

# 数值模拟盐渍土盐分的季节变化\*

陈 动

(北京农业大学)

## 摘 要

本文用数值模拟方法对土壤的盐分动态进行了周年的模拟计算。计算中考虑了盐分的沉淀与溶解,地下水位随时间变化等情况。计算结果表明:(1)数值模拟方法能反映季风区土壤盐分的季节变化;(2)雨季的集中降雨更有利于土壤脱盐;(3)地下水位的变化与气象因素的变化相配合影响着土壤水盐运动。

近半个世纪末,根据热力学原理从能量观点研究土壤水发展极快,可以用数学物理方程的形式描述土壤中水盐的运动。根据这些方程、应用数值方法可以模拟在给定环境条件和初始条件下土壤水盐的行为和状况。利用这种方法我们可以进一步认识了解土壤积盐脱盐的具体过程以及预测土壤盐分未来的状况。

## 一、模型的描述与实现

(一) 模型的描述 在不考虑温度影响的均质土壤中,一维垂向非饱和水流动和盐分运动基本方程分别是

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{p,h}(V, \theta) \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \frac{\partial(qc)}{\partial z} - \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2)$$

上式中  $t$  是时间,  $z$  是垂向空间坐标,取向下为正;  $\theta$  是土壤体积含水量;  $K(\theta)$ 、 $D(\theta)$  是非饱和土壤导水率和扩散率;  $c$  是土壤溶液的盐分浓度;  $Q$  是单位体积土壤中固态盐含量;  $q$  是溶液体积通量;  $D_{p,h}(V, \theta)$  是土壤盐分扩散-弥散综合系数,可由下式估计:

$$D_{p,h}(V, \theta) = D_0 \cdot a \cdot e^{b\theta} + \lambda |V| \quad (3)$$

上式中  $D_0$  是自由水体中盐分的扩散系数;  $V$  是孔隙平均流速;  $a, b, \lambda$  是待定参数<sup>[4]</sup>。

水盐运动基本方程表示水盐运动的规律,边界条件反映了盐渍土所处的环境条件。一维垂向流有上、下两个边界。

上边界条件:

水流和溶质的上边界通量可分别表示为:

\* 本文是作者在北京师范大学李天杰导师指导下所做的硕士论文的一部分。

$$q_0(0, t) = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \quad 0 \leq t \leq T, z = 0 \quad (4)$$

$$q_0 c_0(t) = -D_p h(V, \theta) \frac{\partial c}{\partial z} + q \cdot c \quad 0 \leq t \leq T, z = 0 \quad (5)$$

当  $q_0 < 0$ , 表示蒸发情况,  $|q_0|$  值表示蒸发速率; 当  $q_0 = 0$ , 表示再分配或内排水情况; 当  $q_0 > 0$ , 表示入渗情况,  $q_0$  值表示入渗速率; 上式中  $c_0(t)$  表示入渗溶液的浓度, 文中始终取  $c_0(t)$  为零, 即只考虑在蒸发时无盐分从土表损失, 入渗时所进入的水不含所计算的离子成份。

下边界条件:

只考虑下面一种下边界条件,

$$\theta = \theta_s \quad 0 \leq t \leq T, z = Z \quad (6)$$

$$c = c_s \quad 0 \leq t \leq T, z = Z \quad (7)$$

上式中  $\theta_s$  表示土壤饱和含水量,  $c_s$  表示地下水中盐浓度值,  $Z$  表示地下水位埋深值。

(二) 模型的实现 本文采用六点差分格式(又称 Crank-Nicolson 格式), 把连续的时、空( $t, z$ )分成矩形网格, 每一节点用  $(i, j)$  标记, 其中  $i$  表示空间步,  $j$  表示时间步。空间用定步长  $\Delta z$ , 时间用变步长  $\Delta t$ 。由方程(1)得差分方程,

$$\frac{\theta_i^{j+1} - \theta_i^j}{\Delta t} = \frac{S_i^{j+1} - 2S_i^{j+1/2} + S_i^j + S_{i+1}^{j+1} - 2S_{i+1}^{j+1/2} + S_{i+1}^j}{2 \cdot \Delta z^2} - \frac{K_i^{j+1/2} - K_i^{j+1/2}}{2 \cdot \Delta z} \quad (8)$$

上式中  $S$  为 Gardner 定义的基本流公式,

$$S = \int_{\theta_0}^{\theta} D(\alpha) d\alpha$$

方程(2)中右端最后一项的差分为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \beta \cdot \theta_i^{j+1/2} (c_i^{j+1/2} - c_m) \quad (9)$$

其中

$$\beta = \begin{cases} \beta - \beta_1, & \text{当 } c_i^{j+1/2} \leq c_m \text{ (当 } Q_i^{j+1/2} = 0 \text{ 时, 令 } \beta_1 = 0) \\ \beta - \beta_2, & \text{当 } c_i^{j+1/2} > c_m \end{cases}$$

上式中  $c_m$  是该溶质的饱和浓度,  $\beta_1, \beta_2$  分别是该溶质的溶解和过饱和沉淀速率。

方程(2)中其余部分按 E. Bresler 的差分格式展开<sup>[4]</sup>。

根据上述差分格式, 编写水盐运动的计算程序。用牛顿法处理方程(1)的非线性问题。程序采用 FORTRAN 语言。其运算过程见图 1。模型中考虑了盐分溶解和过饱和沉淀、地下水位随时间升降变化, 可以用来模拟蒸发、再分配(或内排水)、入渗过程中水盐的运动。

## 二、模型的验证

模型分别与 Warrick 等<sup>[5]</sup>1970年进行的田间入渗实验和李韵珠等<sup>[11]</sup>1980年土柱实

验结果进行了对比验证。根据水分、盐分剖面图对比的结果,应该认为计算结果与实验结果是重合的、较好的。其中李韵珠等的实验中土柱管口暴露于大气中,接受自然蒸发与降雨,该实验结果与计算结果的对比见图 2。计算中参数的取值为,

$$\begin{aligned} \theta_r &= 0.5\text{cm}^3/\text{cm}^3 & c_m &= 0.358\text{g}/\text{cm}^3 \\ D_0 &= 0.96\text{cm}^2/\text{day} & c_d &= 5.04\text{g}/\text{l} \\ a &= 0.002 & \beta_1 &= 0.05\text{g}/\text{min} \\ b &= 10 & \beta_2 &= 5.0\text{g}/\text{min} \\ \lambda &= 0.5 \end{aligned}$$

取空间定步长  $\Delta z = 1$  厘米,时间变步长  $\Delta t$  的允许范围 0.0036—5 小时。水分特征曲线和导水率曲线分段拟合为

$$\begin{aligned} h &= a_1 \cdot \exp(b_1 \cdot \theta) \\ k &= a_2 \cdot \exp(b_2 \cdot \theta) \end{aligned}$$

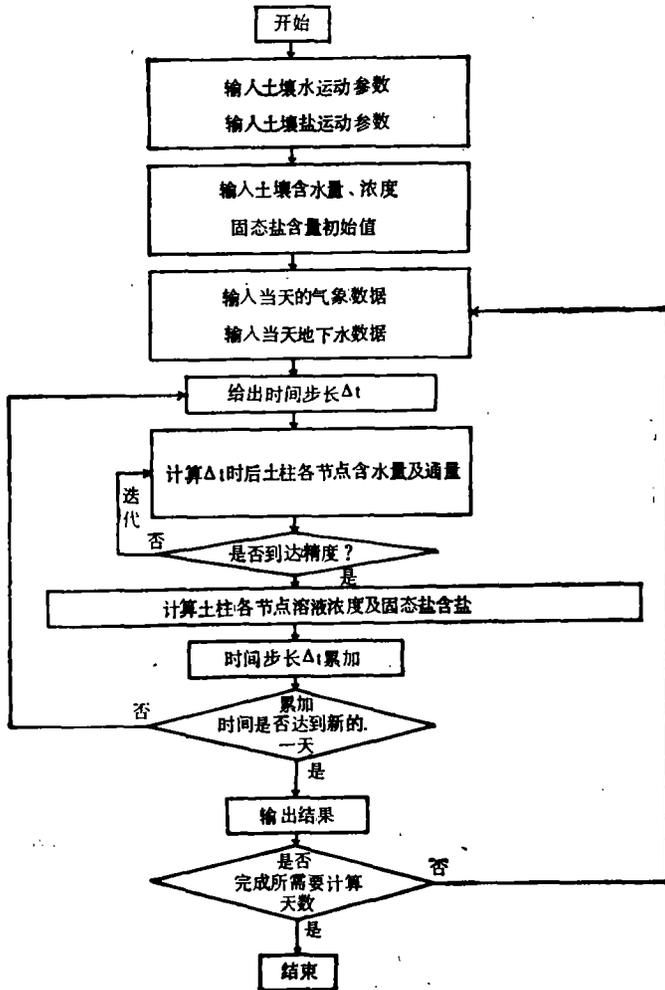


图 1 土壤水盐运动模拟计算机程序运算过程图

Fig. 1. Schematic diagram of numerical simulation computer program

表 1 土壤水分特征曲线和导水率曲线参数值  
Table 1 Values of coefficients of  $h(\theta)$  and  $K(\theta)$

$\theta$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$
<0.095	-45292.7	-46.99	$1.89 \times 10^{-11}$	207.15
0.095-0.45	-1239.78	-9.119	$9.67 \times 10^{-4}$	20.32
>0.45	$-2.446 \times 10^{-10}$	-46.447	$1.07 \times 10^{-17}$	91.73

上式中  $h, k$  分别表示基模势和导水率,  $a_1, a_2, b_1, b_2$  的取值见表 1 ( $h$  的单位取厘米水柱,  $k$  的单位取厘米/天)。

上边界通量  $q(0, t)$  值取为

$$q(0, t) = \begin{cases} E & \text{蒸发时} \\ R & \text{降雨时} \end{cases}$$

上式中土表蒸发率  $E$  利用水面蒸发率  $E_0$  通过下式估计<sup>[2]</sup>。

$$E = \begin{cases} E_0 & \text{当 } \theta_s > 0.3547 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \\ E_0(2.65\theta_s - 0.06) & \text{当 } \theta_s = 0.0231 - 0.3547 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \\ 0 & \text{当 } \theta_s < 0.0231 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \end{cases}$$

上式中  $\theta_s$  为表层土壤含水量。为了方便以及所能获得数据的可能, 假设降雨在 1/4 天内完成, 由此从日降雨量换算出降雨速率  $R$ 。

### 三、模型的应用

在上述计算对比验证的基础上保持所用参数和初始值不变, 分别利用河北省南官县 1980 年 3—11 月和山西省阳高县 1981 年 3—11 月气象观测日蒸发量、降雨量进行了周年的土壤水盐运动模拟计算 (假设在 12 月、1 月、2 月土壤冻结水盐运动可忽略)。为了方便两者在后文中分别称为“南官 80”和“阳高 81”。地下水埋深分别取 100 厘米和 150 厘米, 阳高县实测地下水位变化曲线和该曲线的平均值 123 厘米。输出结果有每天表土 0—20 厘米含盐量值, 有选择的某些时刻的全剖面逐节点含水量, 土壤溶液浓度, 含盐量值, 土表累积实际蒸发量。

### 四、结果讨论

(一) 季风气候条件下水盐的周年动态 处在季风区的盐渍土壤, 水盐状况普遍存在着季节变动<sup>[1]</sup>。由图 3 和图 4 看出, 由于气候的干湿交替, 土壤的积盐脱盐也呈现交替

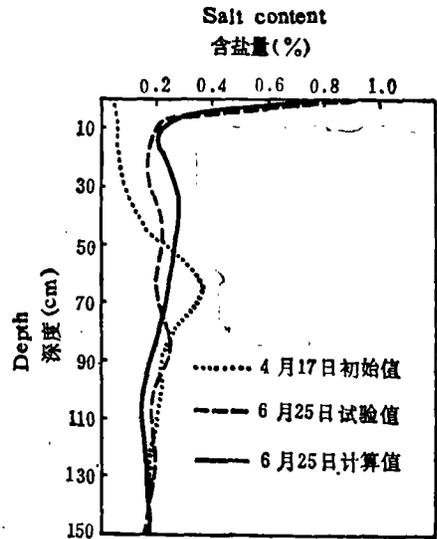


图 2 计算结果与试验结果的含盐量剖面对比

Fig. 2 Comparison between measured and calculated salt contents distributed in profile

的现象。随着大陆性的增强,降雨更加集中,这种水盐运动的节奏更加明显。由图中的曲线可以看出,在初春秋末曲线上升都较慢,春末夏初和秋初上升较快,这与各时期温度和蒸发量的差异有关,据此可以寻找抑制积盐、促进脱盐的有利时机。

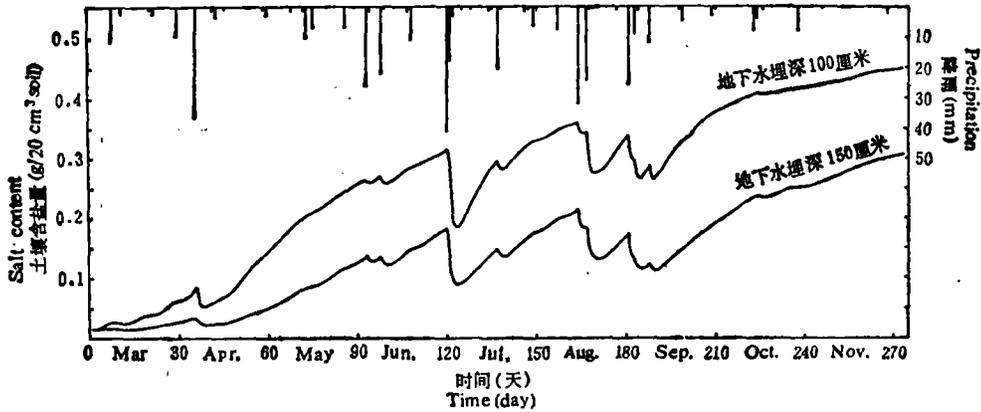


图3 利用南官1980年气象观测资料,地下水埋深分别保持100厘米和150厘米计算输出表土(0—20厘米)含盐量随时间变化曲线

Fig. 3 Variation of salt content in top soil (0—20), calculated with evaporation and precipitation data (1981) of Nangong County, Hebei Province (at ground water table of 100cm and 150cm)

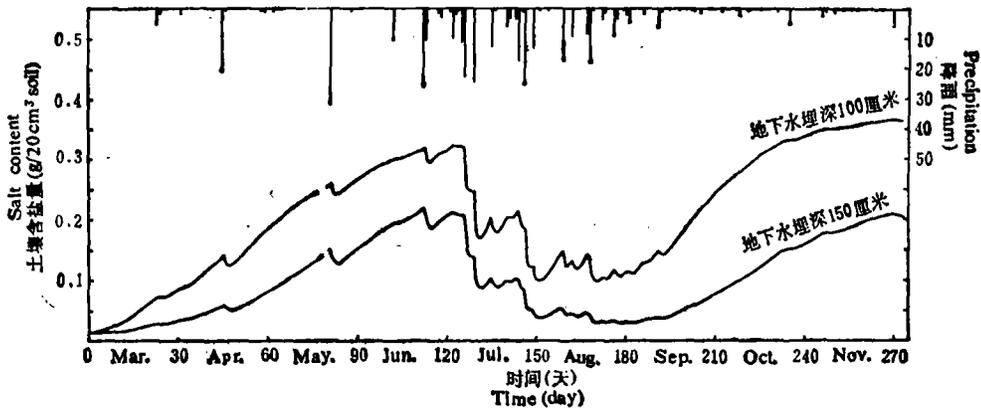


图4 利用阳高1981年气象观测资料,地下水埋深分别保持100厘米和150厘米计算输出表土(0—20厘米)含盐量随时间变化曲线

Fig. 4 Variation of salt content in top soil (0—20), calculated with evaporation and precipitation data (1981) of Yanggao County, Shanxi Province (at ground water table of 100cm and 150cm)

这种交替现象,不仅表现在表层土壤含盐量的变化,还表现在盐分割面的变化上。由图5可以看出,在积盐期盐分集中在土表,土壤总含盐量也较高。在脱盐期,在盐分随着水分下移的过程中,又发生了扩散和弥散现象,使盐剖面形成一个上、下含量低,中间高的峰形,峰所在的位置不断下移,峰值不断降低。但是这种交替现象随着逐年气象条件的变

化而有所改变。如图 3 正说明了这种情况,处在雨季的 7 月初到 8 月 10 日的 40 天中仅降雨 34.9 毫米,反而形成了一个小的积盐期。

(二) 集中的降雨更有利于土壤脱盐 在季风气候下,降雨集中在雨季。分析图 3 和图 4 可以看出这种相对集中的降雨更有利于土壤脱盐。如果把阳高 81 看作降雨相对集中的模式,南官 80 看作降雨相对分散的模式,用保持地下水位埋深 100 厘米的结果进行分析可以看到,表土 0—20 厘米含盐量在脱盐期最低值,南官 80 为 0.66% (按土壤容重  $1.40\text{g}/\text{cm}^3$  换算出),而阳高 81 为 0.35%,最终(11 月 30 日)含盐量南官 80 为 1.61%,而阳高 81 为 1.30%。最终南官 80 累积土表实际蒸发量(累积土表水分输入值减去累积土表水分输出值)比阳高 81 多 94.5 毫米(全剖面总含水量两者基本相同),按地下水矿化度 5.04 克/升换算 9.45 厘米<sup>3</sup>水含盐分 0.048 克,而模拟结果全剖面含盐量南官 80 比阳高 81 多 0.078 克。

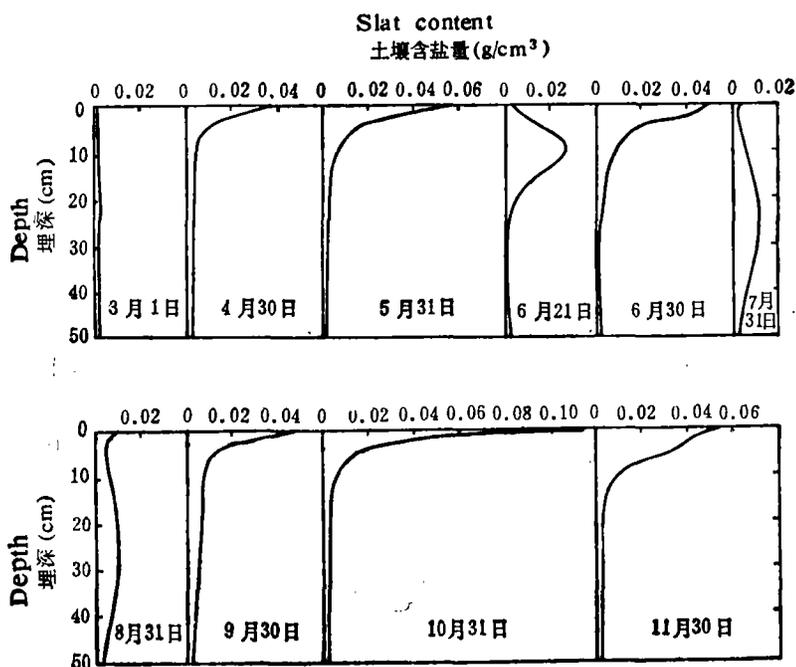


图 5 利用阳高 1981 年气象观测资料,地下水埋深 100 厘米  
计算输出土壤盐剖面结果

Fig. 5 Distribution of salt content in soil profile, calculated with evaporation and precipitation data(1981) of Yanggao County, Shaxi Province (at ground water table of 100 cm)

对比春夏两季降雨后土表含盐量的下降幅度也可以看出水分入渗的相对集中有利于土壤脱盐。假设 0—20 厘米为根区,有效的脱盐量是从该区中脱去盐分,从该区脱盐并不仅发生在入渗过程中,当入渗过程结束后,仍有水分从该区向下流出,即存在再分配(或内排水)过程,水分能下移出根层多少,带走多少盐分,不仅与入渗总量有关,而且与土壤的前期含水量、后期蒸发量和入渗历时有关。

在春季,经历较长时间的蒸发,表土层含水量低,在偶尔一次降雨后,较多的水分被保

持在土壤表层,雨后一般又有较强的蒸发,盐分脱去的较少。

在夏季,经常的较强的降雨使表土层含水量较高,降雨后水分向下移动较多,在再分配(或内排水)过程中,又有较多的水分向下流出,因此脱去的盐分较多。

连续较强的降雨可以脱去较多的盐分的另一个原因是在初次降雨时,土壤溶液浓度一般较高,即凸形盐分割面的峰值较大且靠近地表(如图5中6月21日的盐分割面)。如果没有连续较强的降雨,在蒸发作用下,这些浓溶液又返回到地表,表土积盐很快。连续较强的降雨可以使峰值降低,位置下移,盐分被淋洗至地下水中,在其后的蒸发积盐过程中,对于相同的蒸发量,则表土积盐速率降低。因此在灌溉洗盐过程中,采用大定额、连续、长历时的灌水方法,能达到较好的淋洗效果,在降雨或灌溉洗盐后及时切断土壤表层毛细管,阻止水分蒸发,不仅防止土壤返盐而且促进了土壤脱盐。

也应该认识到,虽然淋洗盐分过程中,水的集中入渗效果较好,但是这种集中也是有限的,过分的集中不但效果不佳而且造成水资源的浪费。

(三) 地下水位埋深对土壤盐分运动的影响 对地下水成因的盐化土壤,地下水位的埋深起着极为重要的作用。这一点可以在图3和图4中直接看出。地下水位埋深值越大土壤含盐量越低可以认为是通过两个方面实现的,积盐率低和脱盐率高。如阳高81的结果,地下水位埋深分别为100厘米和150厘米,对于表土(0—20厘米)的含盐量,在春季积盐期后者比前者低33.95%,雨季脱盐期的脱盐率前者为65.33%后者为84.97%,最终积盐后者比前者降低了43.31%。

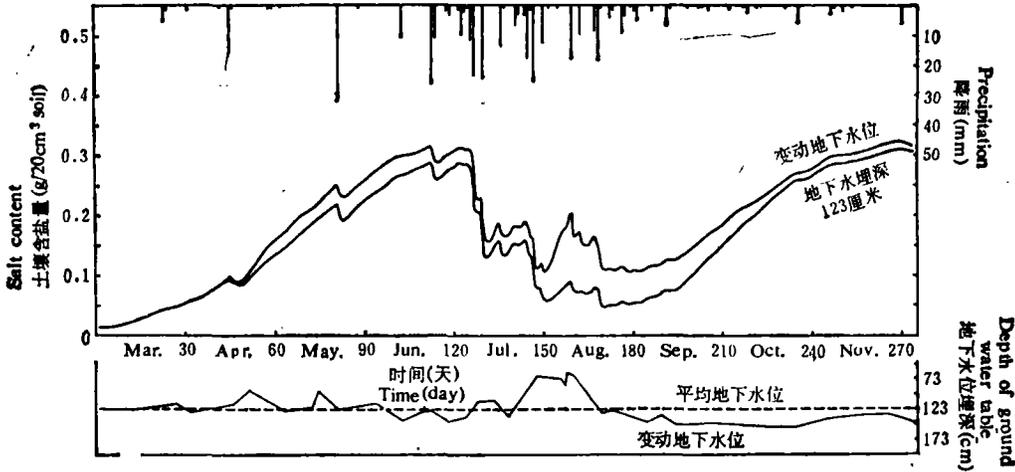


图6 利用阳高1981年气象观测资料,地下水位按实测变动值和埋深保持123厘米(等于变动值的全年平均埋深)计算出表土(0—20厘米)含盐量时间变化曲线

Fig. 6 Variation of salt content in top soil (0—20), calculated with evaporation and precipitation data(1981) of Yanggao County, Shanxi Province (according to measured ground water table in Yanggao County and average depth 123cm)

在不同的季节地下水位埋深值的大小对土壤积盐脱盐的影响大小和方式是不同的。这一点可在图6中看出。从图中还可以看出阳高81的这种地下水位变化模式与气象条件

的配合更容易造成土壤盐分的积累。

## 五、结 语

从本文的结果可以看出, 可以利用数值模拟方法研究土壤的周年水盐运动。与环境条件的预测相结合可以预测未来的水盐运动状况。

本文所建数值模型适用的简化条件, 与实际的田间情况存在着距离, 有待于进一步改进。根据模拟计算结果所作的分析和结论也有待于野外实测资料和盐渍土改良实践的检验。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 李韵珠等, 1985: 蒸发条件下粘土层与土壤水盐运移。国际盐渍土改良学术讨论会论文集。
- [ 2 ] 张蔚榛等, 1981: 包气带水分运移问题讲座(四) 蒸发条件下水分运动(上)。水文地质工程地质, 第4期, 55—59页。
- [ 3 ] 石元春等, 1983: 黄淮海平原的水盐运动和旱涝碱的综合治理。河北人民出版社。
- [ 4 ] Bresler, E., 1973: Simultaneous transport of solute and water under transient unsaturated flow conditions. *Water Resour. Res.*, 9(4), 975—986.
- [ 5 ] Warrick, A. W. et al., 1971: Simultaneous solute and water transfer for an unsaturated soil. *Water Resour. Res.*, 7(5), 1216—1225.

# NUMERICAL SIMULATION OF SEASONAL CHANGES OF SOLUBLE SALTS IN SALT-AFFECTED SOIL

Chen Dong

(Beijing Agricultural University)

## Summary

Numerical simulation method was used to study the transfer of soluble salts in soil. Evaporation and infiltration of water, precipitation and solution of salts in soil, and fluctuation in ground water table were considered in the computer simulation program.

The simulated results of movement of salts over 9 months period showed that (1) this method can be used to simulate movement of salts in soil not only over short period but also over one year; (2) more precipitation in rainy season than in other seasons is more favorable for salt leaching and desalination of soil; (3) the movement of salts in soil is affected by the changes of ground water table in combination evaporation and precipitation.