

# 肥液浓度对土壤水力特性参数的影响

张文平<sup>1</sup>, 聂卫波<sup>1</sup>, 马敬东<sup>1</sup>, 马孝义<sup>2</sup>

(1.西安理工大学水利水电学院, 西安 710048;

2.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为了研究不同肥液(尿素)浓度对土壤水力特性参数的影响,选取陕西省杨凌区一级阶地的砂壤土和三级阶地黏壤土为供试土壤进行一维垂直入渗试验,采用数值反演方法估算了不同肥液浓度条件下的土壤水力特性参数,并量化分析了土壤水力特性参数变化对累积入渗量的影响,最终建立了考虑肥液浓度变化的土壤水力特性参数估算式。结果表明,土壤饱和含水率 $\theta_s$ 、形状系数 $n$ 、饱和导水率 $K_s$ 均随肥液浓度的增大而逐渐增大,而进气值吸力的倒数 $\alpha$ 随肥液浓度的增大呈减小趋势;土壤水力特性参数对累积入渗量的敏感性关系为 $n > \theta_s > K_s > \alpha$ ,其中 $\alpha$ 对累积入渗量的影响 $< 10\%$ ;本试验条件下, $\theta_s$ 、 $n$ 与 $K_s$ 与肥液浓度呈指数函数关系,利用估算结果模拟了一维垂直入渗过程中的累积入渗量和剖面含水率,并与实测值进行了比较,两者具有良好的一致性,说明所建考虑肥液浓度变化的土壤水力特性参数估算式是可靠的,研究结果可为农田水肥管理提供理论依据。

**关键词:** 肥液浓度; 一维垂直入渗; 土壤水力特性参数; 数值反演

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0063-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.010

## Effect of Fertilizer Concentration on Soil Hydraulic Parameters

ZHANG Wenping<sup>1</sup>, NIE Weibo<sup>1</sup>, MA Jingdong<sup>1</sup>, MA Xiaoyi<sup>2</sup>

(1.School of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2.Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** In order to study the effect of different fertilizer concentration (Urea) on soil hydraulic parameters, the sandy loam of three-stage terrace and clay loam of the first terrace in Yangling District of Shaanxi Province are used as the test soil, the parameters of soil hydraulic under different fertilizer concentration were estimated by numerical inversion method, and analyzes the influence of the change of soil hydraulic parameters on the cumulative infiltration quantitatively, Finally, the estimation formula of soil hydraulic parameters considering the change of fertilizer concentration was established. The results showed that with the increasing of fertilizer concentration, the saturated water content ( $\theta_s$ ), shape coefficient ( $n$ ) and saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) of soil is increasing, but the suction of intake reciprocal value ( $\alpha$ ) decreased with the increasing of fertilizer concentration. The sensitivity of soil hydraulic parameters to cumulative infiltration is  $n > \theta_s > K_s > \alpha$ , and the influence of  $\alpha$  on cumulative infiltration is less than 10%. In this paper, the relationship between  $\theta_s$  and  $K_s$  and the concentration of fertilizer solution is exponential function. Utilizing estimation result simulated the cumulative infiltration amount and water content of soil profile in the process of one-dimensional vertical infiltration, and compared with the measured value, the two are showing no difference, It shows that the formula of soil hydraulic characteristic parameters considering the change of fertilizer concentration is reliable, this study can provide theoretical basis for water and fertilizer management of farmland.

**Keywords:** fertilizer concentration; one dimensional vertical infiltration; soil hydraulic parameters; numerical inversion

灌溉施肥是将化肥充分溶解后与灌溉水混合引入田间的施肥技术,与传统(化肥)撒施技术比较,其

在一定程度上提高了化肥利用率,降低了养分流失引起的农田土壤生态环境污染风险<sup>[1]</sup>。近年来,众多学

收稿日期: 2020-01-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(51579205); 陕西省自然科学基金项目(2019JM-063)

第一作者: 张文平(1992—),男,甘肃武威人,硕士研究生,主要从事农业水土工程研究。E-mail: zwping2018@126.com

通信作者: 聂卫波(1981—),男,陕西周至人,博士,教授,主要从事农业水土工程研究。E-mail: nwb2000@163.com

者<sup>[2-5]</sup>针对灌溉施肥条件下地表水肥运动过程、土壤水肥入参与再分布过程等方面进行了研究,并取得了较多成果,但采用试验研究的方法,费时费力,且研究成果大多适用于特定的试验条件下,较难推广应用。随着计算机技术的发展,数值模拟方法受到众多学者的关注,乔冬梅等<sup>[6]</sup>通过人工神经网络技术模拟再生水灌溉条件下土壤氮素的运移规律,并建立其土壤氮素运移模型,为再生水灌溉研究提供了新的途径;盛丰等<sup>[7]</sup>根据优先流发展过程中所表现出来的阶段性特征和分形特征,研究了压力水头对土壤水力特性参数和溶质运移的影响,建立了描述非均匀土壤水流运动和溶质运移过程的两区一两阶段模型;Liu 等<sup>[8]</sup>通过研究变密度流下溶质在非饱和一饱和含水系统中迁移规律,讨论了非饱和带的土壤水力特性参数对溶质穿透非饱和一饱和过渡带的影响,指出了不同含水率对土壤水力特性参数具有不同的影响;李久生等<sup>[9]</sup>模拟分析了黏壤土和砂壤土滴灌条件下土壤水分和硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )的运移特性,并采用肥液入渗试验对模拟结果进行了验证,结果表明模拟值与实测值一致性较好;任长江等<sup>[10]</sup>对传统以含水率为变量的水动力参数模型进行改进,建立了反映水盐耦合关系的水动力参数模型,具有较好的计算精度,能够对复杂情况下的水盐运移问题进行数值模拟;郝芳华等<sup>[11]</sup>模拟了田间施肥方式,并结合室内一维垂直入渗试验进行了验证,结果表明该模型能够较好的模拟田间氮素运移的实际情况,并发现尿素在表施方式下

可以有效防止氮素的深层渗漏。综上所述,以往研究取得了较多的研究成果,并较好地揭示土壤水肥运移规律,但大多研究过程中较少考虑肥液浓度变化对土壤水力特性参数的影响,在模拟过程中通常采用定值,导致模拟结果与实际存在一定差异。基于此,本文以黏壤土和砂壤土不同肥液(尿素)浓度条件下的一维垂直入渗试验为基础,采用数值反演方法估算不同肥液浓度条件下的土壤水力特性参数,通过量化分析土壤水力特性参数变化对累积入渗量的影响,最终建立考虑肥液浓度变化的土壤水力特性参数估算式,以为农田水肥管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

杨凌区位于陕西省关中平原中部( $107^{\circ}59' - 108^{\circ}08'E, 34^{\circ}14' - 34^{\circ}20'N$ ),属于典型的半干旱半湿润气候区。杨凌区地形由南部渭河滩起向北逐渐升高,大致分布有 3 级阶地,其中一级阶地以砂壤土为主,往北到二、三级阶地土壤质地主要为黏壤土。根据研究区域的地形地貌特征,在位于一级阶地法西村和三级阶地王上村典型农田采集土样作为试验供试土壤,土样采集深度为 0—40 cm。将采集的土样风干后用烘干法测定土壤滞留含水率( $\theta_r$ );采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定土样颗粒组成,同时利用 SMARTCHEM 450 全自动间断化学分析仪测定土样中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量,尿素态氮含量采用紫外分光光度计测定。试验土壤特性见表 1。

表 1 试验土壤特性参数

| 取样<br>地点 | 土壤<br>质地 | $\theta_r /$<br>( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | $\text{NO}_3^- - \text{N} /$<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | $\text{NH}_4^+ - \text{N} /$<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 尿素态氮/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 土壤颗粒组成/%            |                              |                          |
|----------|----------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|------------------------------|--------------------------|
|          |          |                                                        |                                                                      |                                                                      |                                               | $<0.002 \text{ mm}$ | $0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$ | $0.02 \sim 2 \text{ mm}$ |
| 一级阶地     | 砂壤土      | 0.055                                                  | 4.08                                                                 | 5.63                                                                 | 23.75                                         | 15.86               | 25.71                        | 58.43                    |
| 三级阶地     | 黏壤土      | 0.041                                                  | 7.49                                                                 | 4.01                                                                 | 19.87                                         | 28.63               | 34.25                        | 37.12                    |

注: $\theta_r$ 为滞留含水率; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为硝态氮; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为铵态氮。

### 1.2 试验设计

尿素是目前我国使用量最大的氮肥<sup>[12]</sup>,故本文选取浙江鑫建环保科技有限公司生产的尿素(总氮含量 $\geq 46.0\%$ )作为供试肥料。根据本文研究目的,试验于 2019 年 4 月在西北农林科技大学灌溉实验站进行,将土样风干碾压并过 2 mm 筛,按照设定的土壤初始含水率和采样田块实测容重(砂壤土和黏壤土容重  $\gamma_d$  分别为  $1.45, 1.35 \text{ g/cm}^3$ )分层(5 cm)填入直径 14 cm,高 70 cm 的土柱;土柱周围布设排气孔,防止气阻影响。综合考虑已有资料研究过程中所设置的肥液浓度范围<sup>[13-15]</sup>,结合文中试验研究目的,尿素质量浓度设置 6 个水平,即分别为 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 g/L,土壤初始含水率  $\theta_0$ 。砂壤土为 0.073, 0.131  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,黏壤土为 0.108, 0.162  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。砂壤土

和黏壤土质地条件下各设计 12 个处理,每个处理设置 2 次重复。试验过程中,结合田间地面灌溉实际情况,采用马氏筒将入渗水头控制在 5 cm 左右;同时按照先密后疏的原则记录不同入渗时间的入渗量和湿润锋运移距离;直到土壤湿润锋运移至距离土柱底部 20 cm 处停止供水,并立即吸出土柱上层积水。试验结束后,沿土柱垂直方向每隔 10 cm 收集土样,用于土壤含水率、硝态氮、铵态氮、尿素态氮的测定。

### 1.3 数值模拟

1.3.1 水分运动控制方程 假设土壤为均质且各向同性的多孔介质,忽略温度与气相对土壤水分的影响,同时不考虑根系吸水与汇源项。以含水率为因变量的一维垂直入渗土壤水分运动方程公式为:

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

式中: $z$  为平面坐标(规定向下为正)(cm); $t$  为入渗时间(min); $K(h)$  土壤导水率(min/cm), $K(h)$  可采用 van—Genuchten—Mualem(VG—M)模型进行计算,即:

$$K(h)=\begin{cases} K_s S_e^l (1-(1-S_e^{l/m})^m)^2 & h<0 \\ K_s & h\geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S_e=\begin{cases} \frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\frac{1}{(1+|\alpha h|^n)^m} & h<0 \\ 1 & h\geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $S_e$  为土壤相对饱和度; $K_s$  为土壤饱和导水率(cm/min); $\theta$  为体积含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $\theta_s$  为土壤饱和含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $\theta_r$  为土壤滞留含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $\alpha$  为进气值吸力的倒数( $1/\text{cm}$ ); $m$ 、 $n$  为形状系数, $m=1-1/n$ ;  $l$  为土壤水力特征曲线拟合系数,通常取值 0.5。

1.3.2 边界条件与初始条件 在积水入渗试验进行的过程中,上边界为恒定的压力水头;下边界为自由排水界面。在试验过程中,湿润锋始终未能到达下边界,土柱为半无限土体。因此,边界条件可以表示为:

$$\begin{cases} h=4.5\text{ cm}, z=0 & t\geq 0 \quad (\text{上边界}) \\ q/t=0 & t\geq 0 \quad (\text{下边界}) \end{cases} \quad (4)$$

试验土样为均质且各向同性的多孔介质,初始含水率分布均匀,故初始条件可以表示为:

$$\theta(0,0)=\theta_0 \quad (\text{初始含水率}) \quad (5)$$

1.4 误差分析指标

本文采用入渗试验实测值和模拟值间的均方根误差(RMSE)、纳什效率系数( $E_{NS}$ )和平均绝对误差(MAPE)作为误差分析指标,其中 RMSE、 $E_{NS}$ 、MAPE 计算公式分别为:

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(x_i-y_i)^2} \quad (6)$$

$$E_{NS}=1-\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-y_i)^2}{\sum_{i=1}^n(x_i-x_v)^2} \quad (7)$$

$$\text{MAPE}=\sum_{i=1}^n\left|\frac{x_i-y_i}{x_i}\right|\times\frac{100}{n} \quad (8)$$

式中: $x_i$  为实测值; $y_i$  为模拟值; $n$  为样本数; $x_v$  为实测值的均值。RMSE 和 MAPE 越接近 0,表示模拟值与实测值差异越小; $E_{NS}$  用来衡量模拟值与实测值之间的拟合度,该值越接近于 1,表明模拟值越接近实测值,模型效率越高,适用性越好。

1.5 土壤水力特性参数对累积入渗量的敏感性分析

以反演所得土壤水力特性参数作为基准,采用单因素局部扰动分析法<sup>[16]</sup>,即模拟过程中 1 个参数在基准参数的基础上进行变动,而其他参数不变,以分析各土壤水力特性参数对累积入渗量的敏感性。根据相关研究<sup>[17-18]</sup>可知,在 VG—M 模型参数对土壤入

渗特征的敏感性分析过程中,各参数的变化幅度大多在 20% 的范围内。因此,本文研究过程中土壤水力特性参数  $\theta_s$ 、 $a$ 、 $n$  和  $K_s$  的变化幅度分别采用  $\pm 20\%$  和  $\pm 10\%$ ,以反演所得土壤水力特性参数模拟的累积入渗量为基准(表 2),定量分析各参数对累积入渗量的敏感性,其累积入渗量变化幅度计算公式为:

$$\Delta i=\frac{I_i-I_0}{I_0}\times 100\% \quad (9)$$

式中: $\Delta i$  为累积入渗量变化幅度; $I_i$  为模型第  $i$  次运行输出值; $I_0$  为参数率定后计算结果初始值。

2 结果与分析

2.1 土壤水力特性参数反演与验证

砂壤土和黏壤土分别以土壤初始含水率为 0.073、0.108  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  的试验数据为基础,利用肥液入渗试验结束时实测的土壤含水率数据,采用数值反演方法确定不同尿素浓度条件下 VG—M 模型中的土壤水力特性参数(表 3)。由于研究<sup>[19-20]</sup>表明, $\theta_r$  对土壤水分运动过程影响较小,故反演过程中对于  $\theta_r$  采用给定值,即土壤风干状态下的含水率。结果表明,相同土壤质地不同肥液浓度条件下反演所得土壤水力特性参数  $\theta_s$ 、 $n$  和  $K_s$  随着肥液浓度的增大逐渐增大,但  $a$  的变化趋势与之相反,其与肥液浓度为 0 时反演所得土壤水力特性参数具有一定的差异性;同时,显著性检验结果表明肥液浓度为 0 时反演所得土壤水力特性参数与其他肥液浓度所得结果差异显著( $P<0.05$ ),其中黏壤土和砂壤土条件下显著性指标最高分别为 0.045 ( $K_s$ )和 0.024( $\theta_s$ ),进一步说明不同肥液浓度条件下反演所得土壤水力特性参数具有一定的差异性。

为验证不同肥液浓度条件下土壤水力特性参数反演结果的可靠性,以表 2 反演所得参数为基础,对黏壤土和砂壤土初始含水率  $\theta_0$  分别为 0.162、0.131  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  条件下的肥液入渗过程进行模拟,并与实测的累积入渗量和土壤剖面含水率进行比较(图 1)。为了便于分析,模拟时间与相应试验处理的入渗时间保持一致。

由图 1 可知,不同土壤质地条件下采用参数反演结果模拟所得一维垂直入渗过程的累积入渗量和土壤剖面含水率与实测值具有高的一致性,由此说明反演所得土壤水力特性参数是可靠的;将模拟所得一维垂直入渗过程数据和实测值分别带入公式(6)、公式(7)和公式(8),量化计算两者间的差异,结果见表 3。黏壤土不同肥液入渗条件下,累积入渗量和剖面含水率分布实测值和模拟值的均方根误差(RMSE)、纳什效率系数( $E_{NS}$ )和平均绝对误差(MAPE)均值分别为 0.205 cm,0.987,5.675% 和 0.038  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,0.782,7.063%;砂壤土累积入渗量和剖面含水率分

布实测值和模拟值的 RMSE、 $E_{NS}$  和 MAPE 均值分别为 0.311 cm, 0.971, 3.788% 和  $0.022\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 0.883, 5.95%, 说明反演所得土壤水力特性参数是可靠的;同时,显著性检验结果表明,黏壤土和砂壤土条件下累积入渗量模拟值和实测值的显著性指标最小分别为 0.323 和 0.184,剖面含水率的显著性指标最小分别为 0.421 和 0.243( $P<0.05$ ),说明模拟值和实测值差异不显著,具有高的一致性,进一步说明反演所得土壤水力特性参数是可靠的,能够用于模拟一维

垂直入渗土壤水分运动过程。对模拟值和实测值存在误差的原因进行分析(表 3),主要为同一土壤质地验证试验所采用的水力特性参数均为表 2 中相同肥液浓度条件下试验数据反演所得参数,其验证试验与反演参数的入渗试验的初始含水率有所差异,且虽然采用马氏瓶控制入渗水头,但试验过程中不同处理下的入渗水头可能会出现小的波动;同时,试验过程中也不可避免的存在测量误差,如土壤设计容重的装填误差、试验数据观测误差等。

表 2 不同肥液浓度的土壤水分特性参数反演结果

| 土壤质地 | 土壤容重 $\gamma_d/$<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 肥液浓度 $C/$<br>( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | $\theta_s/$<br>( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | $a$    | $n$   | $K_s/$<br>( $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) |
|------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------|-------|-----------------------------------------------|
| 黏壤土  | 1.35                                                  | 0                                             | 0.375                                               | 0.0039 | 1.321 | 0.0086                                        |
|      |                                                       | 0.2                                           | 0.376                                               | 0.0038 | 1.375 | 0.0087                                        |
|      |                                                       | 0.4                                           | 0.379                                               | 0.0037 | 1.438 | 0.0090                                        |
|      |                                                       | 0.6                                           | 0.383                                               | 0.0036 | 1.506 | 0.0093                                        |
|      |                                                       | 0.8                                           | 0.385                                               | 0.0035 | 1.531 | 0.0099                                        |
|      |                                                       | 1.0                                           | 0.388                                               | 0.0034 | 1.551 | 0.0103                                        |
| 砂壤土  | 1.45                                                  | 0                                             | 0.311                                               | 0.0048 | 1.413 | 0.0285                                        |
|      |                                                       | 0.2                                           | 0.312                                               | 0.0047 | 1.453 | 0.0297                                        |
|      |                                                       | 0.4                                           | 0.317                                               | 0.0046 | 1.487 | 0.0314                                        |
|      |                                                       | 0.6                                           | 0.325                                               | 0.0045 | 1.532 | 0.0328                                        |
|      |                                                       | 0.8                                           | 0.326                                               | 0.0044 | 1.548 | 0.0346                                        |
|      |                                                       | 1.0                                           | 0.327                                               | 0.0043 | 1.561 | 0.0357                                        |

注:砂壤土初始含水率  $\theta_0=0.073\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ;黏壤土初始含水率  $\theta_0=0.108\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

表 3 实测值与模拟值的误差分析

| 土壤质地 | 初始含水率 $\theta_0/$<br>( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 肥液浓度 $C/$<br>( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 累积入渗量       |          |            | 土壤剖面含水率                                       |          |            |
|------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|----------|------------|-----------------------------------------------|----------|------------|
|      |                                                           |                                               | RMSE/<br>cm | $E_{NS}$ | MAPE/<br>% | RMSE/<br>( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | $E_{NS}$ | MAPE/<br>% |
| 黏壤土  | 0.162                                                     | 0                                             | 0.016       | 0.996    | 6.64       | 0.048                                         | 0.688    | 6.12       |
|      |                                                           | 0.2                                           | 0.143       | 0.997    | 3.06       | 0.040                                         | 0.756    | 8.12       |
|      |                                                           | 0.4                                           | 0.195       | 0.994    | 4.12       | 0.036                                         | 0.802    | 7.06       |
|      |                                                           | 0.6                                           | 0.424       | 0.973    | 7.49       | 0.041                                         | 0.728    | 8.21       |
|      |                                                           | 0.8                                           | 0.375       | 0.980    | 6.41       | 0.029                                         | 0.872    | 5.96       |
|      |                                                           | 1.0                                           | 0.078       | 0.980    | 6.33       | 0.032                                         | 0.847    | 6.91       |
|      |                                                           | 均值                                            | 0.205       | 0.987    | 5.68       | 0.038                                         | 0.782    | 7.06       |
| 砂壤土  | 0.131                                                     | 0                                             | 0.251       | 0.980    | 2.93       | 0.036                                         | 0.719    | 8.87       |
|      |                                                           | 0.2                                           | 0.257       | 0.976    | 3.46       | 0.023                                         | 0.882    | 5.45       |
|      |                                                           | 0.4                                           | 0.313       | 0.967    | 4.04       | 0.020                                         | 0.916    | 5.04       |
|      |                                                           | 0.6                                           | 0.399       | 0.955    | 5.12       | 0.016                                         | 0.946    | 4.25       |
|      |                                                           | 0.8                                           | 0.335       | 0.970    | 4.15       | 0.016                                         | 0.945    | 4.54       |
|      |                                                           | 1.0                                           | 0.311       | 0.975    | 3.03       | 0.023                                         | 0.894    | 7.55       |
|      |                                                           | 均值                                            | 0.311       | 0.971    | 3.79       | 0.022                                         | 0.883    | 5.95       |

注:RMSE、 $E_{NS}$  和 MAPE 分别表示实测值和模拟值的均方根误差、纳什效率系数和平均绝对误差。

2.2 土壤水力特性参数敏感性分析

以反演所得土壤水力特性参数(表 2)对黏壤土和砂壤土不同初始条件下的累积入渗量进行模拟,并

将该模拟结果作为基准值;采用单因素局部扰动量化分析  $\theta_s$ 、 $a$ 、 $n$  和  $K_s$  的不同变化幅度条件下对累积入渗量的敏感性,模拟结果见图 2 和表 4。

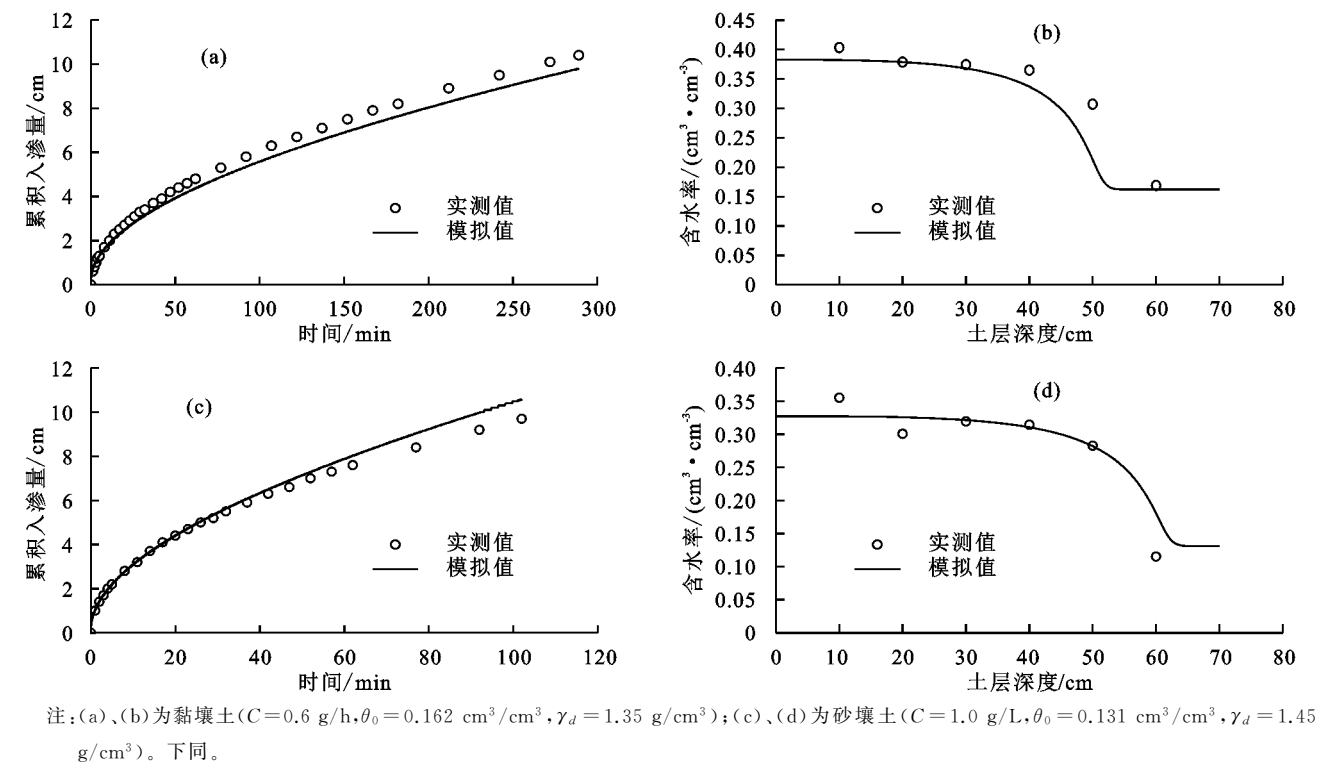


图 1 累积入渗量和剖面含水率分布的模拟值与实测值的对比

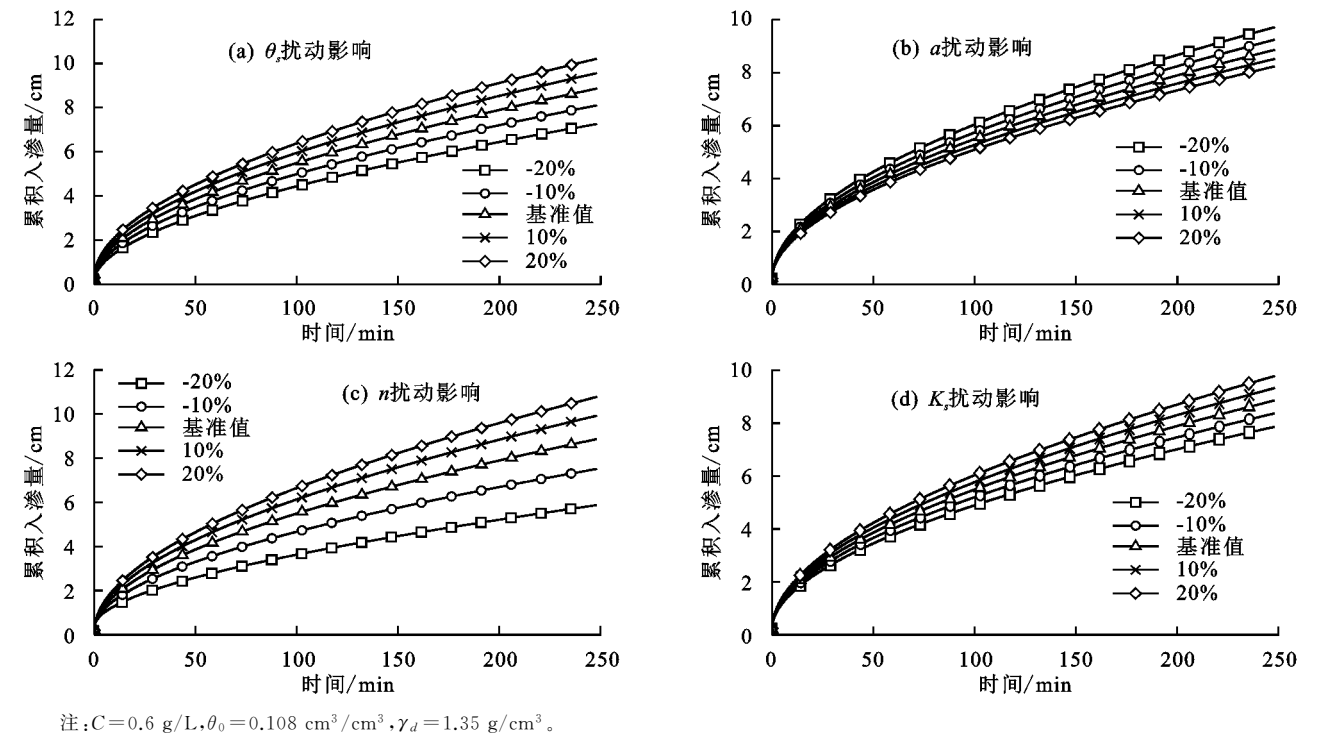


图 2 土壤水力特性参数变化对累积入渗量的影响

由图 2 和表 4 可知,黏壤土和砂壤土肥液入渗条件下,  $\theta_s$  负扰动时累积入渗量减大幅度分别为 8.46%~17.79%和 7.83%~16.37%,正扰动时增加幅度分别为 7.81%~15.13%和 7.18%~12.85%,说明  $\theta_s$  的变化与累积入渗量呈正相关,即相同初始条件下,累积入渗量随土壤饱和含水率  $\theta_s$  的增大而增加,原因为  $\theta_s$  增大说明土壤团聚体间的空隙增多<sup>[21]</sup>,进而储水能力增大,在相同时间内累积入渗量会增加; $\alpha$  负扰动时累积入渗量

增加幅度分别为 4.62%~9.86%和 4.89%~9.71%,正扰动时减大幅度分别为 3.79%~4.14%和 2.58%~4.95%,说明  $\alpha$  的变化与累积入渗量呈负相关,原因为  $\alpha$  与进气吸力是倒数关系,其值增大说明土壤相应的进气值吸力就会减小,土壤导水能力将减弱<sup>[22]</sup>,进而使得相同入渗时间内的累积入渗量减少;黏壤土条件下  $n$  负扰动时累积入渗量减大幅度为 14.23%~32.15%,正扰动增加幅度为 11.18%~20.13%,砂壤土负扰动时减大幅度为

13.59%~29.45%，正扰动增加幅度为 12.74%~22.36%，说明  $n$  的变化与累积入渗量呈正相关，原因为  $n$  与土壤的孔径分布有关<sup>[23]</sup>， $n$  值越大，说明土壤的通气透水能力增强，导致相应的时间段入渗量增加； $K_s$  负扰动时累积入渗量减小幅度分别为 5.51%~11.28% 和 4.96%~11.01%，正扰动时增加幅度分别为 5.30%~10.40% 和 6.45%~11.88%，说明  $K_s$  的变化与累积入渗量呈正相关，原因为  $K_s$  增大说明土壤的空隙逐

渐增大<sup>[24]</sup>，在一定程度上促进了土壤入渗能力。

由上述分析可知，参数  $\theta_s$ 、 $\alpha$ 、 $n$  和  $K_s$  均对累积入渗量的变化有一定程度的影响，其敏感性大小关系为  $n > \theta_s > K_s > \alpha$ ，其中  $\alpha$  敏感性最小，这与高志鹏等<sup>[25]</sup>和张海阔等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。研究结果表明，在模拟土壤肥液入渗过程中，须考虑肥液浓度对  $\theta_s$ 、 $n$  和  $K_s$  影响，而  $\alpha$  对累积入渗量的影响  $< 10\%$ （表 4），可忽略肥液浓度对其影响。

表 4 土壤水力特性参数变化对累积入渗量的影响

| 土壤<br>质地 | 土壤容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 入渗<br>时间/min | 参数         | I 变幅  |       |       |       | 均值    |
|----------|--------------------------------|--------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          |                                |              |            | -20%  | -10%  | 10%   | 20%   |       |
| 黏壤土      | 1.35                           | 250          | $\theta_s$ | 18.05 | 8.60  | 7.84  | 14.01 | 16.59 |
|          |                                |              | $\alpha$   | 9.37  | 4.27  | 3.65  | 6.20  | 8.10  |
|          |                                |              | $n$        | 36.10 | 16.64 | 13.51 | 24.45 | 28.66 |
|          |                                |              | $K_s$      | 11.27 | 5.75  | 5.30  | 10.41 | 10.91 |
|          |                                |              | $\theta_s$ | 16.37 | 7.83  | 7.18  | 12.85 | 15.22 |
| 砂壤土      | 1.45                           | 100          | $\alpha$   | 9.71  | 4.89  | 2.58  | 4.95  | 7.65  |
|          |                                |              | $n$        | 29.45 | 13.59 | 12.74 | 22.36 | 24.21 |
|          |                                |              | $K_s$      | 11.01 | 4.96  | 6.45  | 11.88 | 11.47 |

注：模拟过程中砂壤土初始含水率  $\theta_0=0.073\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ；黏壤土初始含水率  $\theta_0=0.108\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

2.3 肥液浓度变化的土壤水力特性参数估算与验证

以表 2 中肥液浓度为 0, 0.2, 0.6, 1.0 g/L 反演的土壤水力特性参数为基础，建立其与肥液浓度间的函数关系；由上述分析可知，模拟不同肥液浓度入渗过程时， $\alpha$  对累积入渗量影响较小，故忽略肥液浓度对其影响，仅建立  $\theta_s$ 、 $n$ 、 $K_s$  与肥液浓度之间的函数关系。采用线性函数、指数函数、二次抛物线函数对  $\theta_s$ 、 $n$ 、 $K_s$  与不同肥液浓度进行拟合分析。结果表明，在本文研究条件下，土壤水力特性参数  $\theta_s$ 、 $n$ 、 $K_s$  与肥液浓度间可采用指数函数表征，其决定系数均  $> 0.910$ （表 5），且高于采用线性函数和二次抛物线函数的拟合效果。

表 5 土壤水力特性参数与肥液浓度间的函数关系

| 土壤<br>质地 | 初始<br>含水率 | 水力<br>参数   | 函数<br>关系                     | 决定<br>系数 |
|----------|-----------|------------|------------------------------|----------|
| 黏壤土      | 0.108     | $\theta_s$ | $y=0.3747\text{e}^{0.0353x}$ | 0.979    |
|          |           | $n$        | $y=1.3319\text{e}^{0.1660x}$ | 0.953    |
|          |           | $K_s$      | $y=0.0085\text{e}^{0.1852x}$ | 0.977    |
| 砂壤土      | 0.073     | $\theta_s$ | $y=0.3105\text{e}^{0.0573x}$ | 0.917    |
|          |           | $n$        | $y=1.4220\text{e}^{0.1016x}$ | 0.954    |
|          |           | $K_s$      | $y=0.0285\text{e}^{0.2267x}$ | 0.999    |

注：0 g/L  $\leq x \leq 1$  g/L。

采用表 5 所建的指数函数关系式，分别计算得到了黏壤土和砂壤土肥液浓度为 0.4, 0.8 g/L 条件下的  $\theta_s$ 、 $n$  和  $K_s$  值，并以此为基础对其入渗过程进行模拟，其中  $\theta_r$  采用表 1 中数据， $\alpha$  采用表 2 中清水入渗（肥液浓度为 0 g/L）反演结果。黏壤土和砂壤土不同肥液入渗条件下，累积入渗量和剖面含水率分布模拟值和实测值比较结果见图 3 和表 6。结果表明，模

拟值和实测值具有良好的一致性，其中黏壤土不同肥液入渗条件下，累积入渗量和剖面含水率分布实测值和模拟值的 RMSE、 $E_{NS}$  和 MAPE 均值分别为 0.230 cm, 0.995, 2.78% 和 0.013 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, 0.983, 3.36%；砂壤土累积入渗量和剖面含水率分布实测值和模拟值的 RMSE、 $E_{NS}$  和 MAPE 均值分别 0.247 cm, 0.991, 2.85% 和 0.011 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, 0.984, 4.13%，说明本文所建考虑肥液浓度变化的土壤水力特性参数估算式具有高的精度；同时，显著性检验结果表明黏壤土和砂壤土条件下累积入渗量模拟值和实测值的显著性指标最小分别为 0.225 和 0.147，剖面含水率的显著性指标最小分别为 0.364 和 0.217 ( $P < 0.05$ )，说明模拟值和实测值差异不显著，具有高的一致性，进一步说明了本文所建考虑肥液浓度变化的土壤水力特性参数估算式是可靠的。

3 讨论

本研究结果表明，肥液浓度对土壤水力特性参数有一定的影响，其中  $\theta_s$ 、 $n$  和  $K_s$  随着肥液浓度的增大逐渐增大，但  $\alpha$  的变化趋势与之相反（表 2），这与聂坤堃等<sup>[27]</sup>、董晓华等<sup>[28]</sup>、冯珏<sup>[29]</sup>的研究结果一致，原因可能为：（1）肥液入渗前土壤表面有许多带负电荷的胶体<sup>[30]</sup>，入渗过程中由于尿素溶液中含有大量带正电荷的  $\text{NH}_4^+$ ，其吸附于土壤表面胶体，在一定程度上改变了的空隙结构，使得土壤入渗能力增强；（2）随着肥液浓度增大，尿素溶液改善了土壤中团聚体的分布<sup>[31]</sup>，特别是水稳性团聚体数量增多，进而引

起土壤结构和空隙度的改变,这在一定程度上也增强了土壤入渗能力;(3)随着尿素溶液浓度增大,湿润锋界面溶质势也逐渐增大<sup>[32]</sup>,使得总水势的势能差也逐渐变大,进而影响了土壤入渗能力。

本文采用指数函数估算不同肥液浓度条件下的土壤水力特性参数,结果表明其具有高的估算精度。但同时需注意,从水—溶质动力学理论分析而言,土壤水力特性参数  $\theta_s$ 、 $n$ 、 $K_s$  与肥液浓度间应符合抛物物

线型函数,原因为当肥液(尿素)浓度较小时,在入渗过程中改变了土壤空隙结构,同时增大了湿润锋界面处的溶质势,使得总水势的势能差逐渐变大,在一定程度上增强了土壤入渗能力;但随着肥液浓度的进一步增加,导致水的黏滞性增大,即水的流动性变差,将降低土壤水的入渗能力。由于本文试验设置的肥液浓度梯度较小(0~1.0 g/L),无法体现该过程,对于该峰值还需进一步研究。

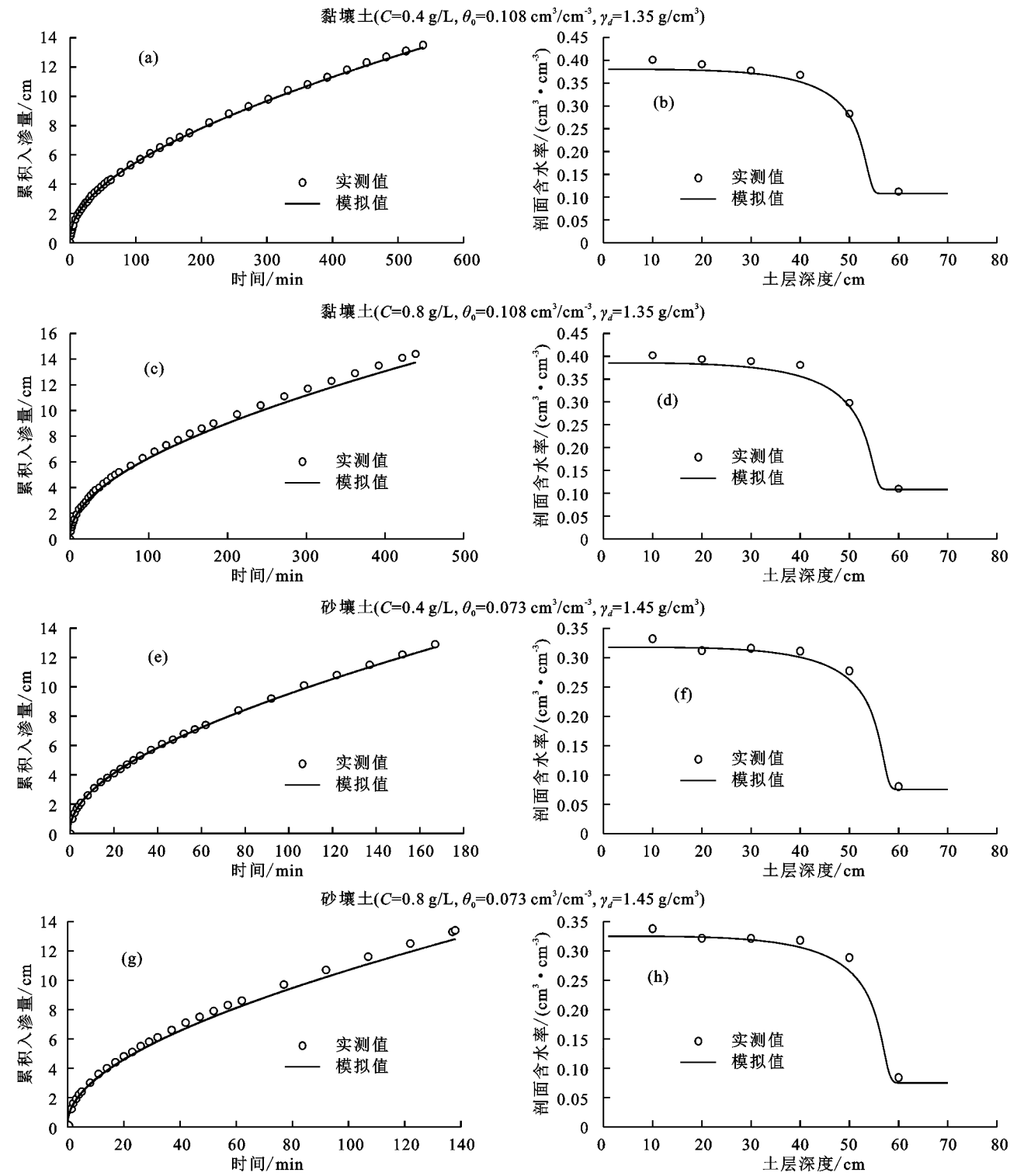


图 3 典型土壤质地累积入渗量和含水率分布模拟值与实测值对比

表 6 实测值与模拟值误差分析

| 土壤质地 | $\theta_0/$<br>( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 肥液浓度 $C/$<br>( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 累积入渗量   |          |        | 剖面含水率                                           |          |        |
|------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------|----------|--------|-------------------------------------------------|----------|--------|
|      |                                                       |                                                 | RMSE/cm | $E_{NS}$ | MAPE/% | RMSE/<br>( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | $E_{NS}$ | MAPE/% |
| 黏壤土  | 0.108                                                 | 0.4                                             | 0.102   | 0.999    | 1.35   | 0.012                                           | 0.985    | 3.25   |
|      |                                                       | 0.8                                             | 0.357   | 0.991    | 4.21   | 0.014                                           | 0.980    | 3.48   |
|      |                                                       | 均值                                              | 0.230   | 0.995    | 2.78   | 0.013                                           | 0.983    | 3.36   |
| 砂壤土  | 0.073                                                 | 0.4                                             | 0.110   | 0.998    | 1.17   | 0.009                                           | 0.987    | 3.69   |
|      |                                                       | 0.8                                             | 0.384   | 0.983    | 4.52   | 0.012                                           | 0.981    | 4.56   |
|      |                                                       | 均值                                              | 0.247   | 0.991    | 2.85   | 0.011                                           | 0.984    | 4.13   |

注:RMSE、 $E_{NS}$  和 MAPE 分别表示实测值和模拟值的均方根误差、纳什效率系数和平均绝对误差;黏壤土和砂壤土土壤容重分别为 1.35、1.45  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\theta_0$  为初始含水率。

4 结 论

(1)采用数值反演方法估算了黏壤土和砂壤土不同肥液(尿素)浓度下的土壤水力特性参数,并对参数反演结果进行了验证,结果表明,肥液浓度对土壤水力特性参数有一定的影响,其中土壤饱和含水率  $\theta_s$ 、形状系数  $n$ 、饱和导水率  $K_s$  均随肥液浓度的增大而逐渐增大,而进气值吸力的倒数  $\alpha$  随肥液浓度的增大呈减小趋势;采用参数反演结果对不同肥液浓度入渗过程进行了模拟,其累积入渗量和剖面含水率模拟值和实测值一致性良好,其中累积入渗量模拟值和实测值的均方根误差(RMSE)均值为 0.258 cm,纳什效率系数( $E_{NS}$ )均值为 0.975,平均绝对误差(MAPE)均值为 4.74%;土壤剖面含水率模拟值和实测值的 RMSE 均值为 0.030  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,  $E_{NS}$  均值为 0.833, MAPE 均值为 6.51%。由此表明,不同肥液浓度下的土壤水力特性参数反演结果是可靠的。

(2)分析了土壤水力特性参数对累积入渗量的敏感性。结果表明,  $\theta_s$ 、 $\alpha$ 、 $n$ 、 $K_s$  对累积入渗量的敏感性大小关系为  $n > \theta_s > K_s > \alpha$ , 其中  $\alpha$  对累积入渗量的影响  $< 10\%$ 。因此,在模拟土壤肥液入渗过程中,可忽略肥液浓度对  $\alpha$  的影响,但须充分考虑肥液浓度对  $\theta_s$ 、 $n$  和  $K_s$  影响。

(3)建立了考虑肥液浓度变化的土壤水力特性参数( $\theta_s$ 、 $n$  和  $K_s$ )估算式,并进行了验证。结果表明,在本文试验条件下  $\theta_s$ 、 $n$  与  $K_s$  与肥液浓度呈指数函数关系,其决定系数均  $> 0.910$ ;采用所建公式估算了黏壤土和砂壤土肥液浓度为 0.4、0.8  $\text{g}/\text{L}$  下的  $\theta_s$ 、 $n$ 、 $K_s$  值,并利用估算结果模拟了一维垂直入渗过程中的累积入渗量和剖面含水率,结果表明累积入渗量模拟值和实测值的 RMSE 均值为 0.238 cm,  $E_{NS}$  均值为 0.993, MAPE 均值为 2.81%;土壤剖面含水率模拟值和实测值的 RMSE 均值为 0.012  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,  $E_{NS}$  均值为 0.983, MAPE 均值为 3.74%,说明本文所建考虑肥液浓度变化的土壤水力特性参数估算式是可靠的。

参考文献:

[1] Brunetti G, Simunek J, Bautista E. A hybrid finite volume-finite element model for the numerical analysis of furrow irrigation and fertigation[J].Computers and Electronics Agriculture,2018,150:312-327.

[2] Dai W, Zhang S H, Xu D, et al. Efficient simulation of surface solute transport in basin fertigation[J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2017,143(11): 401-412.

[3] Sabillón G N, Merkley G P. Fertigation guidelines for furrow irrigation[J].Spanish Journal of Agricultural Research,2004,2(4):576-587.

[4] Ebrahimian H, Liaghat A, Parsinejad M, et al. Optimum design of alternate and conventional furrow fertigation to minimize nitrate loss[J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2013,139(11):911-921.

[5] Aimunek J, Bristow K L, Helalia S A, et al. The effect of different fertigation strategies and furrow surface treatments on plant water and nitrogen use[J].Irrigation Science,2016,34(1): 53-69.

[6] 乔冬梅,齐学斌,庞鸿宾,等.基于 BP 神经网络的土壤氮素运移模型[J].节水灌溉,2008(1):1-4.

[7] 盛丰,王康,张仁铎,等.土壤非均匀水流运动与溶质运移的两区—两阶段模型[J].水利学报,2015,46(4):433-442.

[8] Liu Y, Kuang X, Jiao J J, et al. Numerical study of variable-density flow and transport in unsaturated-saturated porous media[J].Journal of Contaminant Hydrology,2015,182:117-130.

[9] 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):932-938.

[10] 任长江,王建华,赵勇,等.改进的水动力参数模型在非饱和土壤溶质运移问题中的应用[J].水动力学研究与进展(A 辑),2018,33(4):480-489.

[11] 郝芳华,孙雯,曾阿妍,等.HYDRUS-1D 模型对河套灌区不同灌施情景下氮素迁移的模拟[J].环境科学学报,2008,28(5): 853-858.

[12] 唐敏,许文来,郭宗会.施肥过程中尿素的迁移与转化研究[J].绿色科技,2017(6):59-61.

[13] 李京玲,陈攀,孙西欢,等.蓄水坑灌肥液入渗下土壤水氮运移特性试验研究[J].灌溉排水学报,2017,36(10):56-61.

[14] 刘利华,费良军,陈琳,等.膜孔直径对浑水膜孔灌土壤水氮运移特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):126-131.

[15] 聂卫波,马孝义,聂坤堃,等.沟灌土壤湿润体空间矩特征参数估算模型[J].水科学进展,2017,28(6):829-838.

[16] 鲁程鹏,束龙仓,刘丽红,等.基于灵敏度分析的地下水数值模拟精度适应性评价[J].河海大学学报(自然科学版),2010,38(1):26-30.

[17] 范严伟,赵文举,毕贵权.Van Genuchten 模型参数变化对土壤入渗特性的影响分析[J].中国农村水利水电,2016(3):52-56.

[18] Lu X H, Jin M G, van Genuchten M T, et al. Ground-water recharge at five representative sites in the Hebei Plain, China[J].Ground Water,2011,49(2):286-294.

[19] 王志涛,缴锡云,韩红亮,等.土壤垂直一维入渗对 VG 模型参数的敏感性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(1):80-84.

[20] 刘昭,杨文元,查元源,等.基于田块尺度含水率观测的土壤水力参数多模型反演[J].农业工程学报,2015,31(6):135-144.

[21] 仵峰,张凯,宰松梅,等.小麦玉米秸秆掺土还田量对土壤水分运动特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(24):101-105.

[22] 董晓华,郭梁锋,马海波,等.尿素浓度对土壤水分特征曲线及持水性的影响研究[J].节水灌溉,2018(1):45-47,51.

[23] 霍思远,靳孟贵, Van Genuchten 模型参数对降水入渗数值模拟的敏感性[J].地球科学,2017,42(3):447-452,470.

[24] 毛娜,黄来明,邵明安.黄土区坡面尺度不同植被类型土壤饱和导水率剖面分布及影响因素[J].土壤,2019,51(2):381-389.

[25] 高志鹏,屈吉鸿,陈南祥,等.一维水流及溶质运移对 VG 模型参数的敏感性分析[J].节水灌溉,2017(11):65-71,76.

[26] 张海阔,姜翠玲,李亮,等.基于 HYDRUS-1D 模拟的变水头入渗条件下 VG 模型参数敏感性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):32-40.

[27] 聂坤堃,聂卫波,白清俊.沟灌肥液入渗硝态氮运移特性数值模拟及影响因素分析[J].农业工程学报,2019,35(17):128-139.

[28] 董晓华,郭梁锋,马海波,等.尿素浓度对土壤水分特征曲线及持水性的影响研究[J].节水灌溉,2018(1):45-47,51.

[29] 冯场.不同水肥热条件下土壤水分运动参数与氮素转化参数研究[D].太原:太原理工大学,2017.

[30] 何振嘉,傅渝亮,王博,等.涌泉根灌不同浓度肥液入渗特性及土壤湿润体模型研究[J].农业工程学报,2018,34(24):90-99.

[31] 何振嘉,傅渝亮.涌泉根灌湿润体水氮运移特性试验研究[J].排灌机械工程学报,2019,37(1):73-79.

[32] 刘小刚,朱益飞,余小弟,等.不同水头和土壤容重下微润灌湿润体内水盐分布特性[J].农业机械学报,2017,48(7):189-197.

(上接第 62 页)

[23] 张兴奇,顾礼彬,张科利,等.坡度对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):18-22,72.

[24] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):39-43.

[25] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.

[26] 王蕙,胡秀君,山成菊.雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):24-29.

[27] 汤珊珊,李占斌,李聪,等.模拟降雨条件下覆沙坡面产流产沙过程研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(5):139-146.

[28] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等.降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):147-154,182.

[29] 吴发启,范文波.土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2005,3(2):97-101.

[30] 温磊磊,郑粉莉,杨青森,等.雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究[J].水利学报,2012,43(9):1084-1091.

[31] 王志伟,陈志成,艾钊,等.不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012,26(6):17-20,26.

[32] 王丽园,查轩,黄少燕,等.不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):40-44.