文章编号:1007-2284(2016)03-0052-05

Van Genuchten模型参数变化对土壤入渗特性的影响分析

范严伟,赵文举,毕贵权

(兰州理工大学能源与动力工程学院,兰州 730050)

摘　要:基于HYDRUS-1D模型,分析不同土壤条件下Van Genuchten模型参数θ_r、θ_s、α、n和K_s对入渗特性的影响,结果表明:湿润锋运移距离与n和K_s成正相关,与θ_s和α成负相关;累积入渗量与θ_s、n和K_s成正相关,与α成负相关;θ_r对土壤入渗特性基本无影响;随着土质由细变粗,α和n对入渗特性影响逐渐减小,K_s的影响逐渐增大,而θ_s对湿润锋的影响逐渐增大,对累积入渗量的影响逐渐减小;对于粉壤土,参数的影响程度为$n>\theta_s>K_s>\alpha>\theta_r$;对于壤土,参数的影响程度为$\theta_s>n>K_s>\alpha>\theta_r$;对于砂壤土,参数的影响程度为$\theta_s>K_s>n>\alpha>\theta_r$;对于砂土,参数的影响程度为$\theta_s>K_s>n>\alpha>\theta_r$。因此,在推求VG模型参数时应优先保证$\theta_s$、$n$和$K_s$准确。

关键词:Van Genuchten模型;参数变化;入渗特性;影响;数值模拟

中图分类号:S152.7;TV12　　**文献标识码**:A

The Influence Analysis of Parameters Variations in Van Genuchten Model on the Soil Infiltration Characteristics

FAN Yan-wei, ZHAO Wen-ju, BI Gui-quan

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology. Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on HYDRUS-1D model, the influence of van Genuchten model parameters including θ_r, θ_s, α, n and K_s on soil infiltration characteristics under different soil conditions is analyzed. The results show that the wetting front transport distance is positive with n and K_s, and negative with θ_s and α; the cumulative infiltration is positive with θ_s, n and K_s, and negative with α; θ_r has no effect on the soil infiltration characteristics. With the soil texture changing from fine to coarser, the influence of α and n on soil infiltration characteristics becomes gradually smaller, and the influence of K_s becomes gradually larger, the influence of θ_s on the wetting front transport distance becomes gradually larger, and the s influence of θ_s on the cumulative infiltration becomes gradually larger. For silt loam soil, the influence degree of parameter is $n>\theta_s>K_s>\alpha>\theta_r$; For loam soil, the influence degree of parameter is $\theta_s>n>K_s>\alpha>\theta_r$; For sandy loam soil, the influence degree of parameter is $\theta_s>K_s>n>\alpha>\theta_r$. For sand soil, the influence degree of parameter is $\theta_s>K_s>n>\alpha>\theta_r$; Therefore, the accuracy of θ_s, n and K_s should be given priority in the derivation of VG model parameters.

Key words: Van Genuchten model; parameters change; soil infiltration characteristics; influence; numerical simulation

非饱和土壤导水率、扩散率以及土壤水分特征曲线等是数值模拟非饱和土壤水分运动必不可少的重要参数,准确获取这些参数是定量研究土壤水分和溶质运动的基础[1]。多年来,国内外学者建立了许多经验模型来描述土壤水分特征曲线和非饱和导水率曲线,其中,Van Genuchten模型应用最为广泛[2]。基于Richards方程开发的HYDRUS-1D/2D/3D软件[3],均采用VG模型拟合。为此,许多土壤物理学家致力于确定VG模型中的参数。邵明安等[4]提出推求非饱和土壤水分运动参数的简单入渗法,用以确定VG模型中的参数α和n;李春友[5]、马英杰[6]、陈大春[7]、廖林仙[8]、郭向红[9]等分别采用单纯形调优法、阻尼最小二乘法、随机粒子群算法、智能算法、混合遗传算法拟合土壤水力参数;魏义长等[10]运用Matlab软件的非线性拟合和非线性回归函数获得VG模型参数值;王薇等[11]利用RETC软件依据土壤的颗粒组成和容重转换出VG模型参数值;查元源等[12]根据瞬时剖面法,推求VG模型参数K_s、α和n。

收稿日期:2015-06-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51409137,51269008);甘肃省自然科学基金项目(145RJYA293)。

作者简介:范严伟(1982-),男,讲师。主要从事农业水土工程研究。E-mail:fanyanwei24@163.com。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

模型参数的准确程度是数值计算精度高低的关键，而模型中各参数对模拟结果的影响程度因其物理意义的不同而有所差异。因此，有必要了解 VG 模型参数变化对土壤入渗特性的影响规律，以有效识别关键参数，减少率定参数的数量，提高模型的运行效率。李法虎等[13]对土壤水分运动参数的灵敏性能进行了理论分析；王志涛等[14]分析了 VG 模型参数变化对粉壤土入渗特性的影响。目前，尚未开展 VG 模型参数变化对不同质地土壤入渗特性的影响。为此，基于 HYDRUS-1D 模型，对 VG 模型中的 θ_r、θ_s、α、n 和 K_s 参数进行单因素扰动，模拟获得土壤湿润锋运移距离和累积入渗量，分析 VG 模型参数变化对入渗特性的影响程度，以便为优化和改进模型结构提供依据。

1　数学模型建立

1.1　基本方程

HYDRUS-1D 模型对土壤水分运动的模拟采用 Richards 方程[15]。其表达式为：

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

式中：z 为垂向坐标，规定 z 向上为正；θ 为体积含水量，cm^3/cm^3；h 在饱和区和非饱和区分别为压力水头和基质势，cm；t 为入渗时间，min；$K(h)$为非饱和导水率，cm/min。

Richards 方程中涉及的土壤水分特征曲线 $\theta(h)$和非饱和土壤导水率 $K(h)$采用 VG 模型拟合。即

$$\theta(h)=\begin{cases}\theta_r+\dfrac{\theta_s-\theta_r}{(1+|\alpha h|^n)^m} & h<0\\ \theta_s & h\geqslant 0\end{cases} \tag{2}$$

$$K(h)=K_sS_e^l[1-(1-S_e^{1/m})^m]^2 \tag{3}$$

式中：$S_e=(\theta-\theta_r)/(\theta_s-\theta_r)$；$\theta_s$ 为残余含水量，cm^3/cm^3；θ_s 为饱和含水量，cm^3/cm^3；α、n 和 m 为土壤物理特性有关的拟合参数，α 单位为 cm^{-1}；$n>1$；$m=1-1/n$；$l=0.5$；K_s 为饱和导水率，cm/min。

1.2　定解条件

在 HYDRUS-1D 模型中，土壤质地、容重是通过 VG 模型中的参数体现的，压力水头和土壤初始含水量对累积入渗量和湿润锋运移距离影响较小。初始条件和边界条件不会影响 VG 模型参数，故在模拟时以定水头作为 HYDRUS-1D 模型的上边界条件，上边界水头值取为 2 cm，入渗过程中，湿润锋未到达下界面。土壤初始含水量根据土壤质地取为一恒值，其中粉壤土为 0.12 cm^3/cm^3，壤土为 0.10 cm^3/cm^3，砂壤土为 0.08 cm^3/cm^3，砂土为 0.06 cm^3/cm^3。其定解条件为：

$$\theta=\theta_0,0\leqslant z\leqslant L,t=0 \tag{4}$$

$$h=h_0,z=0,t>0 \tag{5}$$

$$\theta=\theta_0,z=L,t>0 \tag{6}$$

式中：θ_0 为土壤的初始含水量，cm^3/cm^3；h_0 为初始压力水头，cm。

1.3　模型参数

各类土壤及其 Van Genuchten 模型参数均采用 HYDRUS-1D 模型中典型土壤的设定值，结果见表 1。模拟过程中，参数扰动幅度设置为 5 个水平，分别为 −20%、−10%、0%、10%和 20%。

表 1　不同土质 VG 模型水力特性参数

Tab. 1 Hydraulic parameters in VG model of different soils

土壤质地	θ_r/($cm^3\cdot cm^{-3}$)	θ_s/($cm^3\cdot cm^{-3}$)	α/cm^{-1}	n	l	K_s/($cm\cdot min^{-1}$)
粉壤土	0.067	0.45	0.020	1.41	0.5	0.007 5
壤土	0.078	0.43	0.036	1.56	0.5	0.017 3
砂壤土	0.065	0.41	0.075	1.89	0.5	0.073 7
砂土	0.045	0.43	0.145	2.68	0.5	0.495 0

2　VG 模型参数变化对入渗特性的影响分析

2.1　分析方法

为定量分析 VG 模型中各参数变化对土壤入渗特性的影响，采用灵敏度系数来表示参数变化对入渗过程的影响程度，即：

$$RS_i=\left|\frac{\Delta Q_i}{Q_i}\right|\Big/\left|\frac{\Delta P_i}{P_i}\right| \tag{7}$$

式中：RS_i 为灵敏度系数；ΔP_i 为某参数 P_i 的变化量；ΔQ_i 为某参数 P_i 的变化而引起目标函数 Q_i 的变化量。

2.2　参数 θ_r 变化对入渗特性的影响

定量分析参数 θ_r 对不同质地土壤湿润锋运移距离 Z 的影响，将不同扰动变幅下的 θ_r 值及 $T=100$ min 时的湿润锋运移距离值代入式(7)，得参数 θ_r 的灵敏度系数 RS_{θ_r}。如表 2 所示。

表 2　参数 θ_r 对不同土质湿润锋运移距离的影响

Tab. 2 Influence of parameter θ_r to transport distance of wetting front for different soils

土壤质地	Z/cm					RS_{θ_r}			
	−20%	−10%	0%	+10%	+20%	−20%	−10%	+10%	+20%
粉壤土	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	0	0	0	0
壤土	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	0	0	0	0
砂壤土	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9	0	0	0	0
砂土	151.0	151.0	151.0	151.0	151.0	0	0	0	0

由表 2 可知：θ_r 的扰动对湿润锋运移距离无影响。

同理可得出参数 θ_r 对不同扰动变幅下累积入渗量 I 的灵敏度。如表 3 所示。

表 3　参数 θ_r 对不同土质累积入渗量的影响

Tab. 3 Influence of parameter θ_r to the cumulative infiltration for different soils

土壤质地	I/cm					RS_{θ_r}			
	−20%	−10%	0%	+10%	+20%	−20%	−10%	+10%	+20%
粉壤土	2.66	2.67	2.68	2.69	2.70	0.04	0.04	0.04	0.04
壤土	3.98	3.99	4.00	4.01	4.02	0.03	0.02	0.02	0.02
砂壤土	10.4	10.4	10.4	10.4	10.40	0	0	0	0
砂土	54.3	54.3	54.3	54.3	54.30	0	0	0	0

由表 3 可知：θ_r 的扰动对土壤累积入渗量影响非常微弱。

综合分析说明：土壤残余含水量 θ_r 的变化对土壤入渗特性

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

影响很小。考虑到土壤残余含水量 θ_r 的获取比较困难，因此，在没有确定的或实验测得的 θ_r 值的情况下，将稳定枯竭点上的基质势（$\varphi=-15\ 000$ cm）所对应的含水量作为 θ_r 的估算值是可行的[16]。

2.3　参数 θ_s 变化对入渗特性的影响

模拟参数 θ_s 扰动下的湿润锋运移距离、累积入渗量与时间 t 的关系曲线图，如图 1 所示。

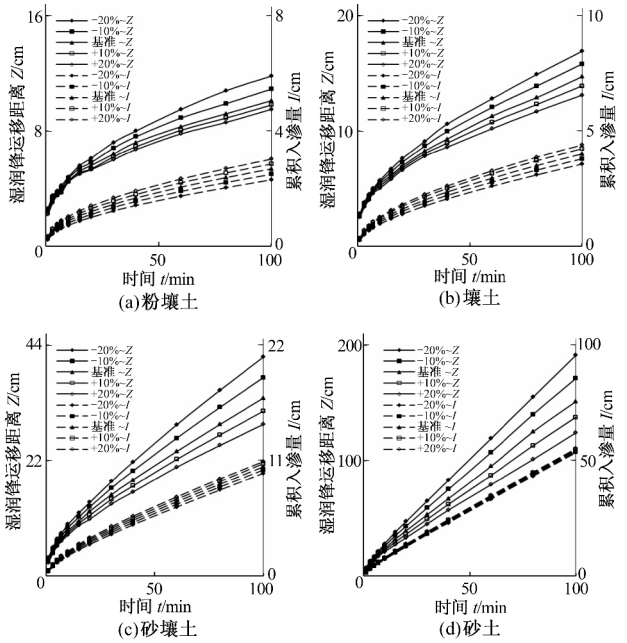

图 1　参数 θ_s 对不同土质入渗特性的影响

Fig. 1 Effect of parameter θ_s on infiltration characteristics for different soils

定量分析参数 θ_s 对不同质地土壤湿润锋运移距离的影响，将不同扰动变幅下的 θ_s 值及 $T=100$ min 时的湿润锋运移距离值代入式(7)，得参数 θ_s 的灵敏度系数 RS_{θ_s}。如表 4 所示。

表 4　参数 θ_s 对不同土质湿润锋运移距离的影响

Tab. 4 Influence of parameter θ_s on transport distance of wetting front for different soils

土壤质地	Z/cm					RS_{θ_s}			
	−20%	−10%	0%	+10%	+20%	−20%	−10%	+10%	+20%
粉壤土	11.5	10.8	10.1	9.8	9.5	0.69	0.69	0.30	0.30
壤土	17.1	15.9	14.7	13.9	13.1	0.82	0.82	0.54	0.54
砂壤土	41.7	37.8	33.9	31.4	28.9	1.15	1.15	0.74	0.74
砂土	191.0	171.0	151.0	137.5	124.0	1.32	1.32	0.89	0.89

由图 1 及表 4 可知：θ_s 的扰动与垂直湿润锋运移距离成负相关，对其影响较大，且随土质由细变粗而影响逐渐增大；θ_s 的负扰动对湿润锋运移距离的影响程度明显强于正扰动。

同理可得出参数 θ_s 对不同扰动变幅下累积入渗量 I 的灵敏度。如表 5 所示。

由图 1 及表 5 可知：θ_s 的扰动与土壤累积入渗量成正相关，对其影响较大，且随土质由细变粗而影响逐渐减小。

综合分析说明：土壤饱和含水量 θ_s 的变化对土壤入渗特性影响较大。但 θ_s 可通过实验准确测定。因此，在求解 VG 模型参数时，可将 θ_s 取为实测值，避免 VG 模型参数确定过程中 θ_s 的误差。

表 5　参数 θ_s 对不同土质累积入渗量的影响

Tab. 5 Influence of parameter θ_s to the cumulative infiltration for different soils

土壤质地	I/cm					RS_{θ_s}			
	−20%	−10%	0%	+10%	+20%	−20%	−10%	+10%	+20%
粉壤土	2.30	2.49	2.68	2.85	3.02	0.71	0.71	0.63	0.63
壤土	3.56	3.79	4.00	4.23	4.39	0.55	0.53	0.58	0.49
砂壤土	9.79	10.1	10.4	10.7	10.9	0.29	0.29	0.29	0.24
砂土	53.4	53.8	54.3	54.7	55.1	0.08	0.09	0.07	0.07

2.4　参数 α 变化对入渗特性的影响

模拟参数 α 扰动下的湿润锋运移距离、累积入渗量与时间 t 的关系曲线图，如图 2 所示。

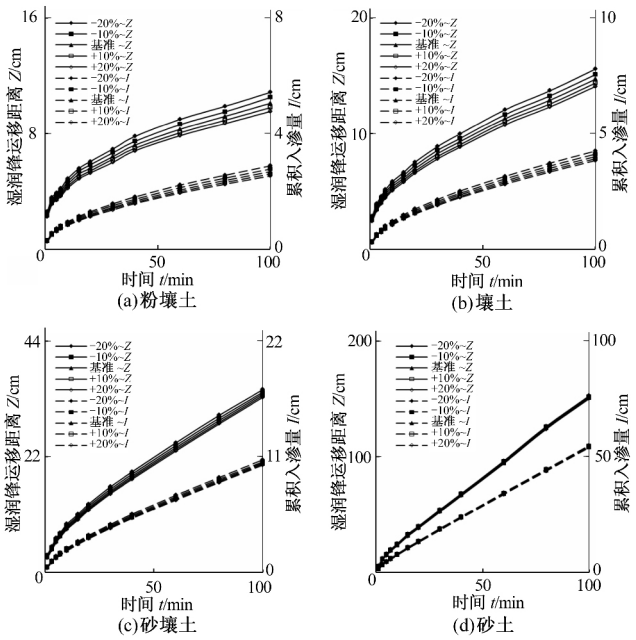

图 2　参数 α 对不同土质入渗特性的影响

Fig. 2 Effect of parameters α on infiltration characteristics for different soils

定量分析参数 α 对不同质地土壤湿润锋运移距离的影响，将不同扰动变幅下的 α 值及 $T=100$ min 时的湿润锋运移距离值代入式(7)，得参数 α 的灵敏度系数 RS_α。如表 6 所示。

表 6　参数 α 对不同土质湿润锋运移距离的影响

Tab. 6 Influence of parameter α on transport distance of wetting front for different soils

土壤质地	Z/cm					RS_α			
	−20%	−10%	0%	+10%	+20%	−20%	−10%	+10%	+20%
粉壤土	10.9	10.5	10.1	9.8	9.5	0.40	0.40	0.30	0.30
壤土	15.6	15.1	14.7	14.4	14.1	0.31	0.27	0.20	0.20
砂壤土	34.9	34.2	33.9	33.6	33.2	0.15	0.09	0.09	0.10
砂土	152.4	151.6	151.0	150.4	149.5	0.05	0.04	0.04	0.05

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由图 2 及表 6 可知：参数 α 的扰动与湿润锋运移距离成负相关，对其影响较小，且随土质由细变粗而影响逐渐减小。

同理可得出参数 α 对不同扰动变幅下累积入渗量 I 的灵敏度。如表 7 所示。

表 7　参数 α 对不同土质累积入渗量 I 的影响

Tab. 7 Influence of parameter α to the cumulative infiltration for different soils

土壤质地	I/cm					RS_α			
	−20%	−10%	0%	+10%	+20%	−20%	−10%	+10%	+20%
粉壤土	2.88	2.77	2.68	2.6	2.53	0.37	0.34	0.30	0.28
壤土	4.24	4.11	4.00	3.91	3.83	0.30	0.28	0.23	0.21
砂壤土	10.7	10.5	10.4	10.3	10.2	0.14	0.10	0.10	0.10
砂土	54.8	54.5	54.3	54.1	53.9	0.05	0.04	0.04	0.04

由图 2 及表 7 可知：参数 α 的扰动与土壤累积入渗量成负相关，对其影响较小，且随土质由细变粗而影响逐渐减小。

综合分析说明：参数 α 的变化对土壤入渗特性影响较小，且随土质由细变粗而影响逐渐减小。在实际应用时，VG 模型参数 α 一般是通过多次迭代拟合确定，但拟合过程中往往造成参数的不唯一性。因此，在拟合求解 VG 模型参数时，可给出参数 α 的取值范围，以解决参数 α 不唯一问题，或采用简单入渗法来直接推求，推求过程中应保证吸渗率的准确性[4]。

2.5　参数 n 变化对入渗特性的影响

模拟参数 n 扰动下的湿润锋运移距离、累积入渗量与时间 t 的关系曲线图，如图 3 所示。

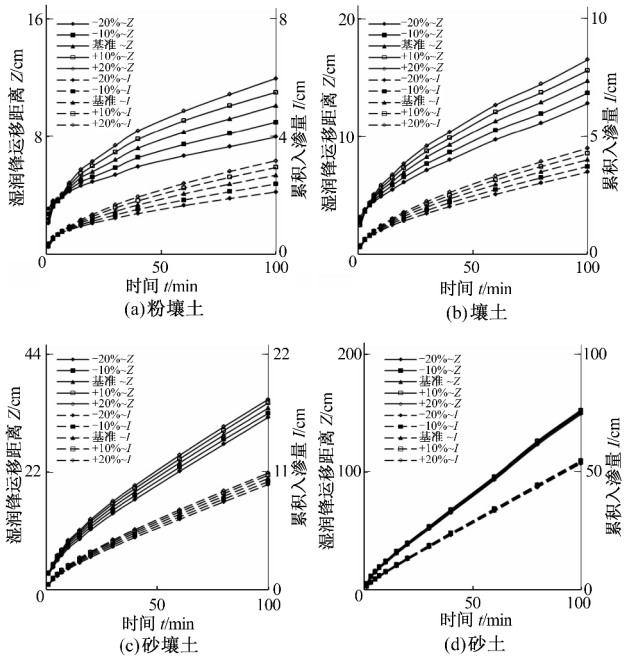

图 3　参数 n 对不同土质入渗特性的影响

Fig. 3 Effect of parameter n on infiltration characteristics for different soils

定量分析参数 n 对不同质地土壤湿润锋运移距离的影响，将不同扰动变幅下的 n 值及 $T=100$ min 时的湿润锋运移距离值代入式(7)，得参数 n 的灵敏度系数 RS_n。如表 8 所示。

由图3及表8可知：参数n的扰动与湿润锋运移距离成正相关，对粉壤土、壤土影响较大，随土质由细变粗而影响迅速减小，表现为对砂壤土、砂土影响较小。

表 8　参数 n 对不同土质湿润锋运移距离的影响

Tab. 8 Influence of parameter n on transport distance of wetting front for different soils

土壤质地	Z/cm					RS_n			
	−20%	−10%	0%	+10%	+20%	−20%	−10%	+10%	+20%
粉壤土	8.0	9.0	10.1	11.0	12.0	1.04	1.09	0.89	0.94
壤土	12.8	13.7	14.7	15.6	16.5	0.65	0.68	0.61	0.61
砂壤土	32.2	33.0	33.9	34.8	35.5	0.25	0.27	0.27	0.24
砂土	149.0	150.2	151.0	151.8	152.8	0.07	0.05	0.05	0.06

同理可得出参数 n 对不同扰动变幅下累积入渗量 I 的灵敏度。如表 9 所示。

表 9　参数 n 对不同土质累积入渗量的影响

Tab. 9 Influence of parameter s to the cumulative infiltration for different soils

土壤质地	I/cm					RS_n			
	−20%	−10%	0%	+10%	+20%	−20%	−10%	+10%	+20%
粉壤土	2.11	2.38	2.68	2.94	3.17	1.06	1.12	0.97	0.91
壤土	3.48	3.72	4.00	4.26	4.49	0.65	0.70	0.65	0.61
砂壤土	9.84	10.1	10.4	10.7	10.9	0.27	0.29	0.29	0.24
砂土	53.6	54	54.3	54.6	54.9	0.06	0.06	0.06	0.06

由图 3 及表 9 可知：参数 的扰动与累积入渗量成正相关，对粉壤土、壤土影响较大，随土质由细变粗而影响迅速减小，表现为对砂壤土、砂土影响较小。

综合分析说明：参数 n 的变化对细质土壤入渗特性影响较大，对粗质土壤入渗特性影响较小。参数 n 与 α 相同，在实际应用时，一般是通过多次迭代拟合来确定，但拟合过程中容易造成参数 n 的不唯一性。因此，在拟合求解 VG 模型参数时，需给出参数 n 的取值范围，以解决参数 n 不唯一问题。或采用简单入渗法来直接推求，推求过程中应保证吸渗率的准确性[4]。

2.6　参数 K_s 变化对入渗特性的影响

模拟参数 K_s 扰动下的湿润锋运移距离、累积入渗量与时间 t 的关系曲线图，如图 4 所示。

定量分析参数 K_s 对不同质地土壤湿润锋运移距离的影响，将不同扰动变幅下的 K_s 值及 $T=100$ min 时的湿润锋运移距离值代入式(7)，得参数 K_s 的灵敏度系数 RS_{K_s}。如表 10 所示。

表 10　参数 K_s 对不同土质湿润锋运移距离的影响

Tab. 10 Influence of parameter K_s on transport distance of wetting front for different soils

土壤质地	Z/cm					RS_{K_s}			
	−20%	−10%	0%	+10%	+20%	−20%	−10%	+10%	+20%
粉壤土	9.0	9.5	10.1	10.6	11.1	0.54	0.59	0.50	0.50
壤土	12.8	13.8	14.7	15.6	16.5	0.65	0.61	0.61	0.61
砂壤土	28.6	31.2	33.9	36.5	39.1	0.78	0.80	0.77	0.77
砂土	122.9	136.8	151.0	164.9	179.1	0.93	0.94	0.92	0.93

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

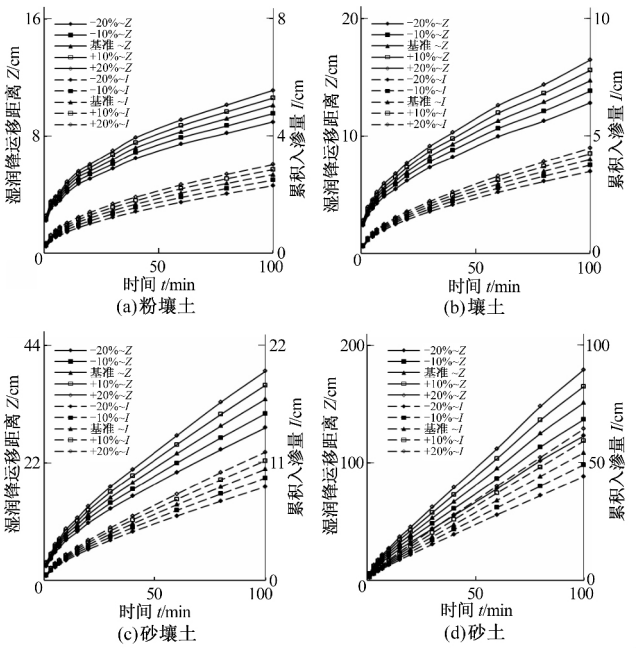

图 4　参数 K_s 对不同土质入渗特性的影响

Fig. 4 Effect of parameter K_s on infiltration characteristics for different soils

由图 4 及表 10 可知：参数 K_s 的扰动与湿润锋运移距离成正相关，对其影响较大，且随土壤质地由细变粗而影响逐渐变大。

同理可得出参数 K_s 对不同扰动变幅下累积入渗量 I 的灵敏度。如表 11 所示。

表 11　参数 K_s 对不同土质累积入渗量的影响

Tab. 11 Influence of parameter K_s to the cumulative infiltration for different soils

土壤质地	I/cm					RS_{K_s}			
	−20%	−10%	0%	+10%	+20%	−20%	−10%	+10%	+20%
粉壤土	2.38	2.53	2.68	2.81	2.95	0.56	0.56	0.49	0.50
壤土	3.49	3.76	4.00	4.24	4.48	0.64	0.60	0.60	0.60
砂壤土	8.76	9.57	10.4	11.2	12.0	0.79	0.80	0.77	0.77
砂土	44.2	49.2	54.3	59.3	64.4	0.93	0.94	0.92	0.93

由图 4 及表 11 可知：参数 K_s 的扰动与累积入渗量成正相关，对其影响较大，且随土壤质地由细变粗而影响逐渐变大。

综合分析说明：饱和导水率 K_s 的变化对土壤入渗特性影响较大，且随土壤质地由细变粗而影响逐渐变大。K_s 可通过实验测定，但空间变异较大，应考虑其尺度效应。或在求解 VG 模型参数时，同时测定土壤水分特征曲线 $\theta(h)$ 和非饱和土壤水扩散率 $D(\theta)$，采用同步拟合方法，得出 VG 模型参数 θ_r、θ_s、α、n 和 K_s 值，以消除单个参数引起的总体误差。

3　结　语

基于 HYDRUS-1D 模型，采用单因素影响法，分析 VG 模型参数变化对土壤入渗特性的影响，结果表明：

(1)参数 θ_r 对湿润锋运移距离和累积入渗量影响很小，基本无影响。

(2)参数 θ_s 对湿润锋运移距离影响较大，成负相关关系，随土质由细变粗而影响增大，负扰动强于正扰动；同时，θ_s 与累积入渗量成正相关关系，对粉壤土、壤土影响较大，对砂壤土、砂土影响较小。

(3)参数 α 对湿润锋运移距离和累积入渗量影响都较小，成负相关关系，随土质由细变粗而影响减小。

(4)参数 n 与湿润锋运移距离和累积入渗量成正相关，对粉壤土、壤土影响较大，对砂壤土、砂土影响较小。

(5)参数 K_s 对湿润锋运移距离和累积入渗量影响较大，成正相关关系，随土质由细变粗而影响增大。 □

参考文献：

[1]　邵明安，王全九，黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京：高等教育出版社，2006.

[2]　Van Genuchten M Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.，1980，44：892－898.

[3]　Simunek J，Van Genuchten M Th，Sejna M. HYDRUS：Model Use，Calibration，and Validation[J]. Transactions of the ASABE，2012，55(4)：1 261－1 274.

[4]　邵明安，王全九，Robert Horton. 推求土壤水分运动参数的简单入渗法 I. 理论分析[J]. 土壤学报，2000，37(1)：1－6.

[5]　李春友，任　理，李保国. 利用优化方法求算 Van Genuehten 方程参数[J]. 水科学进展，2001，12(4)：473－478.

[6]　马英杰，虎胆·吐马尔拜，沈冰. 利用阻尼最小二乘法求解 Van Genuchten 方程参数[J]. 农业工程学报，2005，21(8)：179－181.

[7]　陈大春，马英杰. 基于随机粒子群算法的 Van Genuchten 方程参数优化求解[J]. 农业工程学报，2006，22(12)：82－85.

[8]　廖林仙，邵孝侯，徐俊增. 基于智能算法推求 Van Genuchten 方程的参数[J]. 水利学报，2007，38(S1)：696－700.

[9]　郭向红，孙西欢，马娟娟. 基于混合遗传算法估计 Van Genuchten 方程参数[J]. 水科学进展，2009，20(5)：677－682.

[10]　魏义长，刘作新，康玲玲，等. 土壤持水曲线 Van Genuchten 模型求参的 Matlab 实现[J]. 土壤学报，2004，41(3)：380－386.

[11]　王　薇，孟　杰，虎胆·吐马尔白. RETC 推求土壤水动力学参数的室内试验研究[J]. 河北农业大学学报 2008，31(1)：99－102，106.

[12]　查元源，周发超，杨金忠. 一种由土壤剖面含水率估算土壤水力参数的方法[J]. 水利学报，2011，，42(8)：883－891.

[13]　李法虎，傅建平，孙雪峰. 土壤水分运动参数的确定及其灵敏性能分析[J]. 灌溉排水学报，1993，12(3)：6－14.

[14]　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.

[15]　Simunek J，Van Genuchten M T，Sejna M. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water，heat，and multiple solutes in variably－saturated media[J]. University of California-Riverside Research Reports，2005，3：1－240.

[16]　王金生，杨志峰，陈家军，等. 包气带土壤水分滞留特征研究[J]. 水利学报，2000，31(2)：1－6.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net