

doi:10.3799/dqkx.2017.034

# Van Genuchten 模型参数对降水入渗数值模拟的敏感性

霍思远<sup>1,2,3</sup>, 靳孟贵<sup>2,3\*</sup>

1. 长江大学资源与环境学院, 湖北武汉 430100

2. 中国地质大学盆地水文过程与湿地生态恢复学术创新基地, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 详细分析不同评价指标下的 van Genuchten 方程参数敏感性, 对于深入认识参数物理意义、合理确定参数值、提高降水入渗数值模拟准确性具有重要意义。用 HYDRUS 软件建立一维变饱和和水分运移模型, 以实际补给量、补给过程曲线和极限蒸发深度作为评价指标, 采用单因素扰动分析法对 van Genuchten 方程各参数敏感性进行理论分析, 进而选取多组参数实例, 分析同一岩性类别下, 不同土样土壤水力参数差异及其对入渗补给模拟结果的影响。结果表明: 形状系数( $n$ )、土壤进气值的倒数( $\alpha$ )与极限蒸发深度呈负相关关系, 是影响极限蒸发深度的显著因素; 饱和含水率( $\theta_s$ )、 $n$ 、饱和渗透系数( $K_s$ )对于入渗补给影响的敏感性较高, 三者在实际土样粒径分布、干密度和孔隙性的共同影响下发生同向变动。合理的参数敏感性分析及数值模拟调参过程需结合土壤参数的物理意义来开展。

**关键词:** van Genuchten 模型; 参数敏感性分析; 降水入渗; 数值模拟; HYDRUS; 水文地质。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2017)03-0447-06

收稿日期: 2016-09-20

## Effect of Parameter Sensitivity of van Genuchten Model on Numerical Simulation of Rainfall Recharge

Huo Siyuan<sup>1,2,3</sup>, Jin Menggui<sup>2,3\*</sup>

1. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. Laboratory of Basin Hydrology and Wetland Eco-Restoration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The van Genuchten model is frequently used in expression of soil lithology and hydraulic feature of vadose zone. The included soil hydraulic parameters are sensitive factors in numerical simulation of rainfall recharge. It facilitates the understanding of the physical meaning of parameters, improving accuracy of numerical simulation of rainfall recharge and parameters regulation to analyze the sensitivity of each soil hydraulic parameter. In this study, one-dimensional variably saturated flow models were established by using HYDRUS software. Simulations were run under conditions of multiple sets of parameters which are set in the principle of changing one parameter and keeping the others invariant to evaluate parameter sensitivity of van Genuchten model by using actual recharge quantity, recharge process curve and maximum evaporation depth as the index. The case study chose multiple sets of measured parameters to evaluate the influence of parameter variation among different samples of the same lithology. The simulations results show that maximum evaporation depth is significantly affected by the  $n$  and  $\alpha$  which are negatively related to it;  $\theta_s$ ,  $n$ , and  $K_s$  have a high sensibility to the variation of vertical groundwater recharge, however they will change with porosity, grain size distribution and bulk density of soil at the same time. It is concluded that the reasonable analysis of parameter sensitivity can only be done in combination of the study of their physical meaning.

**Key words:** van Genuchten model; parameter sensibility analysis; rainfall recharge; numerical simulation; HYDRUS; hydrogeology.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (Nos. U1403282, 41602246).

**作者简介:** 霍思远 (1988-), 男, 讲师, 博士, 主要从事地下水与环境的教学与研究. ORCID: 0000-0001-8733-8829. E-mail: huosiyuan-10@163.com

\* **通讯作者:** 靳孟贵, ORCID: 0000-0002-0125-4286. E-mail: mgjin@cug.edu.cn

**引用格式:** 霍思远, 靳孟贵, 2017. Van Genuchten 模型参数对降水入渗数值模拟的敏感性. 地球科学, 42(2): 447-452.

基于包气带的变饱和数值模拟法是评价降水入渗补给的有效手段 (Allison, 1994; Scanlon, 2002)。数值模型对入渗补给各影响因素的参数化处理是实现其定量评价入渗补给过程及补给量的重要前提,但也是数值模拟结果不确定性的潜在来源。参数敏感性分析对于确定模型关键参数、控制模型效率、提高模型准确性具有重要意义 (田雨等, 2010)。

包气带岩性相对于降水、灌溉、水位埋深等因素具有更高的随机性,其决定了包气带水力特征,是导致数值模拟结果不确定性的首要因素。包气带水力特征(岩性)一般采用 van Genuchten 方程 (van Genuchten, 1980; Vogel and Cislervová, 1988)、Brooks-Corey 方程 (Brooks and Corey, 1964)、Dual-porosity model 方程 (Durner, 1994)、Lognormal Distribution 方程 (Kosugi, 1996) 等土壤水力模型来表征。其中 van Genuchten 方程是定量刻画包气带岩性及其水力特征的常用模型,模型主要参数包括:残余含水率  $\theta_r$ 、饱和含水率  $\theta_s$ 、饱和渗透系数  $K_s$ 、土壤进气值(土壤由饱和态转变为非饱和态的临界值)的倒数  $\alpha$ 、和表征土壤孔隙分布尺寸的形状系数  $n$ 。前人针对 van Genuchten 方程的参数敏感性研究 (毕经纬等, 2003; 孟江丽, 2004; Jimenez-Martinez *et al.*, 2009; Lu *et al.*, 2011; 王志涛等, 2013), 发现  $n$ 、 $\theta_s$ 、 $K_s$  的扰动对于实际补给量的影响较大,而  $\theta_r$ 、 $\alpha$  的敏感性较小。然而,入渗补给评价包括补给量和补给响应两个方面,仅以实际补给量作为评价指标无法充分反映其敏感性信息。当水位埋深较浅时,有效补给(入渗蒸发)是反映降水对地下水可更新资源量补给意义的合理指标 (Huo *et al.*, 2014), 极限蒸发深度作为决定有效补给量的重要因素,其相对于土壤水力参数的敏感程度仍不明确;而当水位埋深较大时,入渗补给评价侧重于深厚包气带的补给响应调节作用 (霍思远, 2015), 但土壤水力参数对于补给响应的鲜有报道。详细分析不同评价指标下的土壤水力参数敏感性,对于深入认识参数物理意义、合理确定参数值、提高降水入渗数值模拟准确性具有重要意义。

本文利用 HYDRUS 软件 (Simunek *et al.*, 2008) 建立一维变饱和水分运移模型,分别以实际补给量、补给过程曲线和极限蒸发深度作为评价指标,采用单因素扰动分析法对 van Genuchten 方程各参数敏感性进行理论分析。选取多组参数实例,分析同一岩性类别下,不同土样土壤水力参数差异及其对入渗补给模拟结果的影响,进一步论证 van Genu-

chten 方程各参数敏感性。

## 1 数值模拟

### 1.1 概念模型

构建一维均质变饱和水分运动模型,控制水位埋深 10 m 且稳定不变,模拟不同水力特征包气带在给定 10 cm/d 单次降水条件下的入渗补给规律。

### 1.2 数学模型

$$\begin{cases} c(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z}, \\ h(z, t) = h_0(z), t = 0, \\ -K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = P - E - R_{off}, \\ h(z, t) |_{z=B} = h(B, t), t > 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $h$  为土壤负压 (cm);  $c(h)$  为容水度 ( $\text{cm}^{-1}$ );  $K(h)$  为土壤非饱和水力传导度 (cm/d);  $h_0$  为初始土壤负压值 (cm);  $P$  为降水量 (cm/d);  $E$  为蒸发量 (cm/d);  $R_{off}$  为地表径流 (cm/d);  $t$  为时间 (d);  $B$  为模型下边界。

HYDRUS 通过式 (2) 限定模型的上边界通量计算:

$$\begin{cases} q \leq q_p, E \leq E_p, \\ h_A \leq h(0, t) \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $q$  为上边界实际入渗量 (cm/d);  $q_p$  为上边界潜在入渗量 (cm/d), 由表层岩性及含水率决定;  $E$  为蒸发量 (cm/d);  $E_p$  为土壤潜在蒸发量 (cm/d);  $h(0, t)$  为地表土壤负压 (cm);  $h_A$  为地表土壤允许的最小负压值 ( $h_A = -10\ 000$  cm)。

当计算的地表土壤负压值小于  $h_A$  时,模型上边界转变为定水头边界来计算 (取  $h = h_A$ ); 当地表土壤负压满足式 (2) 时,上边界为变流量边界,实际入渗量受潜在入渗量限制,当降水强度大于潜在入渗能力时,产生地表径流。

表征土壤水分特征曲线及非饱和水力传导度的 van Genuchten 方程 (van Genuchten, 1991) 如下:

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

$$K(\theta) = \begin{cases} K_s S_e^1 [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2, & h < 0, \\ K_s, & h \geq 0, \end{cases} \quad (4)$$

表 1 敏感性分析参数设置  
Table 1 Parameter list of sensitive analysis

砂质壤土	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$ (1/cm)	$n$	$K_s$ (cm/d)
原值	0.065	0.410	0.075 0	1.890	106.10
增加	0.097 5( $\theta_r+$ )	0.615( $\theta_s+$ )	0.112 5( $\alpha+$ )	2.835( $n+$ ) 2.58( $n_1+$ )	159.15( $K_s+$ )
减小	0.032 5( $\theta_r-$ )	0.205( $\theta_s-$ )	0.037 5( $\alpha-$ )	1.2( $n-$ )	53.05( $K_s-$ )

注:数值后括号代表相应模型代号,如“ $n+$ ”、“ $n_1+$ ”、“ $n-$ ”分别代表在不改变其他参数的前提下,将  $n$  值增加 50%、增加 36.5%和减小 36.5%。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad (5)$$

式中: $\theta_r$  为土壤残余含水率(%); $\theta_s$  为土壤饱和含水率(%); $\alpha$ 、 $n$ 、 $m$  为土壤水分特征曲线形状参数; $K$  为饱和水力传导度(cm/d); $S_e$  为有效饱和度。

### 1.3 数值模型设计

**1.3.1 离散化** 采用等间隔剖分方式,以 10 cm 为间隔将包气带剖分为 100 个网格.模拟时长为 2 435 d,采用变时间步长,初始时间步长 1 d,最小时间步长 0.001 d,最大时间步长 2 d.

**1.3.2 参数设计** 选取软件岩性数据库中的砂质壤土作为基础参数,在不改变其他参数的前提下,将某一水力参数增大或减小 50%,并以补给过程曲线、补给量和极限蒸发深度作为评价指标分析其敏感性,由于  $n > 1$  的条件限制,将  $n$  增大 50%的同时,做增大或减小 36.5%的处理(表 1).参数增减幅度的设定需同时满足显著性及合理性两方面要求,为了直观表征并对比各参数改变后补给过程曲线、土壤水分特征曲线和剖面总水势梯度的整体变化趋势及其物理意义,文中各参数均设定相同的增减幅度;同时,本文选定的砂质壤土岩性粗细适中且基础数值近似表征了砂质壤土参数平均值,结合前人的参数敏感性研究(Lu *et al.*, 2011),各参数 50%的增减变化幅度处于合理区间。

**1.3.3 边界条件及初始条件** 模型上边界为大气边界,受降水、土壤蒸发、地表径流影响,忽略根系吸水作用.如图 1 所示,10 cm/d 的降水发生在模

拟第一天,此后为持续蒸发过程,土壤蒸发量根据潜在蒸发量和土壤含水率由 HYDRUS 软件自动计算.潜在蒸发量( $E_p$ )据栾城地区  $E_{20}$  实测蒸发量通过公式(6)折算.下边界为变压力水头边界,控制水位埋深变化.模型通过循环迭代计算获取稳定剖面含水率分布作为初始条件。

$$E_p = \beta E_{20}, \quad (6)$$

式中: $E_p$  为土壤潜在蒸发量(cm/d); $E_{20}$  为实测蒸发量(cm/d); $\beta$  为折算系数,本文取  $\beta = 0.5$ 。

## 2 结果及讨论

### 2.1 土壤水力参数对水分特征曲线的影响

土壤水力参数变化直接决定了水分特征曲线形状及非饱和导水率的大小,从而影响水分在包气带中的入渗规律(图 2).从土壤水分特征曲线来看, $\theta_r$ 、 $\theta_s$  分别对高吸力(低含水率)段和低吸力(高含水率)段影响显著; $n$  的变化会影响土壤水分特征曲线的弯曲程度及整体形状; $\alpha$  减小则会使曲线整体抬升; $K_s$  的变化对水分特征曲线影响不大.对土壤渗透性而言, $\theta_s$ 、 $n$ 、 $K_s$  是影响非饱和渗透系数的主要参数,而  $\alpha$  及  $\theta_r$  的影响较不明显,其中  $\theta_r$  在高吸力阶段的非饱和导水率数值虽然相对差异较大,但其绝对数值很小,因此渗透性变化不大。

### 2.2 土壤水力参数对入渗补给的影响

各土壤水力参数对水分特征曲线及非饱和导水率不同程度的影响是导致参数敏感性差异的主要原因.从补给响应来看(图 3), $\theta_s$  对于补给过程曲线的影响最大,且与之呈负相关关系,这是由于  $\theta_s$  增大后,同一体积含水率对应的负压值增大,土壤渗透性降低,补给过程曲线出现削峰、滞后、延迟的响应.与  $\theta_s$  的作用相反, $n$ 、 $K_s$ 、 $\theta_r$  与补给过程曲线正相关,其中  $n$  的扰动影响最大, $\alpha$  对于补给过程曲线的影响最小。

笔者统计补给起始时间、补给时长、补给峰值大小及出现时刻等描述补给过程曲线的特征指标(图 4),得出土壤水力参数的敏感性由大到小排序为:

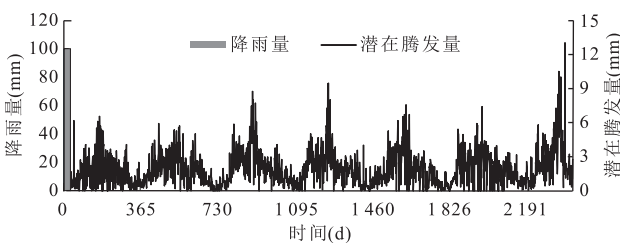


图 1 模型上边界条件

Fig.1 The upper boundary condition of model

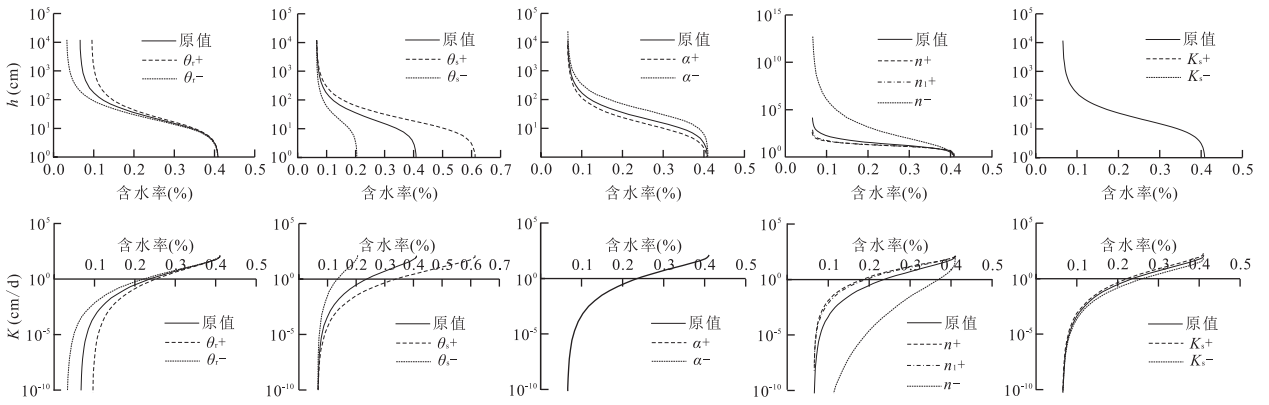


图 2 土壤水力参数对水分特征曲线及非饱和渗透系数的影响

Fig.2 Effects of soil hydraulic parameters on soil water characteristic curve and unsaturated coefficient of permeability

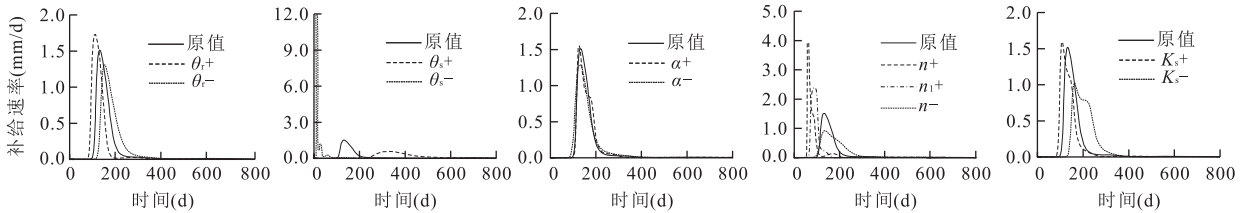


图 3 土壤水力参数对补给过程曲线的影响

Fig.3 Effects of soil hydraulic parameters on recharge process curve

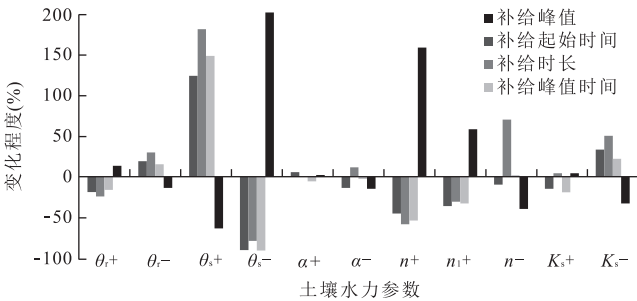


图 4 补给过程曲线特征变化程度

Fig.4 The variation of characteristic indexes of recharge process curve

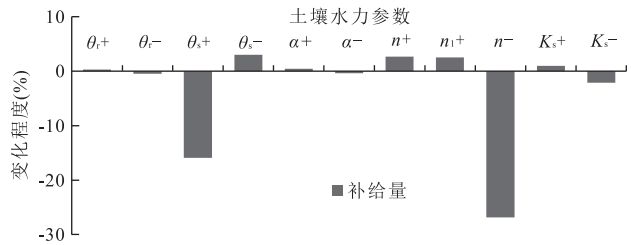


图 5 补给量变化程度

Fig.5 The variation of recharge quantity

$\theta_s, n, K_s, \theta_r, \alpha$ .从补给量来看(图 5),  $\theta_s, n, K_s$  对于补给量的影响较为显著, 而  $\theta_r, \alpha$  的敏感性较小, 这与以补给过程曲线为评价指标得到的规律基本一致.

### 2.3 土壤水力参数对极限蒸发深度的影响

极限蒸发深度是指蒸发作用所能驱动的包气带水向地表运移的最大深度, 其是计算降水入渗潜在补给量的上界面. 入渗水流在极限蒸发深度以上运移时, 会被蒸发作用消耗, 这既包括补充前期蒸发引起的包气带水分亏缺, 也包括当次入渗补给过程中的蒸发损耗. 当入渗水流运移到极限蒸发深度以下

时, 便不再会形成蒸发驱动的上升水流, 均能到达潜水面形成补给. 因此, 降水入渗补给量的计算断面必须位于极限蒸发深度以下.

极限蒸发深度由包气带岩性特征所决定, 岩性越细极限蒸发深度越大, 但不同水力参数对极限蒸发深度的影响存在差异. 如图 6 所示, 总水势梯度为正时代表水分向上运动, 负值代表向下运动, 在长期蒸发条件下(无降水), 总水势梯度 0 点所处位置即为土壤极限蒸发深度. 笔者对比不同参数对剖面总水势梯度的影响, 得出  $n$  和  $\alpha$  的敏感性较高(图 7).  $\alpha$  为土壤进气值的倒数, 代表土壤由饱和态转变为非饱和态的临界点, 当  $\alpha$  减小时, 进气值增大, 孔径变细, 毛细作用增强, 极限蒸发深度变大.  $n$  一定程度上反映了土壤孔隙分布尺寸,  $n$  较小时, 土壤介质

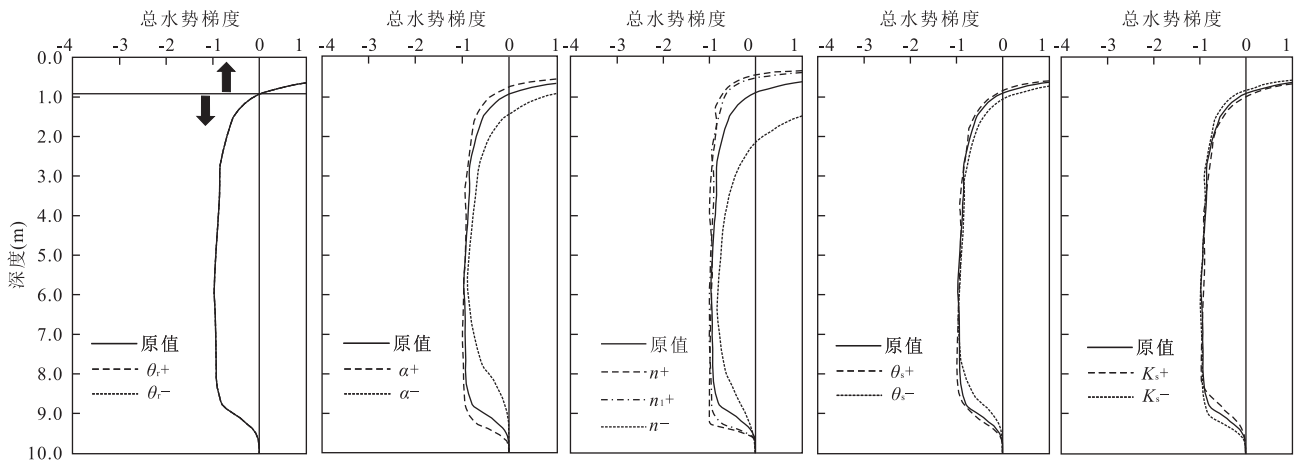


图 6 土壤水力参数对总水势梯度的影响

Fig.6 Effects of soil hydraulic parameters on total soil water potential gradient

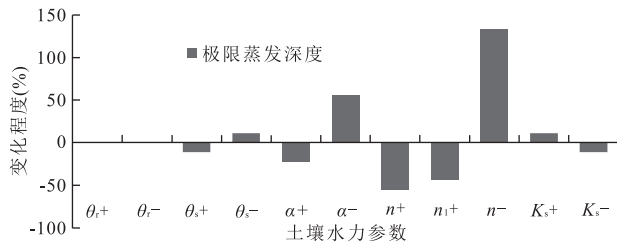


图 7 土壤水力参数对极限蒸发深度的影响

Fig.7 Effects of soil hydraulic parameters on maximum evaporation depth

中的细小孔隙增多,具有较强的粘滞力,颗粒间毛细作用增大,极限蒸发深度增大.

值得注意的是,此处所述的极限蒸发深度与“地下水蒸发的极限埋深”并不相同,后者通常指潜水蒸发量或地表蒸发量为零时的地下水最大埋深,其为表征潜水蒸发规律的重要指标.在相同的条件下,包气带的极限蒸发深度要小于地下水蒸发的极限埋深,这是由于潜水面以上存在一定范围的毛细饱和

带,只有毛细饱和和带也处于极限蒸发深度以下时,潜水面才能达到极限埋深.

### 2.4 实例分析

单因素扰动敏感性分析通过限定单一变量的变化范围可以准确地获取某一参数的敏感性信息,但其没有考虑参数与所代表的土壤岩性之间以及不同参数之间的相互关系.在实际条件下,特定岩性对应的土壤水力参数存在一定的变化区间,因此模拟过程中参数调整要限定在合理的范围内,否则会造成人为改造的土壤在实际中并不存在.基于以上原因,笔者根据野外钻孔资料,针对华北平原广泛分布的 3 种土壤类型:砂壤土、粉砂质粘壤土、壤土,采集多组原状土样,运用激光粒度仪测定其颗粒组分,并测定其干密度;土壤水力参数采用 Ku-Pf Apparatus (DT04-01)进行室内测定,并通过 RETC 软件(van Genuchten *et al.*, 1991)拟合.基于所测数据分析同一岩性条件下土壤水力参数对入渗补给过程的影响,进一步讨论及验证之前通过单因素扰动敏感性

表 2 华北平原参数实例

Table 2 Measured parameter of North China plain

位置	岩性	编号	粒径分布			干密度(g/cm <sup>3</sup> )	土壤水力参数				
			砂粒(%)	粉粒(%)	黏粒(%)		$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$ (1/cm)	$n$	$K_s$ (cm/d)
辛集		1	82.19	13.45	4.38	1.41	0.042 7	0.407 9	0.040 7	1.871 1	193.96
桃园	砂壤土	2	74.04	20.16	5.78	1.58	0.037 4	0.358 5	0.043 7	1.560 9	58.81
藁城		3	56.51	29.65	13.84	1.72	0.039 6	0.325 4	0.033 2	1.289 5	10.28
桃园	粉砂质	1	32.19	51.77	15.99	1.46	0.055 0	0.376 1	0.006 9	1.591 6	14.51
正定	黏壤土	2	21.29	60.74	17.92	1.58	0.058 7	0.366 2	0.006 6	1.577 1	8.04
正定		3	20.19	59.68	20.14	1.63	0.060 4	0.360 3	0.007 2	1.535 5	5.43
桃园	壤土	1	54.46	35.67	9.85	1.39	0.041 3	0.384 2	0.017 0	1.464 6	41.60
大河		2	52.96	37.14	9.88	1.47	0.039 8	0.366 7	0.017 9	1.449 4	30.12
藁城		3	41.31	44.04	14.68	1.67	0.043 0	0.328 7	0.015 4	1.385 3	7.40

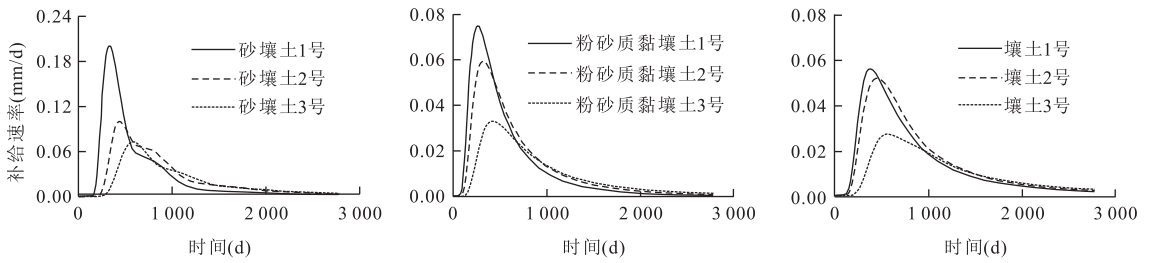


图 8 不同岩性及参数条件下的补给过程曲线

Fig.8 The corresponding recharge process curve of different instance parameter

分析得到的结果。

岩性表征了一定粒径分布区间内的土壤,因此在同一岩性类别下,不同土样之间存在粒径分布差异及干密度差异,这导致了土壤水力参数的变异性。如表 2 所示,土样中砂粒组分减少,粉粒、黏粒组分增加会造成土壤干密度增加、孔隙度减小、渗透性变差,导致土壤水力参数中敏感性较强的  $\theta_s$ 、 $n$  及  $K_s$  减小,最终使补给过程曲线峰值减小且更为滞后、平缓(图 8),这表明单因素扰动敏感性分析得出的  $\theta_s$  与补给过程之间的负相关关系并不合理, $\theta_s$  减小虽然会使同一含水率对应的负压值减小,土壤渗透性更接近于饱和状态,但饱和渗透系数  $K_s$  往往与  $\theta_s$  一同随土壤孔隙度的减小而减小,因此总体上土壤渗透性是降低的。

以上实例分析表明,在分析包气带岩性及土壤水力参数对入渗补给规律的影响时,需结合土壤水力参数的物理意义及表征的土壤特性方能得出准确、合理的结论。

### 3 结论

(1)以单因素为扰动变量的敏感性分析表明  $\theta_s$ 、 $n$ 、 $K_s$  对于入渗补给影响的敏感性较高, $n$ 、 $K_s$  与补给量和补给响应呈正相关关系。

(2) $n$ 、 $\alpha$  对于极限蒸发深度的影响较为显著,极限蒸发深度与  $n$ 、 $\alpha$  呈负相关关系。

(3) $\theta_s$ 、 $n$ 、 $K_s$  由实际土样的粒径分布、干密度和孔隙性共同决定,三者一同发生同向变动,合理的参数敏感性分析及数值模拟调参过程需结合土壤参数的物理意义来开展。

### References

Allison, G. B., Gee, G. W., Tyler, S. W., 1994. Vadose-Zone Techniques for Estimating Groundwater Recharge in

Arid and Semiarid Regions. *Soil Science Society of America Journal*, 58(1): 6–14. doi:10.2136/sssaj1994.03615995005800010002x

Bi, J. W., Zhang, J. B., Chen, X. M., et al., 2003. Modeling of Soil Water Drainage and Nitrate N Leaching in Arable Soils. *Journal of Irrigation and Drainage*, 22(6): 23–26 (in Chinese with English abstract).

Brooks, R. H., Corey, A. T., 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. *Hydrology Paper*, 3: 27.

Durner, W., 1994. Hydraulic Conductivity Estimation for Soils with Heterogeneous Pore Structure. *Water Resource Research*, 30(2): 211–223. doi:10.1029/93WR02676

Huo, S. Y., Jin, M. G., Liang, X., et al., 2014. Changes of Vertical Groundwater Recharge with Increase in Thickness of Vadose Zone. *Journal of Earth Science*, 25(6): 1043–1050. doi:10.1007/s12583-014-0486-7

Huo, S. Y., 2015. Research on the Effect of Water Table Decline on Vertical Groundwater Recharge: A Case Study in the North China Plain (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 29–30 (in Chinese with English abstract).

Jimenez-Martinez, J., Skaggs, T. H., van Genuchten, M. T. V., et al., 2009. A Root Zone Modeling Approach to Estimating Groundwater Recharge from Irrigated Areas. *Journal of Hydrology*, 367(1–2): 138–149. doi: org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.002

Kosugi, K., 1996. Lognormal Distribution Model for Unsaturated Soil Hydraulic Properties. *Water Resource Research*, 32(9): 2697–2703. doi:10.1029/96WR01776

Lu, X. H., Jin, M. G., van Genuchten, M. T. V., et al., 2011. Groundwater Recharge at Five Representative Sites in the Hebei Plain, China. *Ground Water*, 49(2): 286–294. doi:10.1111/j.1745-6584.2009.00667.x

Meng, J. L., 2004. Numerical Modeling of Water and Salt Movement and Drainage System (Dissertation). Xingjiang Agricultural University, Urumchi, 35–36 (in Chinese with English abstract).

(下转 470 页)

tional, 123(1): 1–15. doi: 10.1111/j.1365-246X.1995.tb06658.x

Taner, M. T., Koehler, F., Sheriff, R. E., 1979. Complex Seismic Trace Analysis. *Geophysics*, 44(6): 1041–1063. doi: 10.1190/1.1440994

Xi, X., Yao, Y., 2004. The Analysis of the Wave Field Characteristics in 2D Viscoelastic Random Medium. *Progress in Geophysics*, 19(3): 608–615 (in Chinese with English abstract).

Xu, F. K., Liu, Z. F., Zhang, Z. Q., et al., 2015. Double Difference Relocation and Focal Mechanisms of the Jinggu  $M_s$  6.6 Earthquake Sequences in Yunnan Province in 2014. *Earth Science*, 40(10): 1741–1754 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2015.156

## 附中文参考文献

陈林, 宋海斌, 2009. 地震信号瞬时频率的估算. *地球物理学报*, 52(1): 206–214.

狄帮让, 裴正林, 夏吉庄, 等, 2009. 薄互层油藏模型黏弹性波方程正演模拟研究. *石油地球物理勘探*, 44(5): 622–629.

酆少英, 龙长兴, 高锐, 等, 2010. 高分辨折射和浅层反射地震方法在活断层探测中的联合应用. *地震学报*, 32(6): 718–724.

顾勤平, 康清清, 许汉刚, 等, 2013. 薄覆盖层地区隐伏断层及其上断点探测的地震方法技术——以废黄河断层为例. *地球物理学报*, 56(5): 1609–1618.

贺赤诚, 李献瑞, 王杰, 等, 2015. 云南迪庆 5.9 级地震构造背景、深部流变结构与发震机制. *地球科学*, 40(10): 1653–1666.

何正勤, 潘华, 胡刚, 等, 2010. 核电厂址隐伏断裂探测中的地震勘探方法研究. *地球物理学报*, 53(2): 326–334.

兰晓雯, 晏信飞, 王成虎, 2008. 地震正演模拟在高分辨率隐伏断层地震勘探中的应用. *地震工程学报*, 30(4): 354–359.

李庆忠, 魏继东, 2007. 高密度地震采集中组合效应对高频截止频率的影响. *石油地球物理勘探*, 42(4): 363–369.

奚先, 姚姚, 2004. 二维粘弹性随机介质中的波场特征分析. *地球物理学进展*, 19(3): 608–615.

徐甫坤, 刘自凤, 张竹琪, 2015. 2014 年云南景谷  $M_s$  6.6 地震序列重定位与震源机制解特征. *地球科学*, 40(10): 1741–1754.

\*\*\*\*\*

(上接 452 页)

Scanlon, B. R., Healy, R. W., Cook, P. G., 2002. Choosing Appropriate Techniques for Quantifying Groundwater Recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 18–39. doi: 10.1007/s10040-001-0176-2

Simunek, J., van Genuchten, M. T. V., Šejna, M., 2008. Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Vadose Zone Journal*, 7(2): 587–600. doi: 10.2136/vzj2007.0077

Tian, Y., Lei, X. H., Jiang, Y. Z., et al., 2010. Comment on Parameter Sensitivity Analysis of Hydrological Model. *Journal of China Hydrology*, 30(4): 9–12 (in Chinese with English abstract).

van Genuchten, M. T., 1980. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5): 892–898. doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

van Genuchten, M. T., Leij, F. J., Yates, S. R., 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. U. S. Department of Agriculture, Washington, D. C.

Vogel, T., Císlarová, M., 1988. On the Reliability of Unsat-

rated Hydraulic Conductivity Calculated from the Moisture Retention Curve. *Transport in Porous Media*, 3(1): 1–15. doi: 10.1007/BF00222683

Wang, Z. T., Jiao, X. Y., Han, H. L., et al., 2013. Sensitivity Analysis of VG Model Parameters with Vertical One-Dimensional Soil Infiltration. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 41(1): 80–84 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

毕经纬, 张佳宝, 陈效民, 等, 2003. 农田土壤中土壤水渗漏与硝态氮淋失的模拟研究. *灌溉排水学报*, 22(6): 23–26.

霍思远, 2015. 潜水位下降对入渗补给的影响研究——以华北平原为例 (博士学位论文). 武汉: 中国地质大学(武汉), 29–30.

孟江丽, 2004. 水盐与排水系统的模拟研究 (硕士学位论文). 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 35–36.

田雨, 雷晓辉, 蒋云钟, 等, 2010. 水文模型参数敏感性分析方法研究评述. *水文*, 30(4): 9–12.

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