

种植作物条件下粉砂壤质土壤水盐运移的 数值模拟研究*

徐力刚 杨劲松 张妙仙

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 利用大型水盐运动模拟土柱研究了在田间气候作用下作物(小麦-玉米连茬种植)生长对土壤水盐运移的影响。研究并建立了土壤水盐运移的数学模型,就模型所需的饱和导水率、水力传导度、水分特征曲线、水动力弥散系数进行了室内外测定,并对数学模型进行了数值求解。对四个土柱的模拟结果与实测结果进行了数据分析和对比。结果表明:数值模拟结果和实测数据比较,除个别点有一定偏离之外,模拟计算结果与实测值拟合效果比较理想,说明该模型用于模拟种植作物条件下粉砂壤质土壤的水盐运移是实际可行的。

关键词 种植作物; 水盐动态; 数值模拟; 模型

中图分类号 S152.7 文献标识码 A

黄淮海平原是中国最大的冲积平原,由于受到季风气候影响,旱、涝、盐碱、风沙交替危害,使这一地区的农业生产长期以来低而不稳^[1]。尽管该区的土壤盐渍化已经基本得到控制,但是当地土层大部是粉砂壤质地,返盐威胁比较严重,对当地的农业生产仍构成很大的威胁。土壤水分、盐分、地下水埋深是表征当地土壤质量的重要状态变量,研究其动态变化过程是研究土壤质量演变规律和赖以防治土壤盐渍化的重要方面^[2],而这一动态变化过程可由水盐动态模型来描述。过去的水盐动态模型主要侧重于在无植被条件下的数值模拟和调控,而种植作物条件下阐明土壤中水盐动态变化过程的工作较少^[3],因此在这方面开展进一步的工作,显得尤为必要。同时对盐分动态过程进行定量分析与描述,对该地区防治土壤次生盐渍化和土壤次生盐渍化的预测预报与调控具有重要的实际意义^[4]。

1 实验条件和方法

实验在中国科学院封丘农业生态实验站应举点进行,利用大型水盐运动模拟实验土柱研究在田间气候作用下作物(小麦-玉米连茬种植)生长对土壤

水盐运移的影响。在水盐动态模拟实验室的 1~30 号实验土柱中选取 1、4、7、10 号四个粉砂壤质土柱来进行研究,这四个土柱中每个土柱直径 61.8 cm,横截面积为 3 000 cm²。实验期间根据当地情况,地下水水位由马廖特瓶控制,并用其测量潜水蒸发量。四个土柱的地下水水位分别为 1.0 m、1.5 m、2.0 m 和 2.5 m。实验土柱内土壤均为质地均一的黄河沉积性轻质粉砂壤,其初始含盐量和机械组成如表 1、表 2 所示^[5]。每个土柱均按 1.5 g cm⁻³ 的容重分层(每层 5 cm 厚)均匀装填。土柱不同深度分别安装盐分传感器和水分传感器,传感器插入土体深度为 7 cm,利用计算机自动观测系统观测土壤水分和盐分变化,每隔 5 d 进行一次观测。土壤水分以体积含水量百分数(cm³ cm⁻³)表示,盐分以电导率(dS m⁻¹)表示。在土柱中安装有中子测定管,用中子水分仪同时观测土壤剖面水分变化,以校准和补充水分传感器的测量结果。在土柱地表处安装径流管,土柱底部在控制水位的上方装有渗漏出流管,测量通过土体渗漏至地下水中的水量和盐量。由马廖氏瓶以 1 g L⁻¹ 的低矿化水补给土柱因土壤蒸发和作物蒸腾而消耗的水分。附近的气象场观测记录降雨量和水面蒸发量等气象资料。观测实验在连茬作物的种

* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999011803)经费支持

作者简介:徐力刚(1976~),四川仁寿人,博士研究生,主要从事土壤水盐动态数值模拟研究

收稿日期:2003-01-04;收到修改稿日期:2003-06-15

植期内连续进行。通过实验结果的分析 and 数值推导, 建立种植作物条件下土壤水盐运移的综合数学

模型, 并进行模型的求解和验证。

表 1 供试土壤含盐量及离子组成

Table 1 The salt content and composition in the tested soil

土样 Soil sample	pH	电导率 EC (dS m ⁻¹)	全盐 Total salt(g kg ⁻¹)	阴离子 Anion (cmol kg ⁻¹)					阳离子 Cation (cmol kg ⁻¹)			
				CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
粉砂壤土 Silt bam	8.02	0.361	1.32	—	0.72	0.31	0.42	—	0.23	0.18	0.05	0.96

表 2 供试土壤的机械组成

Table 2 Particle size distribution of the tested soil

土样 Soil sample	各级颗粒含量百分比 Percentage of particles(%)					粘粒 Clay < 0.001 mm	物理性粘粒 Physical clay < 0.01 mm
	1~ 0.25 mm	0.25~ 0.05 mm	0.05~ 0.01 mm	0.01~ 0.005 mm	0.005~ 0.001 mm		
粉砂壤土 Silt bam	0.4	27.9	55.3	2.7	3.4	10.3	16.4

2 土壤水盐运移的数值模拟

2.1 土壤盐分运动的数学模型

盐分在土壤中的运动是一个非常复杂的运动过程, 其作用机制很多, 主要有盐分随水分的运动而产生的毛管对流迁移, 由于盐分浓度梯度的存在, 多孔介质的分散作用而产生的水动力弥散^[6,7]; 盐分在土壤溶液和土壤颗粒之间的转化和迁移, 如盐分的结晶和溶解、离子吸附和交换等。在田间情况下根据土壤溶液的流态, 土壤盐分运动的数学模型都看成是非稳定态的模型^[8]。为了计算方便, 在本文所建立的数学模型中主要考虑由于对流和弥散作用而引起的盐分运动, 根据 Fick 定律和质量守恒原理导出盐分运动的基本微分方程为:

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \frac{\partial(qc)}{\partial z} + S_s \quad (1)$$

其相应的初始条件和边界条件(主要考虑蒸发、灌溉和降水下渗作用)为:

$$c(z, 0) = c_0(z) \quad \text{初始条件} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \left[-D \frac{\partial c}{\partial z} + \varepsilon_1 c \right] \Big|_{z=0} = 0, C|_{z=0} \leq C_m \\ C|_{z=0} = C_m, C|_{z=0} > C_m \end{cases} \quad \text{第二类边界条件} \quad (3)$$

$$c(Z, t) \Big|_{z=L} = c_d \quad \text{下边界条件} \quad (4)$$

式中: θ —土壤体积分水率($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); c —土壤溶液溶质浓度(g cm^{-3}); D —水动力弥散系数($\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$); t —时间变量(d); q —土壤水渗流系数($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2}$

d^{-1}); Z —空间坐标, 原点在地表, 向下为正(cm); S_s —源汇项($\text{g cm}^{-3} \text{d}^{-1}$) (单位时间土壤中由于作物根系吸附、解吸、溶解、沉淀等作用引起的溶质质量的变化); ε_1 —蒸发强度(cm d^{-1}); C_0 —初始剖面溶质浓度分布(g cm^{-3}); C_m —土壤盐分饱和浓度(g cm^{-3}); c_d —地下水矿化度(g cm^{-3}); L —计算土层的厚度, 取到地下水位(cm)。

2.2 土壤水分运动的数学模型

田间土壤水分的运动主要受降水、灌溉、土壤蒸发和作物蒸腾等因素的影响^[9]。根据达西定律和水量平衡原理, 可以导出在种植作物条件下的一维土壤水分运动基本方程为:

$$c(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial Z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial Z} + S_w \quad (5)$$

其相应的初始条件和边界条件为:

$$h(Z, 0) = h_0(Z) \quad \text{初始条件} \quad (6)$$

$$-K(h) \left[\frac{\partial h}{\partial Z} - 1 \right] \Big|_{z=0} = -\varepsilon_1 \quad \text{第二类边界条件} \quad (7)$$

$$h(l, 0) = 0 \quad \text{下边界条件 1 取地下水位埋深} \quad (8)$$

式中: $c(h)$ —土壤容水度(cm^{-1}); Z —空间坐标, 原点在地表, 向下为正(cm); h —负压水头(cm); t —时间变量(d); ε_1 —垂向水流交换强度(cm d^{-1}); $K(h)$ —土壤水力传导度(cm d^{-1}); S_w —源汇项, 主要考虑根系吸水率($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{d}^{-1} = \text{d}^{-1}$); h_0 —初始剖面负压($\text{cm H}_2\text{O}$)。

2.3 土壤水分运动参数的确定

当忽略水分运动侧向径流时, 由(1)、(5)式可以

看出方程中所含的水动力弥散系数 D 和水力传导度 $K(h)$ 和水分特征曲线 $h(\theta)$ 是土壤水分运动的几个基本参数。通过室内外实验分别求得这些参数^[10]。土壤水分特征曲线用吸力平板仪法进行测定; 导水率通过水分特征曲线用实验数据拟合的方法用 Mualem 模型间接计算求得。土壤水分特征曲线和导水率都明显的受土壤结构和质地的影响^[11], 在其它条件不变的情况下, 一般来说, 温度越高, 盐分浓度越高, 导水率就越大。水动力弥散系数用垂直土柱法进行测定。实验所得的水分运动主要参数计算结果如下所示:

1) 饱和含水率

$$\theta_s = 0.368 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \quad (9)$$

2) 水分特征曲线

$$h = \begin{cases} -1100 \exp(-12.50) \text{ cm} & h \leq 29.412 \\ -1.42 \times 10^7 \exp(-36.40) \text{ cm} & \\ -27.484 \leq h \leq 14.432 & \end{cases} \quad (10)$$

3) 导水率(水力传导度) $K(h)$

$$K(h) = 4.671 \times 10^{-5} \exp(34.2 \text{ h}) \text{ cm d}^{-1} \quad (11)$$

4) 水动力弥散系数 D

$$D = 1.477 \times 10^3 |v| + 0.6 \text{ cm}^2 \text{ d}^{-1} \quad (12)$$

式中: θ —土壤体积含水率($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); h —压力水头($\text{cm H}_2\text{O}$); v —平均孔隙流速($v = q \theta^{-1}$)。

2.4 土壤水盐运移数学模型的求解

对以上建立的土壤水、盐运动的数学模型通过数值计算方法来求解。忽略盐分浓度对流速分布的影响, 一个时间步长内, 可将水分运动与盐分运动分开来求解。先采用有限差分法解水分运动方程得到流速分布, 再解盐分运动方程求得盐分含量分布, 一个步长一个步长向下计算即可得到的任一时刻盐分含量在剖面上的分布。

应用 Crank-Nicholson 中心差分格式可将土壤水分运动方程整理为:

$$E(i) h_{i-1}^{j+1} + F(i) h_i^{j+1} + G(i) h_{i+1}^{j+1} = H(i) \quad (13)$$

式中:

$$\begin{aligned} E(i) &= -K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} & F(i) &= K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} + K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} + RC_i^{j+\frac{1}{2}} + S_{wi}^{j+\frac{1}{2}} \\ G(i) &= -K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} & H(i) &= RC_i^{j+\frac{1}{2}} h_i - \Delta Z \left(K_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} - K_{i-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \right) \\ R &= \frac{(\Delta Z)^2}{\Delta t} \end{aligned}$$

E, F, G, H 代表各差分点流速分布函数, ΔZ 和 Δt 分别为空间和时间步长。同样, 对第二类边界条件进行差分, 可得到一个完整的三对角线方程组, 可用追赶法求解, 方程的非线性用迭代法处理。

由于盐分运动过程中, 对流作用和弥散作用的

物理本质及在偏微分方程中的数学特性是不一样的, 采用常规有限差分法或有限单元法求解会出现数值弥散和数值波动等困难。因此可以将对流作用和弥散作用分开求解, 弥散问题仍然用有限差分法求解, 对流问题采用单步反向离子追踪法求解, 为节省计算时间, 粒子的浓度用三点拉格朗日插值法求得, 每一个时间步长的计算中, 包括粒子初始位置的追踪和粒子浓度的插值两步。

3 模型验证与模拟结果的分析讨论

将所求得的水盐运移参数(9式~12式)和水盐运移的各类边界条件带到所建立的水盐运移模型(1式~8式)中进行数值方程的求解, 即可得到数值模拟的结果。从数值模拟的数据和实验实测的数据来看, 1、4、7、10号四个土柱的含水量和含盐量总体变化趋势基本保持一致, 相互之间可以作为模型的多重检验标准和类比的参考。1号土柱盐分含量相对偏大, 并且地下水位只有1m, 表层土壤蒸发强烈, 水分与盐分运移相当活跃, 具有很好的代表性。所以在模型验证和结果分析中主要对1号土柱20cm土层的水盐模拟、实测值来进行分析。为了对不同地下水位作用下的土壤水盐运移和数值模拟的效果进行比较, 同时对地下水位是2m的7号土柱进行了数值模拟分析, 以揭示不同地下水位作用下水盐动态变化的差异。

3.1 土壤含盐量的模拟结果与实测值的比较分析

从1号土柱表层盐分模拟值与实测值的结果分析来看(图1), 在小麦生育期, 表层土壤电导率较低, 随着小麦的生长, 电导率逐渐增大, 这主要是由于在此期间作物根系生长迅速, 吸水强烈所引起的, 这个阶段模拟值与实测值基本吻合。在小麦收割期间, 土壤电导率达到最大值, 然后由于雨季的来临以及玉米的播种, 电导率呈现下降趋势。随后在玉米生育期间表层土壤电导率呈现回落趋势。从模拟结果可以看出, 小麦生育期间, 作物根系在生长期吸收水分强烈, 小麦根系的分布使表层土壤中盐分大部分向土壤表层和作物体内聚积, 使20cm土层处盐分有所上升; 小麦收割与玉米播种期间, 由于这段时间降雨量的增加和灌溉对表层土壤盐分的淋洗作用强烈, 电导率呈现回落趋势; 在玉米生育期间又出现模拟盐分值比实测盐分值略高的现象, 主要在于玉米根系比小麦更深一些, 导致盐分在40~50cm土层分布较多, 使20cm土层有所偏低。

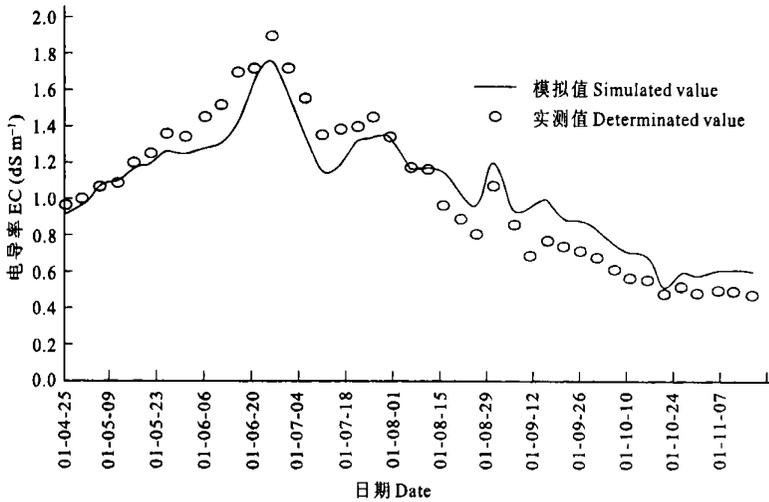


图 1 1 号土柱表层盐分模拟值与实测值结果分析

Fig. 1 The EC of surface soil (0~ 20 cm) in the first column during the experiment

总体上看, 1 号土柱表层盐分模拟值与实测值对比的吻合效果较好, 出现一些数据点略有偏差可能是边界条件和源汇项部分随作物生长的变化而有所改变造成的。

3.2 土壤含水量的模拟结果与实测值的比较分析

从 1 号土柱表层含水量模拟值与实测值的结果分析来看(图 2), 土柱表层模拟结果与实际结果基本吻合。小麦生长期间表土层含水量变化较不稳定, 这主要是由于是受浇灌频度的影响较大。同时

由于不同生育期受蒸发蒸腾的影响作用强烈, 使表层土壤含水量有较大变化。直到小麦灌浆期, 表层土壤含水量才处于了一个相对稳定的状态。到小麦收割, 玉米播种时期, 表层土壤含水量最低, 变化最大。玉米生育期土壤剖面含水量的模拟结果与实测值吻合较好。土壤含水量随玉米生长而略有降低, 主要是由于气温升高, 表土含水量由于蒸发蒸腾作用强烈而呈现出这样的趋势。模拟值较好的反映了作物生长期间土壤水分的动态变化规律。

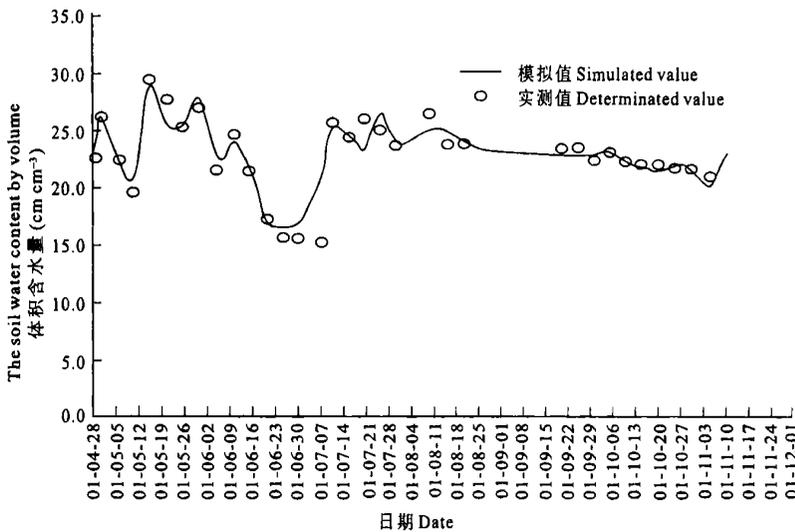


图 2 1 号土柱表层含水量模拟值与实测值结果分析

Fig. 2 The water content of surface soil (0~ 20 cm) in the first column during the experiment

3.3 不同地下水位作用下同一质地同一深度含盐量数值模拟结果分析

从不同地下水位作用下 1、7 号土柱 20 cm 土层

含盐量数值模拟的结果来看(图 3), 7 号土柱明显比 1 号土柱的模拟结果偏低。主要原因是种植作物条件下, 1 号土柱地下水位仅为 1 m, 土壤的水盐运移

过程得到加速, 所种植作物的土壤潜水蒸发量高于7号土柱, 根系从土体中吸收土壤水分, 加速了潜流向土体中的补给, 因而改变了盐分在土体中的分布状况, 使含盐较高的土层出现在20 cm左右, 而不在表层。同时由于作物生长期间, 各类条件也发生了

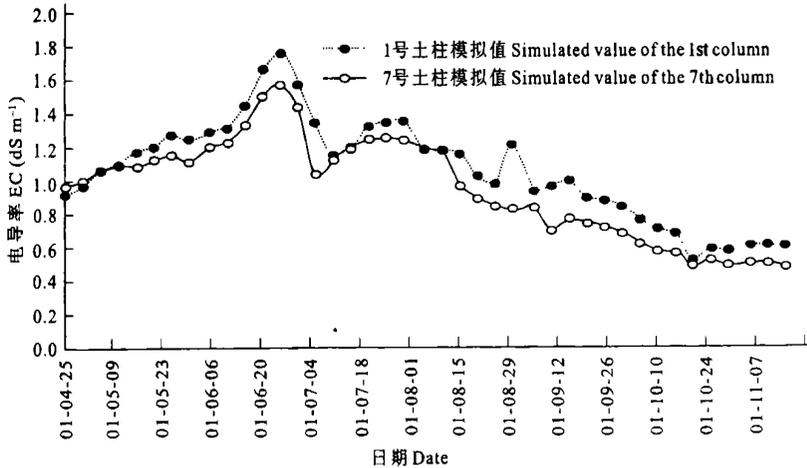


图3 不同地下水位作用下土柱20 cm土层含盐量模拟值对比分析

Fig. 3 The EC of surface soil (0~20 cm) in the columns with different underground water table

除了以上重点分析讨论1号土柱外, 通过对其它土柱不同深度的含水量、含盐量进行数值模拟结果和实测数据的比较, 发现除个别点有所偏离, 大部分计算结果与实测值拟合都比较理想, 说明该模型用于模拟种植作物条件下的土壤水盐运移还是可行的。造成某些测点偏离的主要原因可能是土壤水分和盐分空间分布的变异性以及个别传感仪器性能发生变化所引起的观测结果的误差所致。

4 小结

1) 从数值模拟的结果来看, 含水量和含盐量的模拟值与实测值基本吻合, 有时在表层出现一定偏差, 这主要是由于种植作物条件下不同灌溉、调控措施的利用以及气候等因素的作用引起表层土壤水盐动态变化频繁强烈所致。

2) 对于不同埋深地下水位条件下土壤含盐量的模拟结果来看, 地下水位高的, 有利于潜流向土体中补给, 加速土壤中的水盐运移过程, 改变了盐分在土体中的分布状况, 在作物根系强烈截吸的土壤水分甚于地表蒸发耗损的情况下, 使含盐较高的土层出现在20 cm左右, 而不在表层。

3) 该模型用于模拟种植作物、降雨等自然条件下土壤水分、盐分运动, 较好的反应了土壤不同深度

改变, 影响了数值模拟的结果, 导致同是20 cm土层厚的1号土柱含盐量模拟值高于7号土柱, 这与1号和7号土柱含盐量的实测值结果相比较是一致的。说明此模型用于模拟不同地下水位作用下的盐分动态变化规律是可行的。

的水盐变化, 但是要精确刻画田间土壤水盐动态变化过程, 需不断提高水盐参数测定的精确性和确定边界条件的合理性, 在以后的工作中进一步完善数学模型是很有必要的。

参考文献

- [1] 王福利. 用数值模拟方法研究土壤水盐动态规律. 水利学报, 1991, (1): 1~9. Wang F.L. Study of water and salt regime in soils using numerical simulation method (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 1991, (1): 1~9
- [2] 杨金忠, 叶自桐. 野外非饱和土壤水流运动速度的空间变异性及其对溶质运移的影响. 水科学进展, 1994, 5(1): 9~17. Yang J.Z., Ye Z.T. Velocity spatial variability and its effects on solute transport in unsaturated soil (In Chinese). Advances in Water Science, 1994, 5(1): 9~17
- [3] 宇振荣. 作物生长模型和水分限制下作物生长模拟的研究与应用. 节水农业应用基础研究进展. 北京: 中国农业出版社, 1995. Yu Z.R. The plant growing model and the study and apply of plant growing simulation under the limitation of water supply (In Chinese). Advances on Base Study of Saving Water Agriculture. Beijing: The Chinese Agriculture Press, 1995
- [4] Vereecken M. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. Soil Sci., 1990, 149(1): 1~12
- [5] 邱建军, 肖茱南. 作物生长模拟模型参数校正和有效化的理论和实践. 应用生态学报, 1999, 10(6): 679~682. Qiu J.J., Xiao Y.N. The parameter revision on simulation model and the availability of theory and practice under conditions of crop growth (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(6): 679~682

- [6] 王福利, 肖振华. 土壤水盐运动数学模型及水盐动态预报方法. 土壤盐化与碱化的防治. 北京: 科学出版社, 1993. 25~ 29
Wang F L, Xiao Z H. The mathematic models of water flow and salt transport in saturated-unsaturated zone of soil and predicting the methods of salt-water regime (In Chinese). Monitoring, Prevention and Amelioration of Salinization and Alkalinization of Soils. Beijing: Science Press, 1993. 25~ 29
- [7] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移. 北京: 科学出版社, 1998. Li Y Z, Li B G. The Solute Transport in Soil (In Chinese). Beijing: Science Press, 1998
- [8] 李韵珠, 陆锦文, 黄坚. 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. 济南, 1985. 176~ 190. Li Y Z, Lu J W, Huang J. The water and salt transport in clay layer under evaporation condition (In Chinese). The Proceeding of International Symposium of Salinity Soil Reclaim. Jinan, 1985. 176~ 190
- [9] 庄舜尧, 尹斌, 朱竞. 表面分子膜对土壤水分蒸发影响的模拟实验研究. 土壤学报, 2000, 37: 156~ 161. Zhuang S R, Yin B, Zhu J. Simulation study on the effect of surface film forming material on water evaporation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37: 156~ 161
- [10] 李保国, 龚元石, 左强. 农田土壤水的动态模拟及应用. 北京: 科学出版社, 2000. Li B G, Gong Y S, Zuo Q. The Dynamic Model and Apply of Soil and Water in Field (In Chinese). Beijing: Science Press, 2000
- [11] 杨大文, 杨诗秀. 农药在土壤中迁移及其影响因素的初步研究. 土壤学报, 1992, 29(4): 17~ 23. Yang D W, Yang S X. The elementary study on transport and its effective factors of pesticide (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(4): 17~ 23

NUMERICAL SIMULATION OF SOIL SALT AND WATER TRANSPORT IN SILT LOAM SOIL UNDER PLANTING

Xu Ligang Yang Jinsong Zhang Miaoxian

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

Abstract Effects of planting on soil salt and water transport in silt loam soil were studied by means of big column experiment in the Laboratory of Water and Salt Regime, Fengqiu Agroecologic Experimental Station, Chinese Academy of Sciences. Models of soil salt and water transport were developed separately. Also, parameters such as saturated transmissibility (θ_s), hydraulic conductivity (K), water characteristic curve $h(\theta)$ and coefficient of soil hydrodynamic dispersion (D) were measured indoors or in fields. The simulated and the measured results were analyzed and compared in detail, showing that the simulated results were very ideal. The rise of the groundwater table was of advantage to movement of salt and water in the silt loam soil column, which obviously leading to redistribution of salt in the soil column. As a result, the salt content of the soil at the depth of 20 cm was higher than that of the surface soil. So it is practicable to do numerical simulation of the soil salt and water transport by this model. Furthermore, if the actual movement of salt and water in fields should be described in detail, further study must be conducted.

Key words Planting; Soil salt and water transport; Numerical simulation; Model