文章编号:1000-7601(2017)01-0135-08

# 基于 HYDRUS 模型的盐碱地土壤水盐运移模拟

潘延鑫<sup>1,2</sup>,罗 纨<sup>1</sup>,贾忠华<sup>1</sup>,井思媛<sup>2</sup>,李 山<sup>3</sup>,武 迪<sup>3</sup>

(1.扬州大学 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225009;

2.南昌工程学院 水利与生态工程学院, 江西 南昌 330099;

3. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,陕西西安710048)

摘 要:为了解陕西卤泊滩盐碱地的水盐运移情况,基于当地 2009—2013 年田间水盐监测资料,应用饱和-非饱和土壤水分及溶质运移理论,利用 HYDRUS-1D 数值模型对当地土壤水分、盐分运移规律进行数值模拟,分析 了盐碱地的水盐变化状况,确定合理的田间灌水定额。结果表明:在玉米整个生育期内,不同灌溉处理的土壤含水 量变化趋势基本一致,从节水控盐的综合标准衡量,农田灌水定额为 500 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>时有利于控制土壤盐分的累积。 采用 HYDRUS-1D 模型对盐碱地农田土壤水盐运移的模拟结果与田间试验实测结果基本吻合,该研究结果可为类 似盐碱化地区农田水盐管理提供科学依据。

关键词:盐碱地;水盐运移;数值模拟;HYDRUS-1D 模型 中图分类号: S156.4;S274 文献标志码: A

# The simulation of water and salt transportation by HYDRUS model in Lubotan of Shaanxi, China

PAN Yan-xin<sup>1,2</sup>, LUO Wan<sup>1</sup>, JIA Zhong-hua<sup>1</sup>, JING Si-yuan<sup>2</sup>, LI Shan<sup>3</sup>, WU Di<sup>3</sup>

(1. School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

2. College of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330099, China;

3. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi' an University of Technology, Xi' an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: To determine the movement of salt and water in the saline-alkali flatland of Lubotan, Shaanxi province, based on the saturated- unsaturated soil water and solute transport theory, field monitoring data of local water and salt for many years was applied to simulate the rules of local soil water and salt movement, using the HYDRUS 1D numerical model. The soil water and salt changes were analyzed, and the reasonable field irrigation quota was proposed. The results showed that during the whole reproductive period, soil water content had a similar variation trend under different irrigation quotas. Considering water saving and salt control, farmland irrigation quota of 500 m<sup>3</sup> · hm<sup>-2</sup> is reasonable to control salt accumulation in soil. The simulated results of soil water and salt migration using HYDRUS model are basically consistent with the observed values in field experiment, and the results can be referred for farmland management of water and salt in semblable salinity regions.

Keywords: saline-alkali land; water and salt transportation; numerical simulation; HYDRUS 1D model

在世界人口增长<sup>[1]</sup>、全球耕地资源日益减少<sup>[2]</sup>的大背景下,土壤盐渍化问题<sup>[3-6]</sup>已成为制约农业可持续发展的一大瓶颈。如何对盐碱地水盐进行有效管理<sup>[7-15]</sup>,从而维持田间水盐平衡<sup>[16-19]</sup>,实现农业生产的可持续发展是当前我国经济发展和环境保护中亟待解决的科学问题。

在一些半干旱、半湿润灌区内,盐碱地治理过程 中排水沟由于排水出路受阻,并受到灌溉水或降水、 以及来自上游或周边水源补给的影响,使得排水沟 周期性地保持较高水位运行,在这种条件下,农田水 盐平衡受到影响,农田土壤是否会发生积盐而影响 作物正常生长成为关注的焦点。出现了大量关于作

#### 收稿日期:2016-01-30

作者简介:潘延鑫(1985—),男,甘肃靖远人,讲师,主要从事农田排水与水环境保护研究。E-mail:yanxinpanxaut@126.com。 通信作者:罗 约(1967—),女,新疆霍城人,教授,主要从事农业水资源保护研究。E-mail: luowan@yzu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金(51279159);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD);江西省科技厅科技支撑计划项目 (20151BBF60012)

物在较高地下水位情况下生长的水盐平衡研 究<sup>[20-23]</sup>。部分研究结果已表明,灌区排水系统运 行模式改变后,适当的农田水位管理措施可以满足 农业生产可持续发展的要求。

位于陕西省富平县境内的卤泊滩灌区在历史上 曾为古湖泊洼地,盐分累积较多,近代被开垦为农 田,但盐渍化问题一直很严重<sup>[24]</sup>。1999年,当地有 关部门通过土地平整和健全灌排系统措施,实施了 卤泊滩盐碱地深度治理。在治理过程中,受到经济 因素和环境保护要求限制,通往滩外的排水干沟未 能完成,灌溉季节的排水只能滞留在排水沟和下游 一片洼地内。由于地势较低,卤泊滩排水沟系统除 了负担本区内的灌溉排水以外,还受到两个上游引 黄灌区在灌溉季节退水的影响,沟内水位周期性的 升高。近10多年来,区内未发生大面积的盐渍化, 种植的玉米、棉花和小麦等农作物生长基本正常。 本文为了查明现有排水条件下卤泊滩盐碱地农田土 壤水盐运动的基本情况,基于田间原位水盐监测数 据,定量研究灌区农田土壤的水盐动态规律,探讨农 田水文过程变化对盐分运移的影响,从节水控盐综 合标准确定合理的田间灌水定额。以期为类似区域 盐碱地水盐调控与管理提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

试验地位于陕西省蒲城县和富平县交界处的卤 泊滩,地理位置为东109°18′~109°42′,北纬34°43′~ 34°50′,东西长约30 km,南北宽1.5~7 km,总面积 8160 hm<sup>2</sup>。其中蒲城县内7067 hm<sup>2</sup>,占全滩总面积 的86.6%,富平县内1093 hm<sup>2</sup>,占全滩总面积的 13.4%,标准田块为每块不超过4 hm<sup>2</sup>,南北方向长 400 m,东西宽100 m。研究区是一个封闭式构造洼 地,地形由西北向东南方向倾斜,土壤组成为第四纪 松散堆积物,主要由硫酸盐与氯化盐组成,地下水埋 深 1.8~2.5 m, 矿化度 2.8~3.2 g·L<sup>-1</sup>, pH 值 8.3~ 8.6<sup>[25]</sup>。区内属于半干旱大陆性气候, 多年平均降 水量 472.9 mm, 降雨年内分布极不均匀, 多集中在 7—9月份, 全年蒸发量 1 000~1 300 mm, 是年降水 量的 2~2.3 倍, 年平均气温 13.4℃, 夏季最高气温 41.8℃, 年日照时数 2 349.5~2 472.0 h, 土壤属典 型的硫酸盐盐碱土。研究区多年平均蒸发量、降水 量分配过程见图 1。



#### 1.2 试验区布置

卤泊滩灌区以种植小麦、玉米和棉花等大田作物为主,田间灌水方式以传统的地面灌溉为主,本试验中选择玉米作为研究对象。如图 2 所示,在卤泊滩盐碱地上游地段选取了两块 400 m × 100 m 农田进行观测,在每个田块中间位置布置了观测断面,每个断面上各布置 6 只 1 m 套管(见图 2),间隔 20 cm 设置一个观测点,使用 TRIME – PICO IPH TDR 逐层进行农田剖面含水量测定,观测期为 2013 年 8 月到9月,监测频度为 10 天一次,观测农田种植作物为玉米。



图 2 农田监测点设置 Fig.2 The layout of monitoring points in the testing fields

#### 1.3 HYDRUS - 1D 模型简介

HYDRUS - 1D 模型是由美国国家盐渍土改良中 心(US Salinity Laboratory)开发的一套用于模拟变饱 和多孔介质中水分、能量、溶质运移的新型数值模 型<sup>[26]</sup>。经改进与完善,得到了广泛的认可与应 用<sup>[27-28]</sup>。该模型能够较好地模拟水分、溶质与能 量在土壤中的分布以及时空变化和运移规律,分析 人们普遍关注的农田灌溉、田间施肥、环境污染等实 际问题。也可与其它地下水、地表水模型相结合,从 宏观上分析水资源的转化规律。经过众多学者的开 发研究,模型的功能更趋完善,已经非常成功地应用 于世界各地地下饱和 – 非饱和带污染物运移的研 究<sup>[29-31]</sup>。2000 年以后才引入我国,并在国内进行 了一些初步应用<sup>[32-34]</sup>。在模拟多孔介质中一维饱 和 - 非饱和水流和盐分运移时水分模拟中考虑了作物根系吸水,盐分运移方程中也包含了离子和分子的扩散、水动力扩散、线性或非线性吸附平衡以及一级衰减,适于模拟恒定或非恒定的边界条件下饱和 - 非饱和渗流区水、热及多种溶质的迁移状况。具有灵活的输入输出功能,有不同的水含量方程、植物根系作用方程、土壤介质水力参数数据库和不同植物根系作用的数据库可供选择。水分运动的模拟计算采用 Richards 方程,考虑了作物根系吸水项和土壤持水能力的滞后作用,方程解法采用 Galerkin 线性有限元法, Inverse Solution 模块中的 Marquardt - Levnenberg 参数优化算法可以反演土壤水和溶质运移、反应动力学参数等。





1.3.1 基本方程

(1) 土壤水分运动基本方程

时间单位体积土壤中根系吸水率(d<sup>-1</sup>)。

以地表为基准面,根据连续性方程和非饱和达 西定律并考虑作物根系吸水项,垂直一维土壤水分 运动的定解问题可表示为(坐标轴向下为正):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right]}{\partial z} - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - S(z,t) \quad (1)$$
  
式中,h 为土壤基质势(cm); b 为体积含水率  
(cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>); K(\theta) 为水力传导度(cm·d<sup>-1</sup>); z 为土  
壤深度,向下为正(cm); t 为时间(d); S(z,t) 为单位

土壤水力函数采用 Van Genuchten-Mualem 公 式,其表达形式如下:

$$K(\theta) = K_s \theta_e^l [1 - (1 - \theta_e^{\perp})^m]^2 \qquad (2)$$

$$\theta_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h|^n)^{-m}$$
(3)

$$m = 1 - 1/n, n > 1$$
 (4)

式中, $\theta_s$ 为土壤饱和含水率(cm<sup>3</sup> · cm<sup>-3</sup>); $\theta_r$ 为土壤 残余含水率(cm<sup>3</sup> · cm<sup>-3</sup>); $K_s$ 为土壤饱和导水率(cm · d<sup>-1</sup>); $\theta_e$ 为有效含水率(饱和度);n和 $\alpha$ 是决定土壤 水分特征曲线的形状参数经验参数;l为孔隙关联 度参数,一般取平均值 0.5。 根系吸水率表示由于根系吸水而在单位时间内 从单位体积土壤中流失的水分体积,本文采用 Feddes 提出的根系吸水模型:

 $S(z,t) = \gamma(h)S_p$   $(h_1 - h$ (5)

$$\gamma(h) = \begin{cases} \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2} & h_2 < h \le h_1 \\ 1 & h_3 \le h \le h_2 \\ \frac{h_1 - h_4}{h_3 - h_4} & h_4 < h \le h_3 \end{cases}$$
(6)

式中,*S<sub>p</sub>*为最大根系吸水速率(d<sup>-1</sup>),*h*<sub>1</sub>、*h*<sub>2</sub>、*h*<sub>3</sub>和*h*<sub>4</sub>分 别为根系吸水厌氧点土壤基质势、根系吸水最适点开 始和结束土壤基质势、根系吸水萎蔫点土壤基质势。

(2) 土壤溶质运动基本方程

以土壤可溶盐为研究对象,水流方程为基础,以 土壤水电导率为主要指标,根据多孔介质溶质运移 理论,若不考虑土壤盐分的溶解和被吸附的浓度 *S*, 建立饱和 – 非饱和土壤溶质运移对流和水动力弥 散(分子扩散与机械弥散)数学模型。

$$\theta \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \theta D \frac{\partial c}{\partial z} - qc \right]$$
(7)

式中,c为土壤溶液浓度(ms・cm<sup>-1</sup>); $\theta$  为体积含水量(cm<sup>3</sup>・cm<sup>-3</sup>);D 为水动力弥散系数(cm<sup>2</sup>・d<sup>-1</sup>);q 为渗透流速(cm・d<sup>-1</sup>)。

1.3.2 初始条件和边界条件

(1) 土壤水分运动的初始条件与边界条件

土壤水分上边界采用通量已知的第二类边界条件,逐日输入通过上边界的变量值,包括降水量、灌溉量、作物潜在蒸腾量和棵间潜在蒸发量,叶面拦截雨量忽略不计。由于表层导水率较大,即使有强度降雨或灌溉发生也会很快入渗,因此地面径流忽略不计。直接赋于实测降水量和蒸发量,而作物蒸腾采用根系吸水模块。下边界选在农田土壤剖面 100 cm 处,使用变压力水头边界,根据实测的地下水埋

深(换算成压力水头)赋值。

初始条件: $\theta(z,0) = \theta_0(z)$   $Z \leq z \leq 0$ 上边界:  $\theta(0,t) = \theta_s$  z = 0下边界:  $\theta(Z,t) = \theta_0(t)$ 

(2) 土壤溶质运动的初始条件与边界条件

土壤盐分模型上边界概化为通量边界,试验期 降水时,由于雨水电导率非常小,降雨含盐浓度赋值 为0,模型预测灌溉时赋实测的灌溉水电导率;下边 界为浓度边界,赋实测的地下水电导率值。本文根 据大田试验的监测数据,土壤溶液浓度采用土壤溶 液电导率值来反映,其单位为 ms·cm<sup>-1</sup>,上、下边界 所涉及的降水、灌溉以及地下水的浓度全部采用试 验期实测的电导率来反映。

初始条件: $c(z,0) = c_0(z)$  t = 0  $Z \leq z \leq 0$ 上边界:  $-\theta D \frac{\partial c}{\partial z} + q_z c = q_s c_s(t)$   $t \ge 0$  z = 0下边界:  $c(Z,t) = c_b(t)$ 

式中, $\theta_0$ 为土壤初始含水率(cm<sup>3</sup> · cm<sup>-3</sup>); $\theta_s$ 为土壤 饱和含水率(cm<sup>3</sup> · cm<sup>-3</sup>); $K_s$ 为土壤饱和导水率 (cm · d<sup>-1</sup>); $q_s$ 为地表水分通量(cm · d<sup>-1</sup>),蒸散取正 值,灌溉与降水入渗取负值; $c_0$ 为剖面初始土壤水 电导率(ms · cm<sup>-1</sup>); $c_s$ 为上边界流量的电导率值,当 边界流量为土壤水蒸散量或降水量时, $c_s = 0$ ,当边 界流量为灌溉水量时指灌水电导率值(ms · cm<sup>-1</sup>);  $c_b$ 为下边界潜水电导率值(ms · cm<sup>-1</sup>)。

# 2 模型参数率定与验证

#### 2.1 模型参数率定

土壤水力参数根据实测土壤粒径组成,由 Rosetta模型<sup>[35]</sup>初值给定参数初值,然后通过试验区 2009年生育期试验实测数据进行参数拟合,确定主 要特征参数数值,表1给出了调整后的Van-Genuchten-Mualem公式中各个土壤水力参数值。

表 1 土壤水分特性的 VG 模型参数

Table 1 The hydraulics properties of test soil based on the parameters of Van Genuchten model

土壤类型 Soil type	$\gamma_d$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	$\theta_r$ /(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ /(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	$\alpha$ / cm	n	$\frac{K_s}{/(\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{d}^{-1})}$	l
粉砂土 Silty soil	1.48	0.0275	0.4435	0.089	1.574	99.86	0.5

注 Note:  $\gamma_d$ ——干体积质量 dry bulk density;  $\theta_r$ ——土壤残余含水率 the residual soil water content;  $\theta_s$ ——土壤饱和含水率 the saturated soil water content;  $K_s$ ——土壤饱和导水率 the saturated hydraulic conductivity;  $\alpha_n$ ——为孔径分布指数  $\alpha$  and n are shape parameters; l——孔隙连续度 a pore connectivity parameter.

水动力弥散系数等于多孔介质中分子扩散系数(*D<sub>s</sub>*)及机械弥散系数(*D<sub>h</sub>*)之和。

一般将溶质在土壤中的分子扩散系数(D<sub>s</sub>) 仅

表示为土壤含水量的函数,与溶质浓度无关,常采用 经验公式

$$D_s(\theta) = D_0 \alpha e^{b\theta} \tag{8}$$

式中, $D_0$ 为溶质在自由水体中的扩散系数(cm· $d^{-1}$ );b为经验常数。

机械弥散系数(*D<sub>h</sub>*)与平均孔隙流速的一次方成正比,表示为

$$D_h = \lambda |v| \tag{9}$$

式中, $D_h$  为机械弥散系数( $cm^2 \cdot d^{-1}$ );v 为平均孔隙 流速( $cm \cdot d^{-1}$ ); $\lambda$  为弥散度经验常数(cm)。

Bresler 用数值模拟计算验证了 Warrick 等所做的田间咸水灌溉和淡水冲洗条件下的土壤水盐动态试验,本文参照 Bresler 所用的模拟参数,即  $D_0 = 0.04 \text{ cm}^2 \cdot d^{-1}$ 。土壤空隙渗流速度 $(q/\theta)$ 是根据水

盐耦合模型中水分运移模块计算求得; τ 为弯曲度 因子,常表示为土壤体积含水率的函数,这里弯曲系 数 τ 取 2。

$$\tau = \frac{\theta^{7/3}}{\theta_s^2} \tag{10}$$

由于该模型大多参数难以实测获得,故参考 HYDRUS-1D模型中数据库提供数值。从土壤含水 率的角度来说,当土壤含水率大于毛管破裂含水率 而小于田间持水率时植物易吸收水分,而当土壤含 水率大于凋萎含水率而小于毛管破裂含水率时,或 土壤含水率趋于饱和时,植物吸水都比较困难。试 验区种植玉米,其吸水参数取值见表 2。

表 2 玉米吸水参数取值

Table 2     Assignment of the root water uptake parameters							
参数 Parameter	$h_1$ /cm	$h_2$ /cm	$h_3(r2H)$ /cm	$h_3(r2L)$ /cm	$h_4$ / cm	r2H /(cm·d <sup>-1</sup> )	$\frac{r2L}{/(\mathrm{cm}\cdot\mathrm{d}^{-1})}$
取值 Values	- 15	- 25	- 8000	- 12000	- 24000	0.5	0.1

注:以上参数参考 Wesseling(1991)的玉米数据库。h<sub>1</sub>为根系吸水厌氧点土壤基质势;h<sub>2</sub>为根系吸水最适点开始土壤基质势;h<sub>3</sub>为根系吸水最适点结束土壤基质势;h<sub>4</sub>为根系吸水萎蔫点土壤基质势;r2H和r2L分别为两个假设的潜在作物蒸腾率。

Note: The above parameters referred Wesseling corn database (1991).  $h_1$  is the root water absorption anaerobic soil matric potential;  $h_2$  is the optimal point soil matric potential root water absorption;  $h_3$  is the optimal point over soil matric potential root water absorption;  $h_4$  is root water absorption wilting point soil matric potential; r2H and r2L are respectively two assumptions of crop potential transpiration rate.

#### 2.2 模型可靠性验证

采用试验区 2013 年玉米生育期实测土壤含水 率和土壤电导率(EC)值数据对模型进行验证,如图 4、5 所示,通过数值模拟与实测结果的对比,验证所 建立数值模型的合理性。

#### 2.3 模型应用评价

表3显示了土壤含水量、电导率(EC)模拟值与

实测值进行两配对样本 T 检验(表 3)验证模型的精 度,其中检验的样本数量为 64。结果表明:土壤含 水量和电导率配对 T 检验的显著性水平 P 值均不 在置信区间(α = 0.05),说明土壤含水率和电导率 的模拟值与实测值均无显著差异,模拟效果可以接 受,参数较为可靠,可用于实际模拟应用。



图 4 土壤剖面含水率模拟值与实测值对比

139

Fig.4 Comparison between the experiment results and the simulated results of soil water content



#### 图 5 土壤剖面电导率(EC)模拟值与实测值对比

Fig.5 Comparison between observed and simulated value of electrical conductivity(EC) at different soil layers

表 3 HYDRUS – 1D 模型模拟统计量

Table 5 The statistics of HTDRUS – TD model simulatio
---

指标 Index	差值样本 标准差 Standard deviation	T 检验 概率 P Pr > t	相关系数 Correlation coefficient
土壤含水率 Soil water content	1.203	0.812	0.914
电导率(EC) Soil electrical conductivity	1.107	0.615	0.843

# 3 情景模拟

模型模拟地下 0~100 cm 深度范围土壤,模拟 时段从 2009 年 6 月 25 日至 10 月 18 日,共计 116 d, 采用变时间步长剖分方式,据收敛迭代次数调整时 间步长。设定初始时间步长为 0.1 d,最小步长为 0.01 d,最大步长为 5 d;土壤含水量允许偏差为 0.0005,压力水头允许偏差为 1 cm。结合当地农业 生产实际的田间灌水定额,利用验证的田间水盐运 移模型,分别对 4 种情景(灌水定额 0、400、500、600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>)下的土壤水盐运移进行模拟,确定合理田 间灌水定额。

# 3.1 不同情景下土壤剖面含水率分布

图 6 显示了不同灌溉处理的土壤含水量分布。 由图 6 可以看出,在玉米整个生育期内,不同灌溉处 理的土壤含水量变化趋势基本一致。但是从不同土 壤深度来看,表层土壤 0 ~ 20 cm 平均含水量约为 0.25 cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>,随着土壤深度的增大,土壤含水量有 增大趋势,90 cm 的土壤含水量约为 0.29 cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>, 比 0 ~ 20 cm 的土壤含水量大,与上层土壤相比,90 cm 土壤含水量基本维持稳定,受灌溉影响较小。

### 3.2 不同情景下土壤剖面含盐量分布

图 7 显示了不同灌溉处理不同时期各土层土壤 EC 值分布状况。由图 7 可知,在玉米整个生育期 内,不同灌溉处理的表层土壤 0~20 cm 土壤盐分增 加明显,随着土壤深度的增大,土壤盐分含量有增大 趋势,90 cm 的土壤盐分在玉米生长期末有一定的 累积趋势,随着灌水定额的增大盐分累积的趋势有 所减少。

联合国粮农组织对作物耐盐极限与产量潜力响 应关系研究证明,不同产量潜力所要求的作物耐盐 极限值各不相同。对于本研究的作物玉米来讲,当 要求的产量潜力为 100% 时所对应的玉米耐盐阈值 为根区土壤浸提液电导率值 1.7 ms·cm<sup>-1</sup>。不同情 景灌水定额显示出灌水可以使土层 90 cm 处的盐分 维持在 0.7 ms·cm<sup>-1</sup>这样一个稳定土壤环境,从节 水控盐的综合标准衡量,农田灌水定额为 500 m<sup>3</sup>· hm<sup>-2</sup>时有利于控制土壤盐分的累积。

# 4 结 论

1)利用 HYDRUS – 1D 模型对卤泊滩盐碱地农 田土壤剖面水盐分布特征及土壤水盐运移时空变异 规律进行模拟,经田间试验实测数据验证,结果表 明,模型能够较好地模拟水盐在土壤中的分布和随 时间变化的趋势,可以用于模拟灌区农田水盐运移 规律。

2) 在玉米整个生育期内,不同灌溉处理的土壤 含水量变化趋势基本一致,表层土壤 0~20 cm 平均 含水量约为 0.25 cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>,90 cm 土壤含水量约为 0.29 cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>,土壤含水量随着灌水定额的增大而 增大。





Fig.6 The dynamic simulations of soil water content at different soil layers under different irrigation quota





Fig.7 The dynamic simulations of soil electrical conductivity (EC) at different soil layers under different irrigation norms

3) 土壤盐分在土层 90 cm 处有累积的趋势,随着灌水定额的增大盐分累积的趋势有所减小。从节水控盐的综合标准衡量,采用合理的田间灌水定额500 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>时有利于控制土壤盐分的累积。

#### 参考文献:

- Gordon F. Mulligan, Jason P. Crampton. Population growth in the world's largest cities [J]. Cities, 2005,5(22):365-380.
- [2] Falkenmark M, Finlayson M, Gordon L. Agriculture, water and ecosystems: avoiding the costs of going too far[C]//Molden D. Water

for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London UK: International Water Management Institut, 2007.

- [3] Ritzema H P, Satyanarayana T V, Raman S, et al. Subsurface drainage to combat waterlogging and salinity in irrigated lands in India: Lessons learned in farmers fields[J]. Agricultural Water Management, 2008,95(3):179-189.
- [4] Boulbaba A, Marzouk L, Rabah R, et al. Variations of natural soil salinity in arid environment using underground waterable effects on salinization of soils in irrigated perimeters in south Tunisia[J]. International Journal of Geosciences, 2012,3(5):1040-1047.

- [5] Konukcu F, GowingJ W, Rose D A. Dry drainage a sustainable solution to water logging and salinity problems in irrigation areas[J]. Agricultural water management, 2006,83(1-2):1-12.
- [6] 张展羽,张月珍,张 洁,等.基于 DRAINMOD S 模型的滨海 盐碱地农田暗管排水模拟[J].水科学进展,2012,23(6):0782-0788.
- [7] Jia Z, Luo W, Xie J. Salinity dynamics of agricultural ditches receiving drainage discharge in arid and semi-arid regions[J]. Agricultural Water Management, 2011, 100(1):9-17.
- [8] 徐 旭,黄冠华,屈忠义,等.区域尺度农田水盐动态模拟模型 --GSWAP[J].农业工程学报,2011,27(7):58-63.
- [9] 王水献,董新光,吴 彬,等.干旱盐渍土区土壤水盐运动数值 模拟及调控模式[J].农业工程学报,2012,28(13):142-148.
- [10] 徐 旭,黄冠华,黄权中.农田水盐运移与作物生长模型耦合 及验证[J].农业工程学报,2013,29(4):110-117.
- [11] 赵丽蓉,黄介生,伍靖伟,等.水管理措施对区域水盐动态的影 响[J].水利学报,2011,42(5):0514-0522.
- [12] 王少丽,许 迪,方树星,等.水管理策略对土壤水盐动态和区域地下排水影响的模拟评价[J].水利学报,2005,36(7):799-805.
- [13] Kaman H, Ozbek O. Salt and water distributions in the plant root zone under deficit irrigation[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2012, 10(3/4);496-500.
- [14] Wang Ruoshui, Kang Yaohu, Wan Shuqin, et al. Influence of different amounts of irrigation water on salt leaching and cotton growth under drip irrigation in an arid and saline area[J]. Agricultural Water Management, 2012, 110:109-117.
- [15] Gharaibeh M A, Eltaif N I, Albalasmeh A A. Reclamation of highly calcareous saline sodic siol using atriplex halinmus and by product gypsum[J]. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(9): 873-883.
- [16] 刘建刚,罗 纨,贾忠华,等.从水盐平衡的角度分析控制排水 在银南灌区实施的可行性[J].农业工程学报,2005,21(4):43-46.
- [17] 张蔚榛,张瑜芳.对灌区水盐平衡和控制土壤盐渍化的一些认识[J].中国农村水利水电,2003,(8):13-18.
- [18] 陈小兵,杨劲松,杨朝晖,等,渭干河灌区灌排管理与水盐平衡 研究[J].农业工程学报,2008,24(4):59-65.
- [19] 李 亮,史海滨,贾锦凤,等,内蒙古河套灌区荒地水盐运移规
   律模拟[J].农业工程学报,2010,26(1):31-35.
- [20] Ayars J E, Christen E W, Hornbuckle J W. Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture[J]. Agricultural Water Management, 2006,86;128-139.
- [21] Ayars J E, Christen E W, Soppe R W. et al. The resource potential of in-situ shallow ground water use in irrigated agriculture[J]. Irriga-

tion Science, 2006,24:147-160.

- [22] Doering E J, benz L C. Reichman GA Shallow-water-table concept for drainage in semi-arid and subhumid regions. In: Advances in drainage, proceedings of the 4th national drainage symposium[M]. St Joseph, Mich: ASAE, 1982;34-41.
- [23] Evans R O, Skaggs R W, Gilliam J W. Controlled versus conventional drainage effects on water quality[J]. Irrig. And Drain. Engineering, 1995, 121(4):271-276.
- [24] 潘延鑫,罗 纨,贾忠华,等.盐碱地排水沟蓄水后底泥与水体 盐分交换试验[J].农业工程学报,2013,29(2):81-87.
- [25] 韩霁昌,解建仓,王 涛,等.陕西卤泊滩盐碱地"改排为蓄"后 盐碱指标试验观测[J].农业工程学报,2009,25(6):59-65.
- [26] Simunek J, Sejna M, van Genuchten M Th. The HYDRUS 1D software package for simulating the one dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media (Version 2.0) [M]. Riverside, California: Colorado School of Mines Publishers, 1998.
- [27] M. T h. van Genuchten. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society American Journal, 1980,44:892-898.
- [28] Rassam D W, Cook F J. Numerical simulations of water flow and solute transport applied to acidsulfate soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2002,128(2):107-115.
- [29] Inoue M, Simunek J, Shiozawa S, et al. Simultaneous estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient infiltration experiments[J]. Advances in Water Resources, 2000, (23): 667-688.
- [30] 方 堃,陈效民,杜臻杰,等.低山丘陵区红壤酸雨中典型阴离子垂直迁移状况及模拟[J].农业环境科学学报,2009,28(1): 107-111.
- [31] Bristow K, Cote C M, Thorburn P J, et al. Soil wetting and solute transport in trickle irrigation systems[C]//6th International Micro-irrigation Technology for Developing Agriculture Conference Papers. Cape Town, South Africa: International Commission on Irrigation and Drainage(ICID), 2000.
- [32] 李久生,张建君,饶敏杰.滴灌施肥灌溉的水氮运移数学模拟 及试验验证[J].水利学报,2005,36(8):0932-0938.
- [33] 王建东,龚时宏,许 迪,等.地表滴灌条件下水热耦合迁移数 值模拟与验证[J].农业工程学报,2010,26(12):66-71.
- [34] 马 欢,杨大文,雷慧闽,等.Hydrus-1D模型在田间水循环规 律分析中的应用及改进[J].农业工程学报,2011,27(3):6-12.
- [35] Schaap M G, Leijf J, van Genuchten M TH. Rosetta. A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions[J]. Journal of Hydrology, 2001,251:163-176.