

文章编号:1000-694X(2001)03-0286-05

# 土壤水盐运动模式研究及其在干旱区农田的应用

姚德良<sup>1,2</sup>, 朱进生<sup>1</sup>, 谢正桐<sup>1</sup>, 李新荣<sup>2</sup>, 张景光<sup>2</sup>, 刘立超<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠试验研究站, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 采用预估校正法求解土壤水分运动的 h 型 Richards 方程, 此方法可以控制一定的迭代步数, 但同样可达到二阶精度。同时采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, 此格式可避免采用一般差分格式时出现的数值弥散问题。并将上述数学模式对干旱区绿洲棉田, 在蒸散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, 模拟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; 预估校正法; 迎风二次型插值; 数值模拟

**中图分类号:** S154.4      **文献标识码:** A

我国有大面积盐碱地, 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  $\text{hm}^2$ , 特别是在干旱地区有许多盐碱荒地和盐碱农田。土壤水盐运动的研究对于盐碱地改良有很大的经济价值。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。借助各种措施, 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分管理提供科学依据。

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, 以致使陡削的峰面过快抹平, 如果格式处理不妥, 可能会造成峰面薄层模拟失真, 为了减轻数值弥散的影响, 本文采用了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, 而后在蒸散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。

## 1 土壤水盐运动数学模型

棉田土壤中的水分由于表面蒸散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);  $C(h) = d/dh$  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分布。根系吸水函数  $S(z, t)$  的表达式有各种形式<sup>[5,6]</sup>, 它不但与根的分函数有关, 而且与土壤的水分含量或土壤的水势有关。本文为

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

收稿日期: 2000-12-15; 改回日期: 2001-02-13

基金项目: 中国科学院沙坡头沙漠试验研究站基金(200007); 国家自然科学基金(19832060, 40071007)

作者简介: 姚德良(1943—), 男(汉族), 浙江慈溪人, 研究员, 主要从事陆面过程模式研究。



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。

作为土壤水分运输物质的盐分,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,盐分的运输方程为溶质运移的对流-扩散型方程,即为:

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

式中:  $c$  为盐分在水中的浓度;  $D_s(c, q)$  为扩散系数;  $q$  为土壤水通量。

为了求解方程(1)和(3),现给出它们在蒸散条件下的初始条件和边界条件。

(1) 水分运动的初、边值条件

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

式中:  $E_p$  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

$$\begin{cases} qc - D_s(c, q) \frac{\partial c}{\partial z} = 0 & (c < c_s) \\ c = c_s \\ c = c_b & (z = L_r) \\ c = c_0(z) & (t = 0) \end{cases} \quad (z = 0) \quad (5)$$

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  $D_s(c, q)$ , 方程(1)~(5)构成了一组适定的求解问题。

## 2 土壤水盐运动方程的差分格式

土壤水分运动方程采用预估校正方法,先用中心差分格式给出  $n+1$  层上预估公式,求出土壤负压水头的预估值  $h_{j+\frac{1}{2}}^{n+1}$ ,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:

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

其中

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

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

$$\begin{cases} \text{预估: } h_j^{n+\frac{1}{2}} = \left(1 + \frac{1}{2} \frac{t_n}{t_{n-1}}\right) h_j^n - \frac{1}{2} \frac{t_n}{t_{n-1}} h_j^{n-1} \\ \text{校正: } h_j^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (h_j^{n+\frac{1}{2}} + h_j) \end{cases} \quad (9)$$

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  $C(h) = d/dh$ ,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  $(z, t)$  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>求解。

若已知  ${}^n_j, q_{j+\frac{1}{2}}^n (j = 1, 2, \dots, K; n = 0, 1, \dots, M)$  和  $c_j$ , 其中  $n$  表示时间步,  $j$  为空间的格点数, 则:

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

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:

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

取盐分扩散系数  $D_s(c, q)$  为:

$$D_s(c, q) = q' + D_0 \quad (13)$$

则

$$(D_s \cdot)_{j+\frac{1}{2}}^n = q_{j+\frac{1}{2}}^n + D_0 \frac{q_j^n + q_{j+1}^n}{2} \quad (14)$$

上式中的  $q, D_0$  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:

$$A_j c_{j-1}^{(n+1)(m)} + B_j c_j^{(n+1)(m)} + F_j c_{j+1}^{(n+1)(m)} =$$

$$D_j - E_j c_j^{(n+1)} \cdot 2^{(m-1)} \quad (15)$$

可采用追赶法进行迭代求解,  $m$  为迭代次数。

### 3 实测与模拟结果

试验地点选择在中国科学院阿克苏水平衡试验场的棉田里,位于塔里木盆地北部平原绿洲农业区

内,本地区是我国重要的棉花生产区,这里水分缺乏,蒸发强烈,多年平均降水量 44.7 mm,农业全部依靠灌溉。试验地原始土壤为荒漠盐土,科研工作者<sup>[7~9]</sup>都在为改造荒漠盐土进行各种研究工作。试验时间为 1996 年 8 月 7 日至 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。表 1 和表 2 分别为土壤水

表 1 灌溉前后棉田土壤重量含水量 (%)

Tab. 1 Soil moisture contents in cotton field before and after irrigation

深度 / cm	观 测 日 期 (1996 年 8 月)								
	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 灌溉前后棉田土壤盐分浓度 (g kg<sup>-1</sup>)

Tab. 1 Soil salt in cotton field before and after irrigation

深度 / cm	观 测 日 期 (1996 年 8 月)								
	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
10	1.50	1.14	0.76	3.27	0.31	1.24	0.83	3.30	0.94
20	0.32	0.22	0.17	1.05	1.01	0.30	2.68	0.18	1.69
40	0.22	0.29	0.18	0.24	0.18	0.21	0.17	0.14	0.38
60	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

分和土壤盐分的观测值。

我们运用上述模型,对土壤水盐运动进行了数值模拟。模拟所需的土壤含水量可以用观测值,也可用方程(1)和方程(4)计算所得的土壤含水量,图 1 给出了第五天和第十天土壤重量含水量的模拟值与观测值比较图形。试验和模拟结果表明<sup>[10]</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入渗作用,是持续的土壤水分运动,也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(20~50 cm)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,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

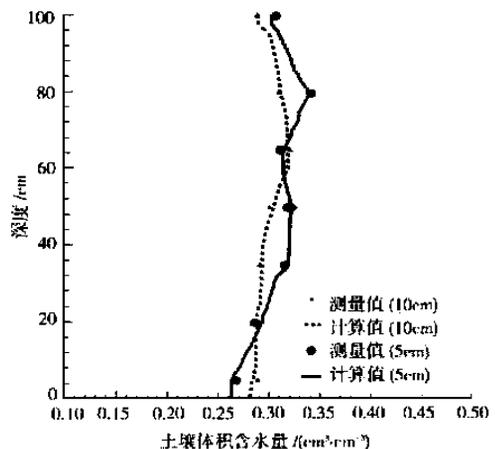


图 1 土壤体积含水量随深度的变化

Fig. 1 Variance of moisture content in soil

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。

在已知  $(z, t)$  和  $q(z, t)$  的情况下,本文对土壤盐分变化也作了 10 d 数值模拟,盐分扩散系数表

达式(13)中的系数  $\alpha$  和  $D_0$  按文献[2]所给的方法而定,即  $\alpha = 0.241 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.00043 \text{ cm}^2 \cdot \text{h}^{-2}$ 。图2和图3分别给出了第一天和第十天的棉田土壤盐分在蒸散条件下的模拟结果,计算结果与实测值吻合较好。在土壤表面,虽然经过灌水冲洗以后,土壤

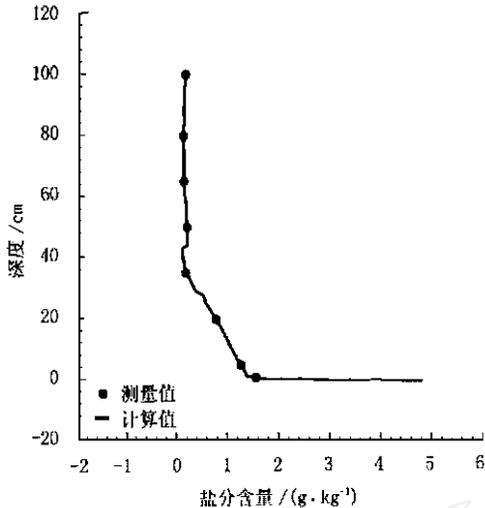


图2 蒸散第一天盐分随深度的变化

Fig.2 Distribution of salt with soil depth on first day of evapotranspiration

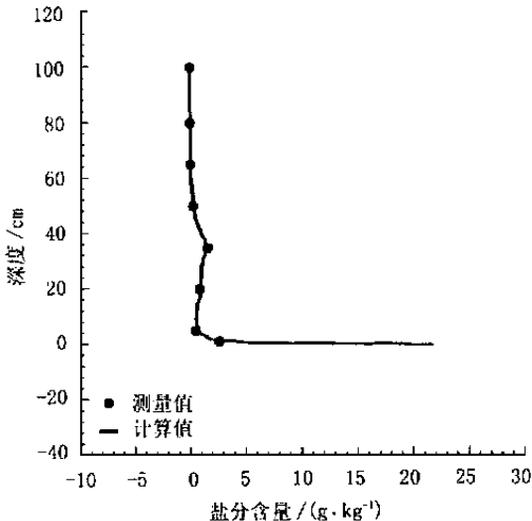


图3 蒸散第十天盐分随深度的变化

Fig.3 Distribution of salt with soil depth on tenth day of evapotranspiration

表面盐分浓度有所下降,但是经过蒸散以后,土壤表面浓度又有所上升。

## 4 主要结论

(1) 采用预估校正方法求解干旱区农田的土壤水分运动的h型Richards方程,此方法可以控制一定的迭代步数,但同样可达到二阶精度,能得到好的计算结果。对于灌溉的农田,土壤水分变幅要大于

非灌溉土壤,其变化过程由于灌溉水而趋于复杂,在作物的主要根系活动层土壤水分的动态变化要明显快于其它层土壤。

(2) 采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,此格式可避免采用一般差分格式时出现的数值弥散问题,能给出较陡的峰面区域。根据农田的盐碱化程度进行灌溉冲洗,对于盐碱化程度较低的农田,不一定要采用淹灌冲洗的办法,如能适当地增大灌溉定额,将农田表层盐分控制在一定限度之内,并在一定时间的蒸发作用下,保证作物生长层内盐分含量满足作物生长的要求,通过多年利用使土壤逐步脱盐,同时,得到较好的收成。

(3) 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,这种格式适合于预告土壤盐分运动。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。此模式可以用于模拟有植被覆盖以及蒸发条件下的农田土壤水盐运动,能预测土壤不同深度的盐分变化规律。

## 参考文献(References):

- [1] Leonavd B P. A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation[J]. *Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg.*, 1979.
- [2] Sun Shufen, Yao Deliang, Ji Wei. Numerical simulation of salt solute movement in soil under evaporation[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1989, 21(6): 688 - 696. [孙菽芬,姚德良,冀伟. 在蒸发条件下土壤水盐运动的数值模拟[J]. 力学学报, 1989, 21(6): 688 - 696.]
- [3] Germitza, Page E R. An expirical mathematical model to describe plant root system[J]. *J. Appl. Ecol.*, 1974, 11(2): 773 - 781.
- [4] Yao Deliang, Xie Zhengtong, Li Jiachun. Land-atmosphere interaction model and observation in Yucheng County[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2000, 20(6): 1076 - 1082. [姚德良,谢正桐,李家春. 禹城地区陆气相互作用耦合模式和观测研究[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 1076 - 1082.]
- [5] Yao Deliang, Qiu Kejian, Ji Wei, et al. A numerical model of dynamics in soil moisture under condition of plant consumption [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1993, 30(1): 111 - 115. [姚德良, 邱克俭, 冀伟, 等. 在植物耗水条件下土壤水分动态的数值模拟[J]. 土壤学报, 1993, 30(1): 111 - 115.]
- [6] Molz F J. Models of water transport in the soil-plant system: A review[J]. *Water Resour. Res.*, 1981, 17(5): 1245 - 1260.
- [7] Liu Hujun, Wang Jihe, Hu Minggui, et al. Mulching effect of pyrus yard on saline soil in Arid Area[J]. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(4): 411 - 416. [刘虎俊,王继和,胡明贵,

- 等. 干旱区盐渍化土地梨园覆草效应研究[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 411 - 416. ]
- [8] Tian Changyan, Song Yudong, Hu Mingfang. Status, causes and countermeasures of desertification in Xingjiang[J]. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(3): 214 - 218. [田长彦, 宋郁东, 胡明芳. 新疆荒漠化现状, 成因和对策[J]. 中国沙漠, 1999, 19(3): 214 - 218. ]
- [9] Ji Fang, Fan Zili, Deng Yongxin, et al. A study on canalization of the upper and middle reaches of Tarim river and desertification control of its lower reaches[J]. *Journal of Desert Research*, 1998, 18(4): 314 - 319. [季方, 樊自立, 邓永新, 等. 塔里木河干流人工渠化与下流土地荒漠化治理研究[J]. 中国沙漠, 1998, 18(4): 314 - 319. ]
- [10] Zhou Hongfei, Huang Miaofen. Relationship of cotton evapotranspiration and water-heat conditions in Tarim Basin[J]. *Arid Land Geography*, 1996, 19(4): 60 - 67. [周宏飞, 黄妙芬. 绿洲棉田蒸散与土壤水热状况关系分析[J]. 干旱区地理, 1996, 19(4): 60 - 67. ]

## Model on Water-Salt Movement and Application in Field of Arid Land

YAO De-liang<sup>1,2</sup>, ZHU Jing-sheng<sup>1</sup>, XIE Zheng-tong<sup>1</sup>, LI Xin-rong<sup>2</sup>,  
ZHANG Jing-guang<sup>2</sup>, LIU Li-chao<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. Shapotou Desert Research & Experiment Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The Prediction-Correction method is applied to solve the  $h$  type of Richards equation for water movement in soil. Satisfactory precision is gotten while the iteration steps are constrained by this method. Furthermore, the quadratic upstream interpolation difference method is adopted to solve the convection-diffusion equation for soil salt movement. It can avoid the problem of numerical dispersion and presents steeper apex of soil salt profile. Finally, this mathematical model is also utilized to simulate water-salt movement and the process of upwards accumulation of soil salt in cotton field of arid land under the condition of evaporation. The numerical results turn out in good agreement with the experimental data, thus the mathematical model may provide scientific basis for predicting salinization of soil. The water-salt movement in cropland with canopy and evaporation influence may be calculated by the present model, and the variation with depth of salt can also be obtained.

**Key words:** oasis cropland; water-salt movement; Prediction-Correction method; quadratic upstream interpolation; numerical simulation