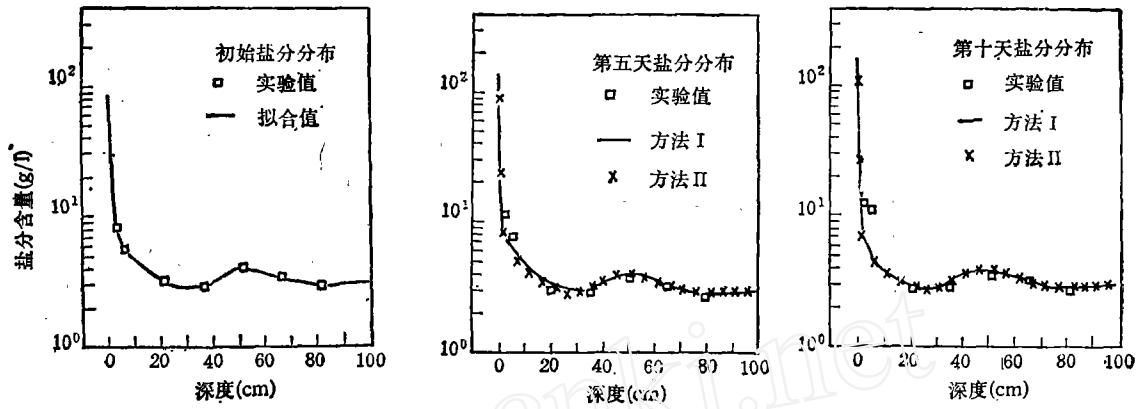


图 3 不同时刻[天]盐分随深度  $z$ (cm) 分布

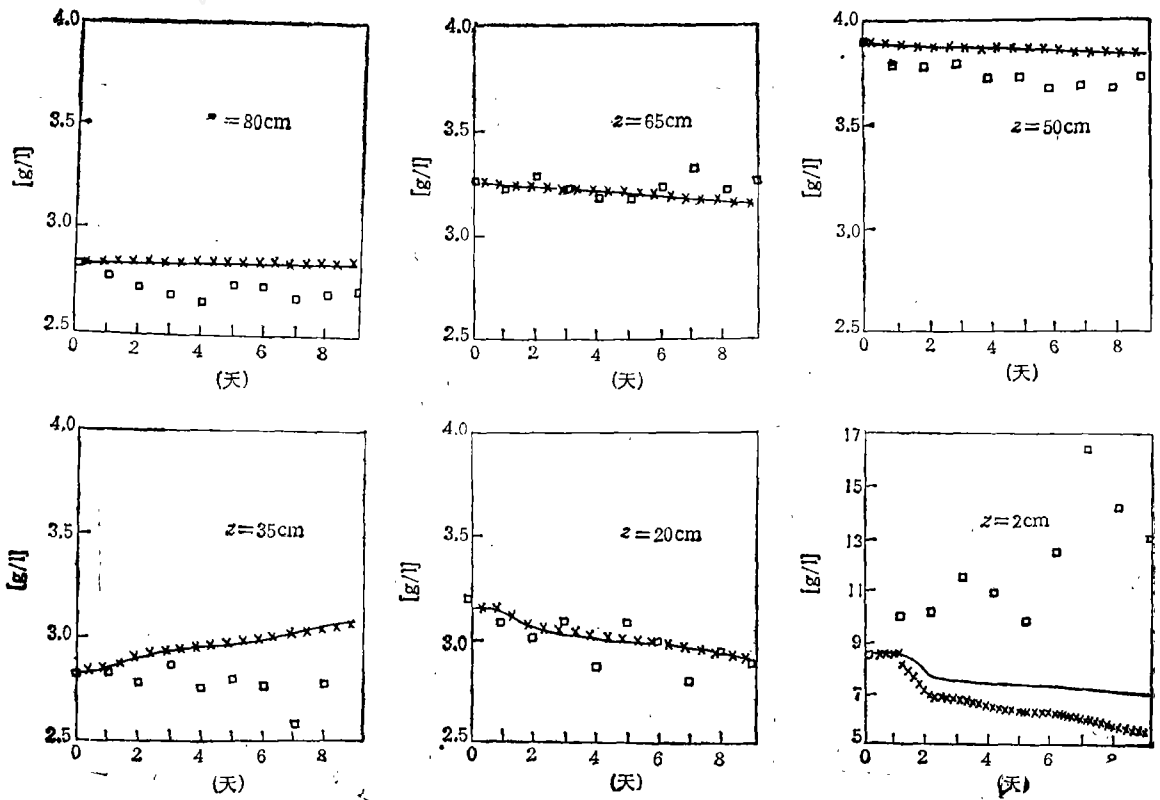


图 4 盐分在不同深度  $z$ (cm) 随时间[天]变化  
□实验值—方法 I ×方法 II

并且与实验结果也相当吻合。但在表面处,无论实验及计算结果,盐分浓度高且梯度大,实验值与计算值及两种计算值之间都有差别。

为了分析两种方法之间及它们与实验值间差别,图 4 给出不同深度处盐浓度的实验



值及二个方法的计算点,而表1则列举了在离表面不到2 cm处的薄层盐分迅速变化的实验及计算值。

从以上结果可以得到以下几点:

1. 在盐分变化不快的区域,一阶精度和二阶精度具有相同结果,并和实验值符合很好,这说明二种格式都是适用于预告盐分运动的,也说明一阶精度的差分格式所引起伪扩散并不严重,所以在盐分变化缓慢区域,用一阶精度格式是合适的。

2. 在盐分变化很迅速区域(如本计算例中表面积盐的薄层区域),不同精度格式会产生不同的结果,所以格式选取在变化急剧的区域必须十分慎重。虽然实验值与计算值在表面处有相当差别,但这并不能说明格式欠缺或者确定那种格式更好,这是因为实验点确定由于盐分传感器本身具有一厘米大小量级而产生较大误差,这点可由表1所列各层值来说明。由表1可以看出由于表面盐化很陡的梯度,离表面2 cm处的盐分实验值都介于二种计算在二个深度(离表面2 cm处及不到1 cm处)的计算值之间。从这一点来讲,加强表面点实测精度是十分重要的。另外,二个计算方法值都表现在表面处盐分迅速发展过程,但从其变化梯度来看,二阶精度差分格式给出了更陡的峰面区域,这可能是二阶精度不存在伪扩散现象的结果。总之,表面积盐过程是十分复杂的,但它又是盐渍化的重要表现,所以应该从实验上,现场测量上及计算模拟上加强研究。

感谢南京土壤所尤文瑞同志提供了宝贵的实验结果

### 参 考 文 献

- [1] Leonavd, B. P., A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation, *Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg.* (1979).
- [2] Wicvenga, P. J., Solute distribution profile computed with steady state and transient water movement model. *Soil Sci. Soc. Am. Proe.* 41: (1977), 1050—1055.
- [3] Yanenko, N. N., *The method of fractional steps*, Springer-Verlag, New York (1977).
- [4] 刘亚平, 稳定蒸发条件下土壤水盐运动的研究, 国际盐渍土改良学术讨论会文集, (1985).
- [5] 杨金忠, 饱和-非饱和土壤中水盐运动的理论与实验研究, 武汉水利电力学院博士论文详细摘要(1986).

## NUMERICAL SIMULATION OF SALT SOLUTE MOVEMENT IN SOIL UNDER EVAPORATION

Sun Shufen. Yao Deliang Ji Wei

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

**Abstract** A numerical simulation study of advection-diffusion equation is presented here for studying salt solute movement in soil. By using both less time consuming splitting method combined with characteristics and quadratic upstream interpolation difference scheme, the salt cumulation process at soil surface due to salt moving up under evaporation is simulated numerically. In general, the computational results from the methods agree with experiment results well.

**Key words** salt-solute movement, Quadratic upstream interpolation, splitting methods combined with characteristics