

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.006

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

张海阔¹,姜翠玲¹,李 亮²,朱立琴³

(1.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2.淮安市水利勘测设计研究院有限公司,江苏 淮安 223005;
3.河海大学马克思主义学院,江苏 南京 210098)

摘要:采用单因素扰动分析法,分别对土壤水力参数残余含水量 θ_r 、饱和含水量 θ_s 、饱和导水率 K_s 、经验参数 α 和 n 进行扰动,选用 HYDRUS-1D 模型模拟南京市区 2 年一遇降雨条件下土壤水分入渗过程,分析变水头入渗条件下各土壤水力参数的敏感性,定量描述土壤水力参数变化对 HYDRUS-1D 输出变量土水势和累积入渗量的影响,简化后续模型率定工作,提高模型模拟精度。结果表明:在变水头入渗条件下,5 个参数对土水势与累积入渗量敏感性排序均为 $n>K_s>\theta_s>\alpha>\theta_r$,其中 α 和 n 对于地表 0~10 cm 附近的土水势影响较大, K_s 与 θ_r ,以及 θ_s 与 α 对土水势影响规律类似; $\pm 25\%$ 扰动情况下, θ_s 、 K_s 与 n 三者对累积入渗量的影响均大于 10%。因此,在进行变水头入渗条件下模拟计算中应保证 K_s 、 θ_s 、 α 和 n 参数的准确性。

关键词:敏感性分析;非饱和土壤水运动;土水势;HYDRUS;变水头入渗;土壤水力参数;单因素扰动;数值模拟

中图分类号:S152.7;TV12 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2019)01-0032-09

Parameter sensitivity analysis of VG model in the varying-head infiltration based on HYDRUS-1D simulation

ZHANG Haikuo¹, JIANG Cuiling¹, LI Liang², ZHU Liqin³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Huai'an City Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Huai'an 223005, China;
3. School of Marxism, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The single-factor perturbation analysis method was used for the sensibility analysis of soil hydraulic parameters, including the residual water content θ_r , the saturated water content θ_s , the saturated hydraulic conductivity K_s , the empirical parameters α and n . With the help of HYDRUS-1D model, the process of water infiltration in the soil was simulated for the two-year-once storm in Nanjing and the sensitivity of soil hydraulic parameter was evaluated for the varying-head infiltration, which can quantitatively describe the effects of soil hydraulic parameters on two output variables of HYDRUS-1D (soil water potential and cumulative infiltration), simplify the model calibration and improve the accuracy of model simulation. The results show that under the condition of varying-head infiltration, the parameter's influence degree on both soil water potential and cumulative infiltration are in this order: $n>K_s>\theta_s>\alpha>\theta_r$. Empirical parameters α and n have a great influence on the soil water potential with a depth of 0~10 cm beneath the surface, and the influence are similar when changing parameters

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51609060);江苏省自然科学基金青年科学基金(BK20150810);中央高校基本科研业务费专项(2017B14614)

作者简介: 张海阔(1994—),女,硕士研究生,主要从事水环境保护和水生态修复研究。E-mail:zhkhhu@163.com

通信作者: 姜翠玲,教授。E-mail:cljianghu@163.com

引用本文: 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.

ZHANG Haikuo, JIANG Cuiling, LI Liang, et al. Parameter sensitivity analysis of VG model in the varying-head infiltration based on HYDRUS-1D simulation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(1):32-40.

K_s , θ_r or θ_s and α on the soil water potential. In the case of $\pm 25\%$ disturbance, the influence degree of θ_s , K_s and n on the cumulative infiltration are more than 10%. Therefore, the accuracy of K_s , θ_s , α and n should be ensured during the simulation of varying-head infiltration.

Key words: sensitivity analysis; unsaturated soil-water movement; soil water potential; HYDRUS; varying-head infiltration; soil hydraulic parameters; single-factor perturbation; numerical simulation

非饱和土壤水是联系地表水与地下水的纽带,因此非饱和土壤水运动一直以来都是土壤水研究的重要内容,在水文学、农业灌溉、污染物传输等方面均得到广泛应用^[1]。由于受实际观测条件的制约,越来越多的学者采取模型模拟的方式来研究非饱和土壤水分运移的特点,主要有 SWAT 模型^[2]、SWAP 模型^[3]、LEACHM 模型^[4]等等。由美国国家盐改中心研发的 HYDRUS 模型被广泛应用于分析水流和溶质在非饱和多孔隙媒介中的运移过程^[5],是模拟非饱和土壤水运动最有力的工具之一。在利用 HYDRUS 模型分析非饱和土壤水运动时,土壤水力参数的确定至关重要。对土壤水力参数进行敏感性分析可定量描述土壤水力参数的变化对输出变量的影响,能简化后续模型率定验证工作,是提高模型模拟精度、合理预测的基础和前提。

目前,基于 HYDRUS 模型算法下的土壤水力参数敏感性分析并不常见。如王志涛等^[6]、范志伟等^[7]研究定水头入渗情况下 HYDRUS 模型土壤水力参数变化对不同质地土壤入渗特性的影响;刘刚等^[8]采用 HYDRUS 模型探讨河流影响下的包气带压力水头及溶质运移随土壤水力参数变化的改变过程;霍思远等^[9]研究在单次降水条件下 HYDRUS 模型不同土壤水力参数差异对入渗补给模拟结果的影响。模型准确性的影响因素除模型参数自身变动外还有外部输入条件的干扰^[10],已有研究的外部输入条件大多为定水头入渗,对于变水头入渗条件下土壤水力参数敏感性分析很少见,而这一条件更符合实际情况,因此本文以南京地区 2 年一遇的降雨过程作为外部输入条件,以单因素扰动方法分别对 HYDRUS-1D 模型中 5 个土壤水力参数进行扰动,研究 HYDRUS-1D 参数扰动对土水势和累积入渗量的影响,旨在分析变水头入渗条件下 HYDRUS-1D 模型土壤水力参数的敏感性,筛选出对输出结果影响大、需精确校准的参数,以便更科学合理地模拟非饱和土壤水运移,更好地服务于实际应用。

1 模型原理

HYDRUS-1D 模型使用 Richards 方程描述非饱和土壤水流的运动^[11],对于 Richards 方程中的土壤水分特征曲线 $\theta(h)$ 和非饱和导水率 $K(h)$ 的计算, HYDRUS-1D 中有 6 个模型可供选择。本文使用应用广泛的 Van Genuchten 模型(简称 VG 模型)进行拟合,其方程为^[12]

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

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

其中
$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

式中: θ ——含水量, cm^3/cm^3 ; θ_r ——残余含水量, cm^3/cm^3 ; θ_s ——饱和含水量, cm^3/cm^3 ; α ——经验参数, cm^{-1} ; n, m ——经验参数, $n > 1, m = 1 - 1/n$; l ——经验参数,取 0.5; K_s ——饱和导水率, cm/min ; h ——压力水头或基质势, cm 。

2 模型的构建

2.1 初始及边界条件

设置模拟土柱高度 100 cm,模拟时间 1 440 min,下边界为自由排水边界,上边界为大气降水边界,利用南京新暴雨公式推求南京市 2 年一遇设计暴雨量,并使用芝加哥雨型推求设计暴雨过程作为上边界输入条件。南京市暴雨强度修订公式参考南京市暴雨强度公式(修订)查算表^[13],由于城市中心区域小,汇流快,降雨历时一般小于 120 min,因此本研究中的降雨历时选用 120 min^[14]。给定雨峰相对位置 $r(0 < r < 1)$,芝加哥雨型的雨强过程可用如下公式^[15]表示:

$$i_b = \frac{a \left[(1 - c) \frac{t_b}{r} + b \right]}{\left[\left(\frac{t_b}{r} \right) + b \right]^{1+c}}$$
$$i_a = \frac{a \left[(1 - c) \frac{t_a}{1 - r} + b \right]}{\left[\left(\frac{t_b}{1 - r} \right) + b \right]^{1+c}}$$

(3)

其中 $t_b = rt$ $t_a = (1 - r)t$
式中: i_b ——峰前瞬时降雨强度, mm/min; i_a ——峰后瞬时降雨强度, mm/min; t_b ——峰前降雨历时, min; t_a ——峰后降雨历时, min;
 a 、 b 、 c ——暴雨公式参数; r ——比例系数; t ——降雨历时。

江浙地区雨型以单峰为主, 本文取 $r=0.33$ ^[13], 计算所得南京市 2 年一遇暴雨过程见图 1。

2.2 输出变量

选取 HYDRUS-1D 模型输出变量中的土水势和累积入渗量作为研究对象进行分析。模拟结果显示, 在降水停止后, 累积入渗量达到最大值, 之后不再变化, 因此选取 $t=120\text{ min}$ 时的累积入渗量为研究对象进行分析。

2.3 模型参数

由模型原理可知, HYDRUS-1D 模型的土壤水力参数主要有 θ_r 、 θ_s 、 K_s 、 α 和 n , 采用 HYDRUS-1D 模型中壤土的设定值作为标准参数, 各参数均以 5% 为步长, 共分 10 种情况进行上下扰动, 各情况对应的参数设置见表 1。根据前人相关研究^[9,16-19]可知各参数 25% 的增减变化幅度处于合理范围内。

3 结果与分析

3.1 θ_s 敏感性分析

随着 θ_s 正扰动的增加, 聚合型零通量面逐渐左上移, 聚合型零通量面以上的土水势较标准情况减小, 聚合型零通量面之下的土水势较标准情景下增加, 降雨结束后, 发散型零通量面出现, 对应零通量面之上的土水势较标准情况增加(图 2)。同理, θ_s 减小, 聚合型零通量面向右下方移动, 当 θ_s 负扰动为 -25% 时, 整个观测剖面就已经由发散-聚合交替零通量面转变为发散型零通量面, 聚合型零通量面消失。由图 3 可以看出 θ_s 的变化对土水势扰动较大, 且 θ_s 的正负扰动对土水势的影响规律不同: θ_s 正扰动对同层的土水势影响较大, 而 θ_s 的负扰动对土水势垂直方向上的变化影响明显。以 $t=120\text{ min}$ 为例, +25% 扰动情况下对应土水势最大变幅可达 -700%, 是 -25% 扰动情况的 2 倍, 扰动范围为 25 cm, 比 -25% 情景下减少了 21.9%。

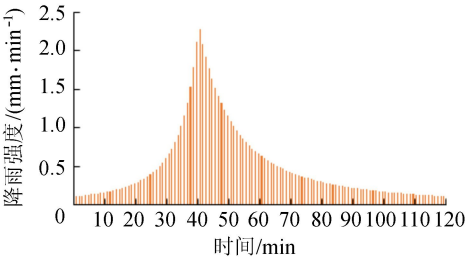


图1 南京市 2 年一遇暴雨过程

Fig.1 Process of the two-year-once storm in Nanjing

表1 土壤水力参数扰动设置

Table 1 Disturbance setting of soil hydraulic parameters

扰动步长/%	θ_r	θ_s	K_s	α	n
-25	0.059	0.323	0.013	0.027	1.170
-20	0.062	0.344	0.014	0.029	1.248
-15	0.066	0.366	0.015	0.031	1.326
-10	0.070	0.387	0.016	0.032	1.404
-5	0.074	0.409	0.016	0.034	1.482
0	0.078	0.430	0.017	0.036	1.560
5	0.082	0.452	0.018	0.038	1.638
10	0.086	0.473	0.019	0.040	1.716
15	0.090	0.495	0.020	0.041	1.794
20	0.094	0.516	0.021	0.043	1.872
25	0.098	0.538	0.022	0.045	1.950

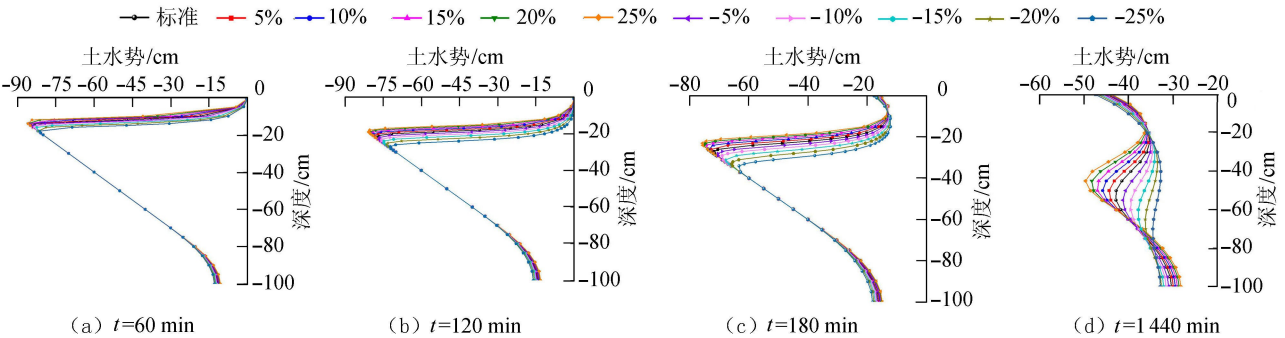


图2 θ_s 扰动对土水势的影响

Fig.2 Perturbation influence of saturated water content θ_s on the soil water potential

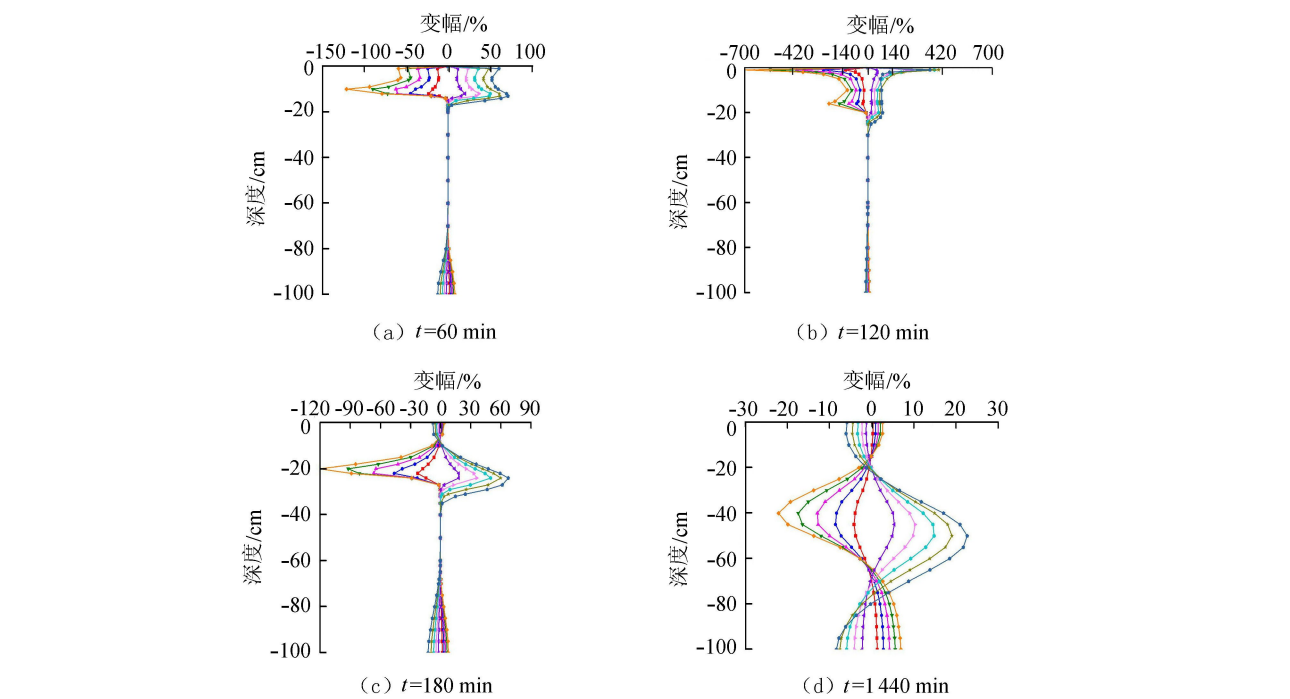


图 3 θ_s 扰动对应土水势变幅

Fig. 3 Variation of soil water potential due to the perturbation of saturated water content θ_s

饱和含水量 θ_s 的扰动与累积入渗量呈正相关关系(表 2),并且 θ_s 正扰动对累积入渗量的影响程度略大于负扰动,+25% 情况下累积入渗量变幅为 10.41%,−25% 情况下的变幅为−9.43%。综上, θ_s 的扰动对土水势和累积入渗量模拟结果影响较大,在现实情况中 θ_s 值可通过实验准确测定,因此在条件允许的情况下,可将 θ_s 取为实测值,以确保模拟结果的准确性。

3.2 K_s 敏感性分析

开始降雨后,随着 K_s 正扰动增加,聚合型零通量面以上的土水势较标准情况增加,聚合型零通量面之下的土水势较标准情景下减小;降雨结束后,发散型零通量面开始显现,对应零通量面之上的土水势较标准情况减小(图 4)。由图 5 可以看出, K_s 负扰动对土水势变幅影响明显大于正扰动。在 $t = 120\text{ min}$ 时−25% 扰动情况下,对应土水势的最大变幅可达−750.0%,是+25% 情况下(375.0%)的 2 倍;而 K_s 的正扰动对土水势的影响更倾向于扰动深度的变化,降

表 2 θ_s 扰动对应累积入渗量变幅

Table 2 Variation of cumulative infiltration due to the perturbation of saturated water content θ_s

扰动 步长/%	入渗 总量/cm	入渗总量 变幅/%	扰动 步长/%	入渗 总量/cm	入渗总量 变幅/%
25	3.35	10.41	−5	3.00	−1.27
20	3.29	8.52	−10	2.93	−3.27
15	3.23	6.60	−15	2.87	−5.31
10	3.18	4.66	−20	2.81	−7.36
5	3.12	2.69	−25	2.75	−9.43
0	3.03				

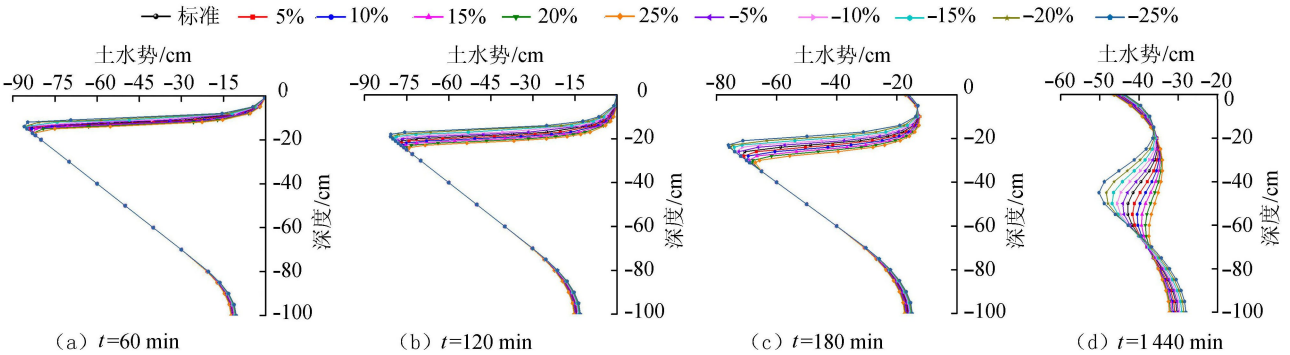


图 4 K_s 扰动对土水势的影响

Fig. 4 Perturbation influence of saturated hydraulic conductivity K_s on the soil water potential

雨结束时,+25% 扰动对应土水势变化深度至地表以下 31 cm,是-25% 情况下的 1.19 倍。

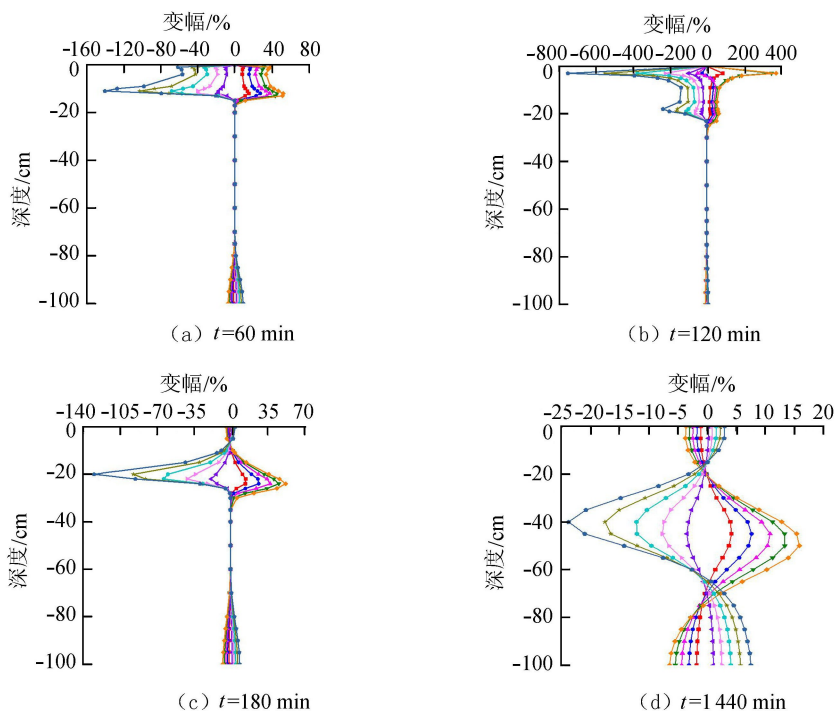


图 5 K_s 扰动对应土水势变幅

Fig. 5 Variation of soil water potential due to the perturbation of saturated hydraulic conductivity K_s

K_s 扰动对累积入渗量的影响与 θ_s 类似,均呈正相关关系,但 K_s 的影响程度要大于 θ_s ,扰动 +25% K_s 情况下累积入渗量变幅是同条件下 θ_s 的 1.66 倍,扰动-25% K_s 情况下的变幅是同条件下 θ_s 的 1.72 倍。

综上, K_s 的扰动对于土水势和累积入渗量影响程度较高,在模拟时需保证 K_s 的准确性。饱和导水率 K_s 是土壤重要的物理性质之一,已有研究表明,土壤基本性质与饱和导水率之间存在一定关系,因此可通过土壤质地或土壤粒径分析数据等土壤理化参数,建立土壤转换函数,估算或预测 K_s 的空间分布^[20]。

3.3 θ_r 敏感性分析

θ_r 对于土水势的影响规律与 K_s 类似,但其影响程度相对较小。 $t = 60\text{ min}$ 时,土水势扰动变幅小于 24%,且受下渗速率影响,扰动范围仅局限在地表以下 20 cm,随降雨时间增加, θ_r 的扰动对地表以下 0 ~ 10 cm 土水势的影响逐渐增大,降雨结束时土水势扰动变幅达-112.5% ~ 87.5% (出现在地表以下 1 cm)。图 6(c)(d)显示降雨结束后在 θ_r 的扰动下,表层土水势变幅均不超过±1%,地表以下 10 ~ 30 cm 范围内土水势扰动变幅不超过 20%。与其他参数的扰动影响相比, θ_r 扰动后的土水势最大变幅仅为±112.5%,说明 θ_r 扰动对土水势变幅影响较小。由图 6 可知, θ_r 正负扰动对土水势变幅影响呈对称状,规律基本相似。

由表 4 可知, θ_r 的扰动与累积入渗量呈负相关关系,但 θ_r 的扰动对累积入渗量影响很小,累积入渗量扰动变幅不超过 2.6%,并且 θ_r 负扰动对累积入渗量的影响略大于正扰动。综上, θ_r 对累积入渗量的模拟结果影响较小,对应土水势的扰动变幅也不大。考虑到实际应用中 θ_r 的获得比较困难,尤其对于黏性土壤^[21],因此在 θ_r 未知的情况下,可考虑将负压为 1 500 kPa 时的土壤含水率作为 θ_r 的估计值^[22]。

3.4 α 敏感性分析

α 的扰动 (图 7) 对土水势影响规律与 θ_s 类似,但 α 扰动对于聚合型零通量面的影响程度要小于 θ_s ,对表

表 3 K_s 扰动对应累积入渗量变幅

Table 3 Variation of cumulative infiltration due to the perturbation of saturated hydraulic conductivity K_s

扰动 步长/%	入渗 总量/cm	入渗总量 变幅/%	扰动 步长/%	入渗 总量/cm	入渗总量 变幅/%
25	3.56	17.28	-5	2.95	-2.62
20	3.46	13.99	-10	2.85	-5.99
15	3.36	10.70	-15	2.75	-9.37
10	3.26	7.39	-20	2.65	-12.77
5	3.16	4.05	-25	2.54	-16.22
0	3.03				

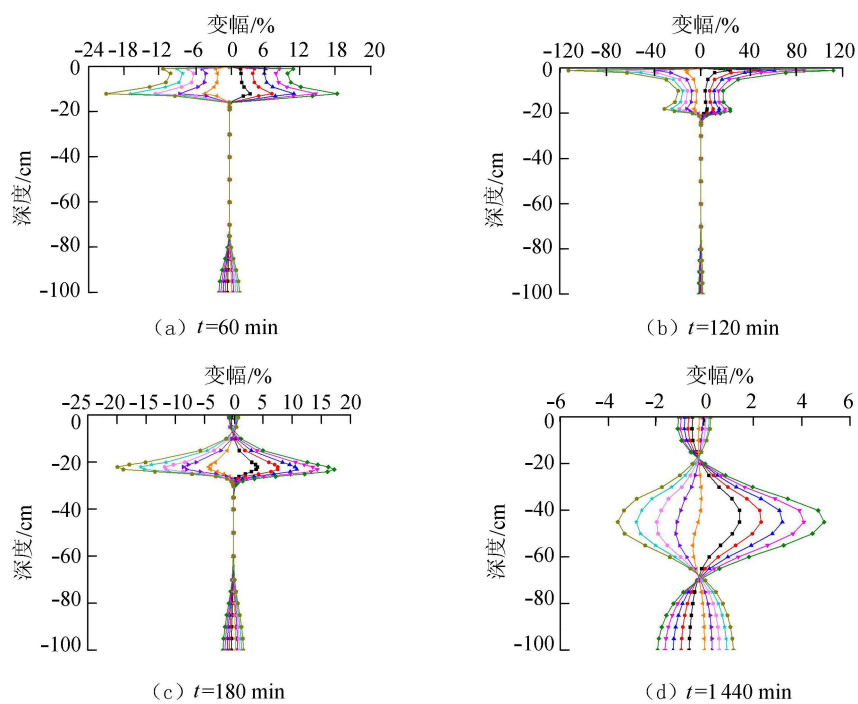


图 6 θ_r 扰动对应土水势变幅

Fig. 6 Variation of soil water potential due to the perturbation of residual water content θ_r

层和底层的发散型零通量面之上土水势的影响程度要高于 θ_s 。以 $t=120\text{ min}$ 为例, +25%扰动情况下, 土壤中部聚合型零通量面附近的土水势变幅为 $\pm 250.0\%$, 比同种情况 θ_s 对应变幅减少了64.3%, 底层发散型零通量面附近的土水势最大扰动变幅 $\pm 21.7\%$, 比同种情况 θ_s 增加了81.3%。

由表5可知, 与 θ_r 类似, α 的扰动与累积入渗量呈负相关关系, 但影响程度略高于 θ_r , 对累积入渗量影响扰动变幅范围为 $-2.15\% \sim 4.07\%$, 并且 α 的正扰动对累积入渗量的影响略大于负扰动。参数 α 是土壤进气值的倒数, 在实际应用时可以提前给出 α 的取值范围, 然后通过多次迭代拟合确定^[7], 或采用基于Richards方程的简单入渗法来直接推求, 推求过程中应确保吸渗率的准确度^[23]。

3.5 n 敏感性分析

n 的正扰动对土水势随深度的影响规律与 θ_r 类似, 其负扰动使得土水势曲线向右移, 即土水势整体增大。由图8可知, 降雨过程中 n 的正扰动对土水势影响大于负扰动, $t=60\text{ min}$ 时, +25%扰动情况下土水势最大变幅为 -192.5% , 是 -25% 情况下的1.7倍。与其他4个参数相比, $t=120\text{ min}$ 时 n 的扰动对表层土壤土水势影响最大, 对应的扰动变幅为 $\pm 3712.5\%$ 。降雨结束后其扰动情况则相反, n 负扰动对土水势的影响远大于正扰动, 且随时间增大该现象愈加明显。 $t=120\text{ min}$, -25% 扰动下土水势最大变幅可达 -86.6% , 是+25%扰动对应最大变幅的4.2倍; $t=1440\text{ min}$, -25% 扰动下土水势的最大变幅为 -37.2% , 是对应的+25%情况下的8.7倍。

表 4 θ_r 扰动对应累积入渗量变幅

Table 4 Variation of cumulative infiltration due to the perturbation of residual water content θ_r

扰动步长/%	累积入渗量/cm	累积入渗量变幅/%	扰动步长/%	累积入渗量/cm	累积入渗量变幅/%
25	3.00	-1.08	-5	3.07	1.08
20	3.01	-0.72	-10	3.08	1.44
15	3.02	-0.36	-15	3.09	1.80
10	3.03	0.00	-20	3.10	2.16
5	3.04	0.36	-25	3.11	2.51
0	3.03				

表 5 α 扰动对应累积入渗量变幅

Table 5 Variation of cumulative infiltration due to the perturbation of empirical parameter α

扰动步长/%	入渗总量/cm	入渗总量变幅/%	扰动步长/%	入渗总量/cm	入渗总量变幅/%
25	2.97	-2.15	-5	3.08	1.36
20	2.98	-1.62	-10	3.10	2.02
15	3.00	-1.07	-15	3.12	2.69
10	3.02	-0.50	-20	3.14	3.37
5	3.04	0.10	-25	3.16	4.07
0	3.03				

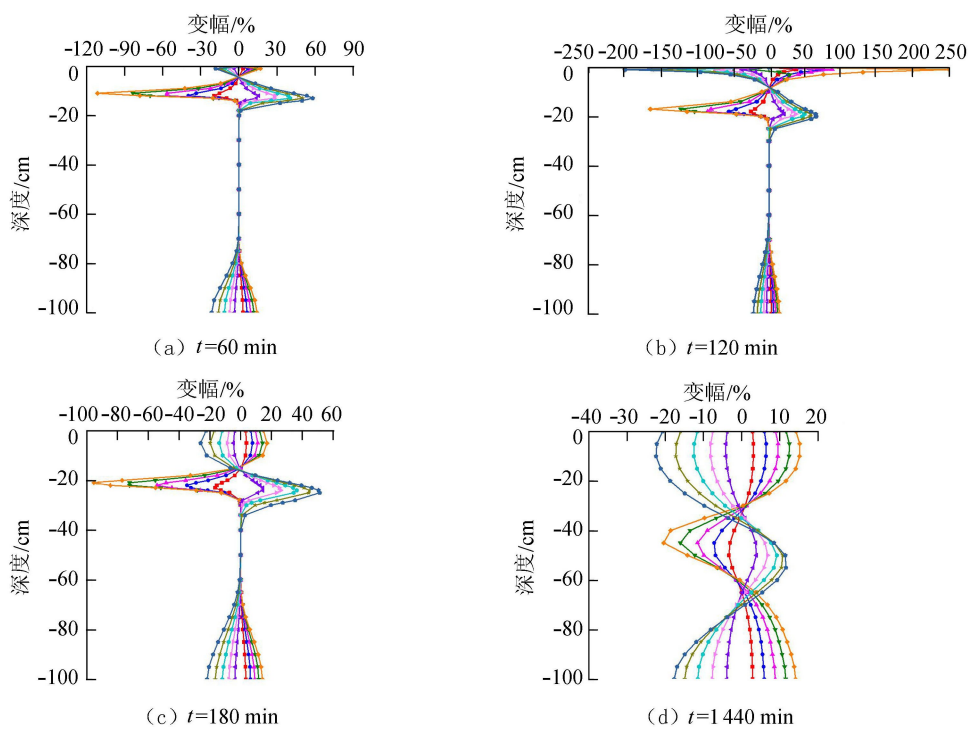


图 7 α 扰动对应土水势变幅

Fig. 7 Variation of soil water potential due to the perturbation of empirical parameter α

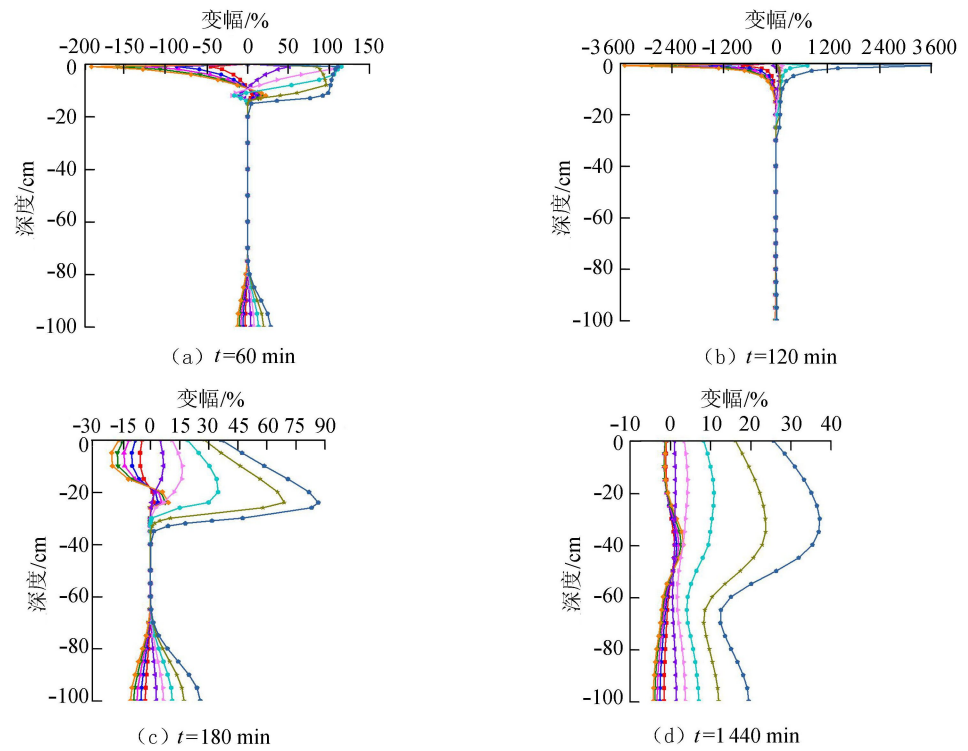


图 8 n 扰动对应土水势变幅

Fig. 8 Variation of soil water potential due to perturbation of empirical parameter n

n 的扰动与累积入渗量呈正相关关系,是 5 个参数中对累积入渗量模拟结果影响最大的参数,对应扰动变幅为 $-36.51\% \sim 38.55\%$ (表 6)。 n 与土壤粒径分布有关, n 值的获取方法与参数 α 类似,需提前给出 n 的取值范围,通过多次迭代拟合确定^[7],或采用基于 Richards 方程的简单入渗法来直接推求,推求过程中应确保吸渗率的准确度^[23]。

4 结 论

a. 在变水头入渗条件下,参数敏感性主要受降雨的影响,降雨过程中参数对土水势敏感性较高,降雨结束时各参数扰动对土水势影响达到最大,降雨停止后参数敏感性降低,土水势的扰动变幅影响均有不同程度降低;5 个参数对土水势敏感性排序为: $n>K_s>\theta_s>\alpha>\theta_r$,其中 K_s 、 θ_s 、 α 和 n 是对土水势模拟结果影响较大的参数。 K_s 与 θ_r 、 θ_s 与 α 对土水势影响规律类似, K_s 和 θ_s 对于整个剖面的土水势影响程度较高,但两者的正负扰动对于土水势的影响有所不同, K_s 的正扰动与 θ_s 的负扰动对土水势变化的深度影响较大, K_s 的负扰动与 θ_s 的正扰动对同层土水势变幅影响较大;相比之下,经验参数 α 和 n 对于地表 0 ~ 10 cm 附近的土水势敏感性较高。

b. 变水头入渗条件下, θ_s 、 K_s 与 n 是对累积入渗量影响较大的参数,±25% 扰动情况下,三者对累积入渗量的影响均不低于 10%,对累积入渗量敏感性排序为 $n>K_s>\theta_s>\alpha>\theta_r$ 。

c. 根据以上分析结果,在利用 HYDRUS-1D 模型进行土壤水分迁移数值模拟时,为了提高模拟的准确性,变水头入渗条件下,需关注 K_s 、 θ_s 、 α 和 n 参数,尤其在研究地表 0 ~ 10 cm 的土壤水运动趋势问题时,需保证 α 和 n 的准确性。

d. 变水头入渗条件下各参数对累积入渗量的影响程度与定水头入渗条件下存在明显差异。对比前人研究成果^[6-7]可知, θ_r 对于外部输入条件的变化最为敏感,在变水头入渗条件下与累积入渗量呈负相关关系,定水头入渗条件下呈正相关关系,变水头入渗条件下对应的累积入渗量扰动变幅是定水头入渗条件下的 1.44 ~ 4.32 倍,因此在研究变化条件下非饱和土壤水运动时要格外注意 θ_r 的选取。

参考文献:

[1] 雷志栋,杨师秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988:1-7.

[2] YAN Renhua, HUANG Jiacong, LI Lingling, et al. Hydrology and phosphorus transport simulation in a lowland polder by a coupled modeling system [J]. Environmental Pollution,2017,227:613.

[3] KROES J G, WESSELING J G, DAM J C V. Intergrated modeling of the soil-water-atmosphere-plant system using the model SWAP 2.0 an overview of theory and an application[J]. Hydrological Processes,2000,14(11/12):1993-2002.

[4] SHAMIR E, GEORGAKAKOS K P. Distributed snow accumulation and ablation modeling in the American river basin [J]. Advances in Water Resources,2006,29(4):558-570.

[5] 汤英,徐利岗,张红玲,等. HYDRUS-1D/2D 在土壤水分入渗过程模拟中的应用[J]. 安徽农业科学,2011,39(36):22390-22393. (TANG Ying, XU Ligang, ZHANG Hongling, et al. Application of HYDRUS-1D/2D in process of soil water infiltration simulation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2011,39(36):22390-22393. (in Chinese))

[6] 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. (WANG Zhitao, JIAO Xiyun, HAN Hongliang, et al. Sensitivity analysis of VG model parameters with vertical one-dimensional soil infiltration[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2013,41(1):80-84. (in Chinese))

[7] 范严伟,赵文举,毕贵权,等. 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. (FAN Yanwei, ZHAO Wenju, BI Guiquan, et al. The influence analysis of parameters variations in Van Genuchten model on the soil infiltration characteristics[J]. China Rural Water and Hydropower,2016(3):52-56. (in Chinese))

[8] 刘钢,高志鹏,屈吉鸿,等. 河流影响下包气带水力参数对压力水头及溶质运移的影响[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(2):72-76. (LIU Gang, GAO Zhipeng, QU Jihong, et al. Effects of hydraulic parameters in the unsaturated zones on pressure head and solute transport under the influence of river[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2017,38(2):72-76. (in Chinese))

[9] 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. (HUO Siyuan, JIN Menggui. Effect of parameter sensitivity of Van Genuchten model on numerical simulation of rainfall recharge[J]. Earth Science,2017,42(3):447-452,470. (in Chinese))

表 6 n 扰动对应累积入渗量变幅

Table 6 The variation of cumulative infiltration due to perturbation of empirical parameter n

扰动 步长/%	入渗 总量/cm	入渗总量 变幅/%	扰动 步长/%	入渗 总量/cm	入渗总量 变幅/%
25	4.20	38.55	-5	2.79	-7.98
20	4.01	32.13	-10	2.54	-16.15
15	3.8	25.16	-15	2.35	-22.66
10	3.57	17.59	-20	2.28	-24.94
5	3.32	9.41	-25	1.93	-36.51
0	3.03				

- [10] MCFARLAND J M. Variance decomposition for statistical quantities of interest[J]. Aiaa Journal, 2015, 12(1):204-218.
- [11] SIMUNEK J. The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media [M]. California: University of California Riverside, 2013.
- [12] GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5):892-898.
- [13] 北京世纪千府国际工程设计有限公司江苏分公司. 南京市暴雨强度公式(修订)查算表[R]. 南京:南京市城市管理局, 2014.
- [14] 陈芸芸. 不同设计暴雨条件下南京主城区易涝点的空间分布研究[D]. 南京:河海大学, 2017.
- [15] KEIFER C J, CHU H H. Synthetic storm pattern for drainage design[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1957, 83:1-25.
- [16] 高惠嫣, 杨路华. 不同质地土壤的水分特征曲线参数分析[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(5):129-132. (GAO Huiyan, YANG Luhua. Analysis of parameters on soil water characteristic curves of different soil texture [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2012, 35(5):129-132. (in Chinese))
- [17] LU Xiaohui, JIN Menggui, Van Genuchten M T, et al. Groundwater recharge at five representative sites in the Hebei Plain, China [J]. Ground Water, 2011, 49(2):286-294.
- [18] DANE J H. Comparison of field and laboratory determined hydraulic conductivity values[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(2):228-231.
- [19] DANE J H, HRUSKA S. In-situ determination of soil hydraulic properties during drainage[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47(47):619-624.
- [20] 朱安宁, 张佳宝, 陈德立, 等. 土壤饱和导水率的田间测定[J]. 土壤, 2000, 32(4):215-218. (ZHU Anning, ZHANG Jiabao, CHEN Deli, et al. Field determination of soil saturated hydraulic conductivity[J]. Soils, 2000, 32(4):215-218. (in Chinese))
- [21] BROOKS R. Properties of porous media affecting fluid flow[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Engineering, 1964, 92(2):61-88.
- [22] 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. (WANG Jinsheng, YANG Zhifeng, CHEN Jiajun, et al. Study on water hysteresis in aerated soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(2):1-6. (in Chinese))
- [23] 邵明安, 王全九, HORTON R, 等. 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):1-8. (SHAO Mingan, WANG Quanjiu, HORTON R, et al. A simple infiltration method for estimating soil hydraulic properties of unsaturated soils I: theoretical analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(1):1-8. (in Chinese))

(收稿日期:2018-02-20 编辑:高建群)