

# 干旱区绿洲棉田土壤水盐运动数值模拟\*

姚德良

李新

(中国科学院力学研究所, 北京 100080) (中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

**提 要** 本文中利用预报校正法求解土壤水分运动的  $h$  型 Richards 方程。同时利用具有二阶高精度的差分法求解土壤盐分运移的对流扩散方程, 此格式可避免利用一般差分格式时出现的数值弥散问题。最后, 将上述数学模型对干旱区绿洲棉田, 在蒸发条件下土壤水分运动和土壤盐分向上运动积累过程进行数值模拟, 计算结果与测量值吻合较好。可为预报土壤盐碱化提供科学依据。

**关键词** 绿洲棉田 水盐运动 预报校正法 迎风二次型插值 数值模拟

## 1 引 言

土壤水盐运动的研究对于盐碱地改良有很大的经济价值。我国有大面积盐碱地, 主要分布在北方十几个省内, 据初步统计, 盐碱地面积共约 2 670 万  $\text{hm}^2$ , 其中盐碱耕地面积约有 670 万  $\text{hm}^2$ 。在盐碱化地区, 土壤中含有大量盐分, 土壤水浓度高, 渗透压力大, 使作物吸水困难。另一方面盐分对农作物有直接毒害作用, 影响农作物产量的提高。

对于盐碱地改良和防治问题, 主要研究水盐在土壤表层的运移特征。由各种措施, 使农作物生长的土层中含盐量保持在一定的限度之内, 这就需要研究土壤中水盐在蒸发、入渗条件下的运移过程以及分布规律。目前对于盐分在非饱和土层中运动规律的研究, 还远不能满足生产实际问题的需要, 必须在已有研究成果和生产经验的基础上, 对盐分运移理论作进一步的探讨和研究, 并紧密结合土壤盐碱化的防治, 研究盐分在冲洗改良过程中的运移规律及水盐动态的预测、预报方法, 为合理地确定土壤盐碱化防治措施和田间水管理提供科学依据。

描述非饱和土壤中水盐运动的基本方程是对流扩散方程。由于运动方程的非线性和边界条件的复杂性, 一般只能采用数值解, 常规数值方法有有限差分法及有限元素法<sup>[1,2]</sup>。在对流项较小或扩散项作用较大时, 一般结果不会有太大问题, 但是当对流项大于扩散项很多时, 由于处理对流项低阶格式出现伪扩散现象, 以致使陡峭的峰面过快抹平, 如果格式处理不妥, 会造成峰面薄层模拟失真, 为了减轻数值弥散的影响, 本文采用了一般认为性能较好的二阶高精度的差分格式, 对新疆塔里木盆地棉田, 先进行灌水, 而后在蒸发条件下的土壤水盐运动进行了数值模拟。模拟值与实测值吻合较好。

\* 国家自然科学基金项目 49471005 成果之一。  
收稿日期: 98-04-02

## 2 土壤水盐运动数学模型

棉田土壤中的水分由于表面蒸发和根系吸水而不断由下向上运动,则溶于水中的盐分也随之向上运移,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,同时考虑作物根系吸水因素及土壤的非均质性,由质量守恒原理可得到土壤水分的输运的 h 型 Richards 方程:

$$\begin{cases} C(h) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = S(z, t) \\ q = k(h) - k(h) \frac{\partial h}{\partial z} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $h$  为土壤毛细管压力(等于负的土壤吸力),  $C(h) = d\theta/dh$  为土壤比水容量,  $\theta$  为土壤含水量,  $q$  为土壤水通量,  $k(h)$  为土壤导水率,  $S(z, t)$  为源汇项,此处作为作物根系吸水率。 $z$  为深度,方向向下为正。

植物根系的分布取对数函数或双曲线函数<sup>[3,4]</sup>,文献[3]详细给出了多种植物不同时期根系的对数函数  $S(z, t)$  的表达形式也是多种多样<sup>[5,6]</sup>,它不但与根系的分布函数有关,而且与土壤的水分含量或土壤的水势有关。本文采用:

$$\begin{cases} S(z, t) = \frac{E(t)L(z)f(h)}{L_r} \\ \int_0^z L(z)f(h)dz \\ f(h) = \begin{cases} 0 & h < h_w \\ \left(\frac{h_w - h}{h_w - h_f}\right)^2 & h_w \leq h \leq h_f \\ 1 & h > h_f \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $E(t)$  为作物通过叶面的蒸腾量,  $L(z)$  为根系分布函数,  $f(h)$  为与土壤对根系吸水阻力有关的函数,  $h_w$  和  $h_f$  分别表示凋萎含水量和田间持水量所对应的负压水头,  $L_r$  为根系达到的最大深度。

作为土壤水的运输物质的盐分,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,盐分的输运方程为深质运移的对流-扩散型方程,为:

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_s(\theta, q) \theta \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \frac{\partial(qc)}{\partial z} \quad (3)$$

式中  $C$  为盐分在水中的浓度,  $D_s(\theta q)$  为扩散系统数,  $q$  为土壤水通量。

为了求解方程(1)和(3),现给出它们在蒸发条件下的初始条件和边界条件。

(1)水分运动的初边值条件

$$\begin{cases} k(h) - k(h) \frac{\partial h}{\partial z} = -E(z=0) \\ h = 0 & (z = L_r) \\ h = h_0(z) & (t = 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中  $E$  为表面蒸发率, 下边界取第一类边界条件, 即负压水头为零,  $L_r$  为底部深度。

(2) 盐分运移的初边值条件

$$\begin{cases} \left. \begin{aligned} q_c - D_s(\theta, q)\theta \frac{\partial c}{\partial z} = 0 & (c < c_s) \\ c = c_s & (c \geq c_s) \end{aligned} \right\} (z = 0) \\ c = c_b & (z = L_r) \\ c = c_0(z) & (t = 0) \end{cases} \quad (5)$$

式中  $C_s$  为盐分浓度饱和值,  $c_b$  为底部盐分浓度,  $C_0(z)$  为初始盐分浓度。

当给定了  $k(h)$  和  $D_s(\theta, q)$ , 方程(1)~(5)构成了一组适定的求解问题。

### 3 土壤水盐运动方程的差分格式

土壤水分运动方程采用预报校正法, 先用中心差分格式给出  $n+1$  层上预报公式, 求出土壤负压水头的预报值  $h^{n+1}$ , 再用同样的中心差分格式给出  $n+1$  层上的校正公式, 计算出土壤负压水头的校正值  $h_j^{n+1}$ 。差分格式为:

$$C_j^{n+\frac{1}{2}} \frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\Delta t_n} = -\frac{2}{z_{j+1} - z_j} \left[ (k_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - k_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - k_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + k_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + S_j^{n+\frac{1}{2}} \right] \quad (6)$$

$$\text{其中 } \left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2(z_{j+1} - z_j)} (h_{j+1}^{n+1} - h_j^{n+1} + h_{j+1}^n - h_j^n) \quad (7)$$

$$k_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \begin{cases} \frac{1}{2}(k_j^{n+\frac{1}{2}} + k_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}) & z_{j+\frac{1}{2}} \text{ 不在土壤分层界面上} \\ \frac{2k_j^{n+\frac{1}{2}} k_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}}{k_j^{n+\frac{1}{2}} + k_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}} & z_{j+\frac{1}{2}} \text{ 在土壤分层界面上} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \text{预报: } h_j^{n+\frac{1}{2}} = \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta t_n}{\Delta t_n}\right) h_j^n - \frac{1}{2} \frac{\Delta t_n}{\Delta t_{n-1}} h_j^{n-1} \\ \text{校正: } h_j^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (h_{j,\text{预}}^{n+1} + h_j^n) \end{cases} \quad (9)$$

将式(6)、(7)、(8)代入式(1)得:

$$A_j h_{j-1}^{n+1} + B_j h_j^{n+1} + E_j h_{j+1}^{n+1} = F_j \quad j = 1, 2, \dots, k-1 \quad (10)$$

其中式(10)是三对角型方程组,可用追赶法求解。利用已知的初始和边界条件,便可得出各时间各结点的负压水头,再由  $C(h) = d\theta/dh$ , 最后求出土壤含水量的值。

关于盐分方程(3)的求解方法如下:当土壤含水量  $\theta(z, t)$  和水通量  $q(z, t)$  给定后,方程(3)是一个线性变系数对流扩散方程。本文采用具有二阶精度二次迎风插值差分隐式格式<sup>(1)</sup>。若已知  $\theta_j^n, q_{j+\frac{1}{2}}^n (j = 1, 2, \dots, k, n = 0, 1, \dots, M)$  和  $c_j$ , 其中  $n$  表示时间步,  $j$  为空间的格点数,则:

$$\frac{(\theta c)_j^{n+1} - (\theta c)_j^n}{\Delta t} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\bar{f}_{j+\frac{1}{2}}^{n+1} - \bar{f}_{j-\frac{1}{2}}^{n+1}}{z_{j+\frac{1}{2}} - z_{j-\frac{1}{2}}} + \frac{\bar{f}_{j+\frac{1}{2}}^n - \bar{f}_{j-\frac{1}{2}}^n}{z_{j+\frac{1}{2}} - z_{j-\frac{1}{2}}} \right] \quad (11)$$

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:

$$\bar{f}_{j+\frac{1}{2}}^n = q_{j+\frac{1}{2}}^n \left[ \frac{1}{2}(c_j^n + c_{j+1}^n) - \frac{1}{8}(c_{j+1}^n - 2c_j^n + c_{j-1}^n) \right] - (D_s \cdot \theta)_{j+\frac{1}{2}}^n \frac{c_{j+1}^n - c_j^n}{z_{j+1} - z_j} \quad (12)$$

取盐分扩散系数  $D_s(\theta, q)$  为:

$$D_s(\theta, q) = \alpha q / \theta + D_0 \quad (13)$$

$$\text{则} \quad (D_s \cdot \theta)_{j+\frac{1}{2}}^n = \alpha q_{j+\frac{1}{2}}^n + D_0 \frac{\theta_j^n + \theta_{j+1}^{n+1}}{2} \quad (14)$$

上式中  $\alpha, D_0$  分别为与土壤结构有关的常数。方程(11)~(14)整理后可得:

$$E_j c_{j-2}^{n+1} + A_j c_{j-1}^{n+1} + B_j c_j^{n+1} + F_j c_{j+1}^{n+1} = D_j \quad (15)$$

方程(15)为一四对角方程组,可用高斯消去法求解,或变形为:

$$A_j c_{j-1}^{(n+1)(m)} + B_j c_j^{(n+1)(m)} + F_j c_{j+1}^{(n+1)(m)} = D_j - E_j c_{j-2}^{(n+1)(m-1)} \quad (15)$$

可采用追赶法进行迭代求解,  $m$  为迭代次数。

为了更好地求解方程(3)和(5),网格安排和边界条件处理是十分重要的。由于土壤表面含盐量大而且分布陡,所以有必要在表面处加密网络,而在中间及下部采用疏网格。本文中采用了变网格步长安排,由底部向表面网格逐渐加密。在表面处的边界处理要特别注意,

在没有达到盐分饱和前, 表面处应满足下面的方程:

$$D_s(\theta, q)\theta \frac{\partial c}{\partial z} - qc = 0 \quad (16)$$

表面盐分含量大并且梯度陡的特点会给边界条件处理带来困难, 处理不好会产生盐分总体不守恒以及盐分浓度可能变为负值等不合理现象。

本文从保证总体盐分守恒的原则出发, 计算中网格布置采用了守恒格式, 假定表面用  $L$  表示, 在  $L, L-1, L-2, \dots$  等处求解盐分浓度  $c_L, c_{L-1}, c_{L-2}, \dots$  的值, 而在  $L-1/2, L-3/2, \dots$  等处给盐分的通量值。

#### 4 现场观测

塔里木盆地是中国最干旱的地区之一。试验点位于塔里木盆地北部平原绿洲农业区内, 那里水分缺乏, 蒸发强烈, 多年平均降水量 44.7mm, 年太阳辐射总量为 6 000MJ/m<sup>2</sup>。该地区是我国重要的棉花生产区, 农业全部依靠灌溉。试验地原始土壤为荒漠盐土, 质地为中壤, 平均容重 1.4g/m<sup>3</sup>, 由于开垦前是阿克苏河的冲积平原荒漠区, 土壤空间分布具有非均质性, 相对不透水的淤泥层和沙土层呈不规则的斑状分布于不同深度的土壤中, 使得土壤水分运动比较复杂。试验点农田地下水位在灌溉季节为 1.5~2.0m, 灌溉前后地下水位变幅为 0.3~0.5m。

试验地点选择在阿克苏水平衡试验场的棉田里, 试验时间为 1996 年 8 月 7 日至 8 月 22 日, 棉花处在开花—孕蕾期。棉田在 8 月 4 日开始灌水, 8 月 6 日灌水结束, 地表积水消失。观测项目有: 净辐射、总辐射、反射辐射、土壤热通量、农作物冠层上方 0.5m 和 1.5m 处干湿球温度以及不同深度的土壤水分含量和土壤盐分浓度。观测方法: 对于辐射、温度和土壤热通量等能量参数利用自动采集器进行 5 分钟一次的连续测定, 土壤水分观测分别利用中子水分仪监测和烘干法测定, 每天上午观测一次, 土壤盐分利用取土法在实验室进行分析。表 1 和表 2 分别给出了灌溉前后棉田土壤重量含水量观测值和土壤盐分浓度观测值。

表 1 1996 年 8 月灌溉前后棉田土壤重量含水量值(%)

Tab.1 Water content in cotton field soil before and after irrigation in August, 1996

深度(cm)	日 期								
	4 日	9 日	10 日	11 日	12 日	13 日	14 日	15 日	19 日
5	15.98	26.36	22.21	20.54	21.27	21.13	18.45	17.52	19.89
20	16.88	25.15	20.77	20.04	19.41	20.08	19.65	20.00	20.01
35	14.14	24.06	21.51	22.62	22.06	22.12	21.76	22.44	20.04
50	21.81	23.39	24.86	23.63	22.73	22.21	21.89	21.61	20.71
65	19.17	24.94	25.96	23.17	21.19	22.34	21.43	23.91	22.11
80	20.94	26.27	21.96	22.44	22.72	22.74	23.56	20.96	21.41
100	21.06	27.30	21.79	22.16	22.53	21.49	21.27	23.32	19.98

表 2 1996 年 8 月灌溉前后棉田土壤盐分浓度(g/kg)

Tab.2 Salt concentration in cotton field soil before and after irrigation in August, 1996

深度(cm)	日 期								
	4 日	9 日	10 日	11 日	12 日	13 日	14 日	15 日	19 日
5	1.82	1.24	1.25	2.08	0.44	0.64	1.28	2.04	0.57
20	1.50	1.14	0.76	3.27	0.31	1.24	0.83	3.30	0.94
35	0.32	0.22	0.17	1.05	1.01	0.30	2.68	0.19	1.69
50	0.22	0.29	0.18	0.24	0.18	0.21	0.17	0.14	0.38
65	0.18	0.39	0.12	0.17	0.16	0.15	0.15	0.34	0.15
80	0.14	0.13	0.10	0.16	0.12	0.15	0.12	0.10	0.13
100	0.12	0.11	0.14	0.11	0.09	0.13	0.10	0.09	0.11

## 5 结果讨论

运用上述模型,对新疆塔里木盆地阿克苏地区绿洲棉田的土壤水盐运动进行了数值模拟。模拟对象选择在阿克苏水平衡试验场的棉田里,模拟所需的含水量用表 1 的测量值插值而得,也可用方程 1 和方程 4 模拟所得的土壤含水量插值所得,图 1 和图 2 分别给出了第 5 天和第 10 天土壤重量含水量的模拟值与观测值比较图形,图中实线和圆点各表示模拟值与观测值。由图可见,计算值与测量值较接近。试验和计算结果表明<sup>[7]</sup>,棉田土壤分布具有空间变异,土壤水分运移既有垂直运动,又有侧向水平运动。垂直运动是由于蒸散和

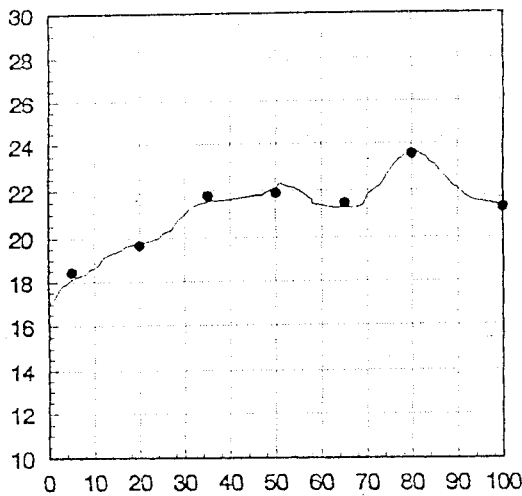


图 1 第 5 天土壤重量含水量沿深度的分布  
横坐标:深度(cm),纵坐标:土壤重量含水量(%)

Fig.1 Water content distribution with depths on the fifth day

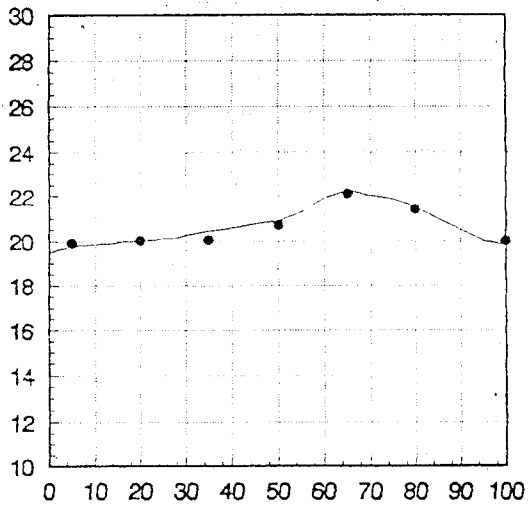


图 2 第 10 天土壤重量含水量沿深度的分布  
横坐标:深度(cm),纵坐标:土壤重量含水量(%)

Fig.2 Water content distribution with depths on the tenth day

入渗作用,是持续的土壤水分运动,是土壤水分运动的主体;侧向水平运动只存在于局部地点的某些时段,造成土壤水分侧向水平移动的重要原因是土壤的非均质性、灌溉的非均匀性以及蒸散的非均匀性。同时,棉田主要根系活动层(20~50cm)土壤水分储量变幅大于其它

层土壤,其含水量相对较少。灌水后的几天根系层土壤水分散失比上下层都快,这种现象更加明显,随着土壤水分储量的减少,这种现象逐渐削弱。在扬花—孕蕾期,由于棉田蒸腾强度大,主要根系活动层土壤含水量低于上下层土壤,经常出现上下层土壤水分均向根系层运移的现象。水通量  $q(z, t)$  可由方程(1)计算,在已知  $\theta(z, t)$  和  $q(z, t)$  的情况下,本文对土壤盐分变化也作了十天数值模拟,盐分扩散系数表达式(13)中的系数  $\alpha$  和  $D \setminus - 0$  按文献[8]所给的方法而定,即  $\alpha = 0.241\text{cm}$ ,  $D_0 = 0.0043\text{cm}^2/\text{h}$ 。

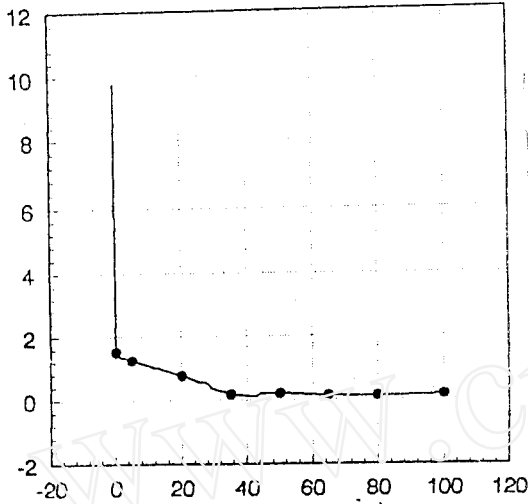


图3 第1天盐分随深度的分布  
横坐标:深度(cm),纵坐标:盐分含量(g/kg)

Fig.3 Salt distribution with depths  
on the first day

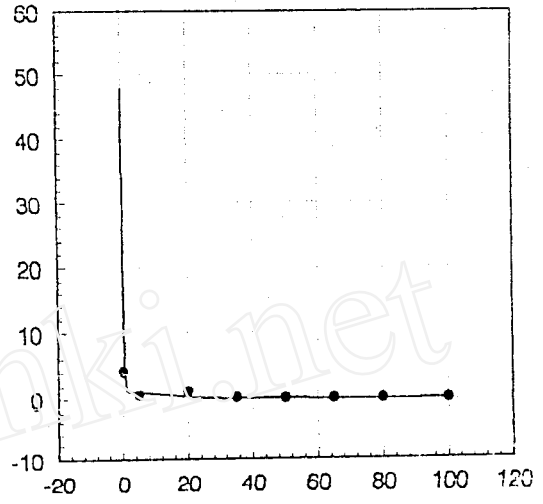


图4 第4天盐分随深度的分布  
横坐标:深度(cm),纵坐标:盐分含量(g/kg)

Fig.2 Salt distribution with depths  
on the fourth day

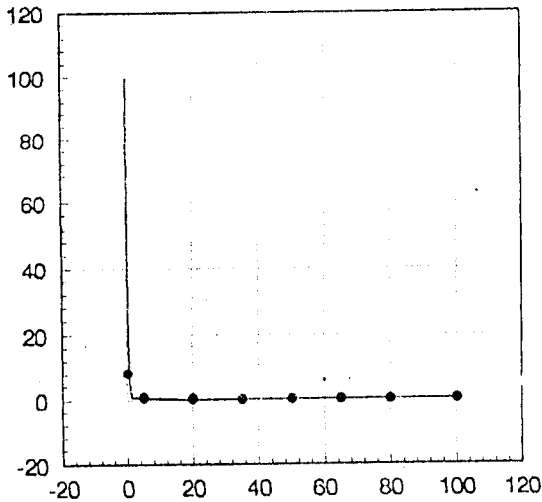


图5 第7天盐分随深度的分布  
横坐标:深度(cm),纵坐标:盐分含量(g/kg)

Fig.5 Salt distribution with depths  
on the seventh day

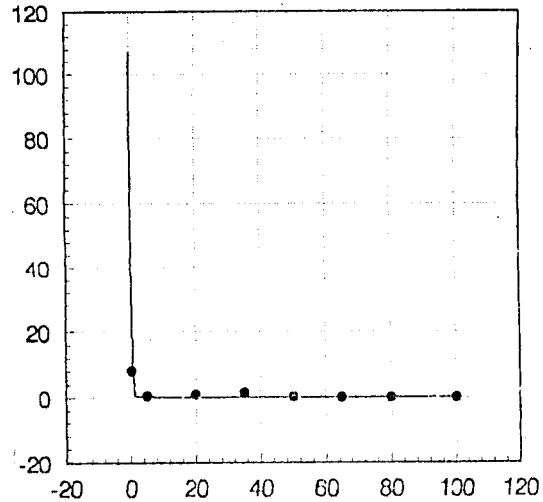


图6 第10天盐分随深度的分布  
横坐标:深度(cm),纵坐标:盐分含量(g/kg)

Fig.6 Salt distribution with depths  
on the tenth day

图 3、图 4、图 5 和图 6 分别给出了第 1 天、第 4 天、第 7 天和第 10 天的棉田土壤盐分在蒸发条件下的模拟结果,图中实线和圆点分别表示数值计算结果和实测数据。由图可见,计算结果与实测值符合较好。在土壤表面处,由于盐分浓度高并且梯度大,计算值与实测值有一些差别,但由文献[7]可知,在 1.75m 埋深潜水蒸发筒,表层 5cm 处含盐量为 116.75g/kg,而 20cm 处只有 16.39g/kg,表层是 20cm 处的 7 倍,所以表层盐分浓度的计算值符合实际情况。表 3 给出了表面至 2cm 处的薄层盐分迅速变化的计算值。上面结果说明在盐分变化不快的区域,具有二阶高精度的模拟值和观测值符合很好,这种格式适合于预测土壤盐分运动。在盐分变化很迅速的土壤表层,二阶高精度差分格式由于不存在伪扩散现象的结果,所以给出较陡的峰面区域。总之,本文土壤水盐运动方程和差分格式,能较好地反应实际情况,能用于预测棉田土壤水盐运动的运行规律。

表 3 1996 年 8 月地表附近盐分浓度模拟值(g/kg)

Tab.3 Simulated values of salt concentration in surface layer in August, 1996

深度 (cm)	日 期									
	10 日	11 日	12 日	13 日	14 日	15 日	16 日	17 日	18 日	19 日
0.0	9.79	29.83	42.17	47.98	70.04	90.76	99.66	102.97	105.40	107.05
0.2	1.67	12.86	10.55	21.37	30.57	39.71	43.38	44.91	45.98	46.67
0.6	1.55	3.14	4.05	4.62	5.97	7.60	8.07	8.35	8.46	8.50
1.2	1.37	1.28	1.21	1.20	1.09	1.10	0.98	0.92	0.82	0.70
2.0	1.35	1.21	1.10	1.06	0.94	0.87	0.76	0.66	0.55	0.43

## 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] 雷志栋等. 土壤水动力学, 清华大学出版社, 1988.
- [3] Germitza and Page E R. An expirical mathematical model to describe plant root system. J. Appl. Ecol., 1974, 11(2): 773~781.
- [4] 卢振民等. 土壤—植物—大气系统(SPAC)水流动态模拟与实验研究—冬小麦根垂直分布. 农田作物环境实验研究. 北京: 气象出版社, 1990. 256~267.
- [5] Molz F J. Models of water transport in the soil - plant system: a review. Water Resource Res., 1981, 17(5): 1245~1260.
- [6] 邵明安. 植物根系吸收土壤水分的数学模型. 土壤学报, 1987, 24(4): 295~305.
- [7] 周宏飞, 李彦. 绿洲棉田蒸散与土壤水热状况关系分析. 干旱区地理, 1996, 19(4): 60~67.
- [8] 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.



# NUMERICAL SIMULATION OF MOISTURE – SALT TRANSPORT IN COTTON FIELD SOIL IN THE OASES, ARID AREAS

Yao Deliang

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Li Xin

(*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*)

## Abstract

The research on soil moisture-salt transport has a great economic value for improving saline-alkaline land. According to the primary statistical results, the total area of saline-alkaline land in China is about 26.7 million ha., in which the area of cultivated saline alkaline land occupies about 6.7 million ha. It is the main subject for improving saline-alkaline land to research the transport features of moisture-salt in surface soil layer. However, the available research results of moisture-salt transport in unsaturated soil are far inferior to solving the practical problems in agricultural production. In this paper, forecast-correction method is applied to solve the h form of Richards equation for soil moisture transport, and quadratic differential method is used to solve the convection-diffusion equation for salt transport in soil. Which can avoid the numerical dispersion. Finally, this mathematical model is used to simulate moisture-salt transport in cotton field soil in the oases, arid areas under the condition of evaporation. There is a good agreement between the calculated results and the measured data. The equation of soil moisture-salt transport and the differential pattern can ideally reflect the practical situation, and can be used for forecasting the transport law of moisture-salt in cotton field soil in arid areas.

**Key words:** cotton field in oasis; moisture-salt transport; forecast-correction method; windward quadratic interpolation; numerical simulation.