

霍世璐, 段磊, 刘明明, 等. VG 模型参数对灌溉补给系数的敏感性分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(7): 177-185.

HUO Shilu, DUAN Lei, LIU Mingming, et al. Analysis on sensitivities of VG model parameters to irrigation recharge coefficient[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(7): 177-185.

VG 模型参数对灌溉补给系数的敏感性分析

霍世璐^{1,2}, 段磊^{1,2}, 刘明明^{1,2}, 张琛^{1,2}, 曾磊^{1,2,3}, 李瑛^{1,2,3}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710061; 3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 运用模型手段, 计算灌溉补给系数时, VG 模型中水力参数的不确定性严重影响了灌溉入渗补给系数的可靠性, 且目前针对非均质岩土层入渗及其水力参数敏感性的研究较少。基于新疆伊犁霍城县原位试验场灌溉试验, 运用 HYDRUS-2D 软件建立二维饱和-非饱和带水分运移数值模型, 利用 EFAST 法和 Morris 筛选法分析了 VG 模型中水力参数对灌溉补给系数的敏感性, 并分析比较两种方法的一致性。研究表明: 当包气带岩性为均质结构时, θ_s (土壤的饱和含水率) 及 n (VG 模型的形状参数) 共同影响着灌溉补给系数。当包气带岩性处于上粗下细的结构时, θ_s 对灌溉补给系数影响最大, 即表明 θ_s 最为敏感, 而且细颗粒 θ_s 相对于其他水力参数的耦合程度最大。 n 直接影响着土壤水分特征曲线的整体形状。同时 EFAST 法和 Morris 筛选法对参数敏感性分析结果呈现较高的相关性。由于 VG 模型中水力参数数量适中, EFAST 法较 Morris 筛选法工作量合理, 同时对模型参数敏感性分析更加贴近实际。研究成果对获取包气带水分运移模型参数有着重要意义。

关键词: 灌溉补给系数; 水力参数; 敏感性分析; EFAST 法; Morris 筛选法

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.07.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: S27

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)07-0177-09



听语音
聊科研

Analysis on sensitivities of VG model parameters to irrigation recharge coefficient

HUO Shilu^{1,2}, DUAN Lei^{1,2}, LIU Mingming^{1,2}, ZHANG Chen^{1,2}, ZENG Lei^{1,2,3}, LI Ying^{1,2,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region of Ministry of Education, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 3. Xi'an Geological Survey Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: When the irrigation recharge coefficient is calculated by means of model, the uncertainty of hydraulic parameters in VG (Van Genuchten) model seriously affects the reliability of irrigation infiltration recharge coefficient, while few studies are there on the infiltration and the sensitivities of the hydraulic parameters of heterogeneous rock-soil layer at present. Based on the irrigation experiment made in the in-situ experiment field in Huocheng County of Yili Prefecture in Xinjiang, a 2-D numerical model of moisture transfer in the saturated-unsaturated zone is established with the software of HYDRUS-2D, and then the sensitivities of the hydraulic parameters in VG model to the irrigation recharge coefficient are analyzed through EFAST method and Morris's screening method, while the consistency of both the methods is comparatively analyzed as well. The study result shows that when the lithology of vadose zone consists of a homogeneous structure, both the θ_s (saturated soil moisture content)

收稿日期: 2019-08-06

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(121201011000150021); 国家自然科学基金项目(U1603243, 41230314)

作者简介: 霍世璐(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文地质与环境地质方面调查与研究工作。E-mail: 416095748@qq.com

and the n (shape parameter of VG model) jointly affect the irrigation recharge coefficient. When the lithology of vadose zone consists of a structure of upper coarse layer with lower fine layer, the impact from the θ_s on the irrigation recharge coefficient is the largest, that is to say, the θ_s is the most sensitive, while the coupling degree of the θ_s of the fine particle is the largest relative to the other hydraulic parameters. the n directly impacts the whole shape of the soil moisture characteristic curve. Meanwhile, the parameter sensitivity analysis results from both EFAST method and Morris' s screening method exhibit higher correlation. Due to the moderate number of the hydraulic parameters in VG model, the workload of EFAST method is more reasonable than that of Morris' s screening method, and simultaneously, the sensitivity analysis on the model parameter is closer to the reality. The study result has an important significance for obtaining the model parameters of the moisture transfer in vadose zone.

Keywords: irrigation recharge coefficient; hydraulic parameters; sensitivity analysis; EFAST method; Morris' s screening method

0 引言

近年来,对地下水垂向补给规律的研究,日益引起了人们的重视,成为水文地质学比较热门的研究方向;农田灌溉补给是构成平原区地下水补给资源的重要组成部分。目前,针对农田灌溉补给系数的研究较多,KENDY 等^[1]采用栾城综合试验场的农田灌溉实测数据,验证了一维土水平衡模型(soil-water-balance model),并基于此模型计算出该地区的灌溉补给系数;王鹏等^[2]以山西省运城董村农场为例,利用数值模拟手段,对比了不同植被下灌溉水对地下水的补给量;谭秀翠^[3]依据该模型计算出栾城地下水灌溉补给量,并分析出包气带岩性变化对补给的影响。赵佳辉^[4]利用 HYDRUS-1D 模型分析不同灌溉方式下的灌溉补给系数。霍思远等^[5]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。王小丹等^[6]利用 HYDRUS-1D 构建了土壤水分运移模型、作物根系吸水模型和溶质运移模型,模拟研究不同包气带岩性、结构对“三氮”迁移转化的影响。然而,包气带土壤水力参数的不确定性严重影响了灌溉入渗补给系数的可靠性,并且针对非均质岩土层水力参数的研究比较少。因此土壤水力参数的确定对 HYDRUS 模型分析非饱和土壤水运动至关重要,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,同时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。因此,本文通过研究 VG 模型水力参数对非均质岩土层灌溉系数的敏感性,筛选出对灌溉补给结果影响大、需精确校准的参数,以便更科学合理地模拟灌溉补给过程,更好地服务于实际应用。

敏感性分析可以确定参数对模型模拟结果影响的大小,通过仅校正影响较大的参数或提高影响较大的

参数的精度而固定影响较小或无影响的参数,以此减少模型校正的工作量。敏感性分析可以分为两类,一类为局部敏感性分析,另一类为全局敏感性分析。局部敏感性分析指是一次一个变量法(one variable-at-a-time approach)和微分析法(differential analysis, DA)。该方法的优点是,容易操作,计算量小,在数值模拟中,普遍被使用,但是这种方法忽略了参数间的耦合^[7],因此,分析的结果具有片面性。全局敏感性分析突破了局部敏感性分析的局限性,反映了参数相互耦合对模型输出结果的影响,从而克服了局部敏感性分析的缺点。常用的全局敏感性分析方法,主要有回归分析法、Morris 筛选法和 EFAST 法(扩展博里叶幅度灵敏度检验法)。其中,EFAST 法是 SAILTELI^[8]等结合 Sobol 法和 FAST 方法,提出的一种全新的全局敏感性分析,它具有计算高效、稳健和获取的信息较多等特点。Morris 筛选法具有计算比较简单以及高效等特点,在数值模型中应用较为广泛。将这两种敏感性分析法应用于 VG 模型中的研究尚未见报道,且对 VG 模型敏感性研究多集中于参数扰动对土水势^[9]、压力水头的影响^[10]。本文以新疆伊犁地区原位试验场农田灌溉试验为例,通过构建 HYDRUS-2D 水分运移模型,选取 VG 模型中水力参数,分别应用 EFAST 方法和 Morris 筛选法,分析水力参数对灌溉入渗补给的全局敏感性,计算水力参数以及参数间的耦合作用对灌溉补给的贡献率,以期为提高灌溉补给系数的精确度提供科学依据。

1 原理与方法

1.1 模型原理

HYDRUS-2D 模型使用 Richards 方程描述非饱和和土壤水流的运动^[11],对于 Richards 方程中的土壤水分特征曲线和非饱和导水率的计算,HYDRUS-2D 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]

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

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

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1)$$

式中: $\theta(h)$ 为负压水头为 h 时土壤的含水率(%); θ 为土壤含水率(%); θ_r 为土壤的残余含水率(%); θ_s 为土壤的饱和含水率(%); h 为压力水头; $K(h)$ 为压力水头的下的导水率(%); K_s 为饱和导水率(%); α 、 n 和 m 为 VG 模型的形状参数; S_e 为有效饱和度。

1.2 灌溉入渗补给系数

灌溉水经包气带下渗以重力水形式补给地下水的量称为灌溉入渗补给量,当灌溉水是取自当地地下水时,则称为灌溉回归水量,入渗补给量(或回归水量)与灌水量之比称为灌溉入渗补给系数^[13]

$$\alpha = \frac{Q_{\text{入渗补给量}}}{Q_{\text{灌水量}}} \quad (2)$$

地下水入渗补给过程即底部交换量动态变化过程,反映了包气带与饱水带的水量交换。用 HYDRUS 计算灌溉结束 6 d 后,流过隔水底板的水分通量,进而计算地下水补给量,进一步与实际灌水量对比,即可得灌溉入渗补给系数。

1.2.1 EFAST 法

EFAST 法是一种利用方差分析的全局敏感性分析的方法,它认为模型输出方差是由输入的众多参数以及参数相互之间耦合引起的,可以反映模型输出结果对模型参数的响应程度^[14]。因此,可以通过对模型方差进行分解,从而得到各个参数对于总方差的贡献比重,即为参数的敏感性指数^[15]。参数总敏感性不仅包含了自身对模型输出结果的敏感性,也包含了与其他参数相互耦合对模型输出结果的影响,其中总敏感性和一阶敏感性之差,可以表示为该参数与其他参数之间相互耦合对模型输出结果的影响,差值越大,则说明参数之间耦合强度越大。

1.2.2 Morris 筛选法

Morris 筛选法最初由 Morris 在 1991 年提出,目前广泛应用于数值模拟中,作为全局敏感性分析的一种手段,可以用来对最敏感参数进行筛选和识别。Morris 筛选法的基本思想是在模型众多参数中,选取

一个变量,在一定的范围内,进行微弱的变动,并且在其他变量维持不变的情况下,来判断该变量在微弱的变动下,引起模型输出结果响应程度,即其提出的基效应概念^[16]。

假设 $y(x) = y(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其中 x_i 为模型中参数, $y(x)$ 为运行模型后得到的目标函数,用 $w_i(j)$ 表示第 i 个参数和第 j 组样本的的基效应

$$w_i(j) = \frac{(y^* - y)}{\Delta_i}$$

$$\mu_i^* = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t |w_i(j)|$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{t-1} \sum_{j=1}^t [w_i(j) - \mu_i^*]^2} \quad (3)$$

式中: μ_i^* 表示参数敏感性的大小,其值越大,则说明参数的敏感性越高,而且 μ_i^* 还可以确定参数排列顺序; σ_i 表示参数相互作用的程度,其值越高,则表明相互作用越大。

2 试验区概况

试验区位于新疆霍城县伊犁河流域中下游细土平原区,该地区属温带半干旱气候,年平均气温 8.2~9.4℃,年平均蒸发量约 850~1 000 mm,年平均降水量约 140~460 mm; 根据野外调查以及钻孔资料发现,试验农田包气带主要岩性为壤质砂土、砂质壤土以及粉砂质壤土(如图 1 所示和表 1 所列)。因此,本文选择了该地区作为原位农田灌溉试验点,试验期间该地为庄稼收割后的裸地。课题组于 2016 年 8 月

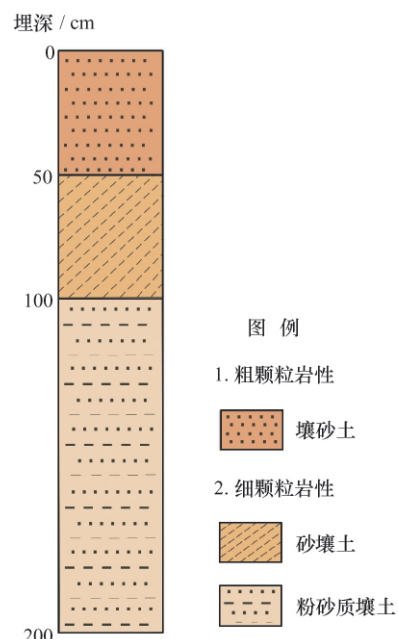


图 1 岩性剖面

期间, 利用含水率观测仪器 TDR 观测灌前及灌水结束后的第 3 d 以及第 6 d 模拟剖面, 分别对 0 cm、10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、90 cm、10 cm、190 cm 和 200 cm 深度的剖面含水率进行监测, 监测频率为 1 次/2 h。

表 1 颗粒分析

深度/cm	砂粒/%	粉砂粒/%	黏粒/%	岩性
1~50	90	6.8	3.2	壤质砂土
50~100	71.6	18.8	9.6	砂质壤土
100~200	14.2	72	13.8	粉砂质壤土

3 数值模拟

3.1 包气带水文地质概念模型

农田灌溉后水分以垂向入渗补给为主, 同时存在侧向渗漏, 基于这种考虑, 将剖面模型概化为二维数值模型, 来研究包气带水分运移规律。试验区为收割庄稼后的裸地, 潜在蒸发量使用修正后的 Penman-Monteith 计算。由于实验期无降雨入渗, 故补给源为灌溉入渗, 排泄项为蒸发排泄。试验场直接灌水区为 15 m×15 m 的正方形, 非灌区 AB、CD 长 15 m 宽 15 m, 模型的概念模型如图 2 所示, AD 为大气边界, AB 以及 CD 在试验期间只产生蒸发排泄; B'C' 边界为试验点的灌水区域, 在试验期间产生蒸发排泄、接受灌溉补给; 侧向边界距离灌区比较远, 所以将 AG 边界以及 DH 边界设置为零通量面; 试验区地下水埋深在 2.5 m, 故将下边界条件设在初始潜水面 2.8 m 处, 可将该边界概化为隔水边界^[17]。

原位试验场为收割庄稼后的裸地, 直接灌区内部岩性为上粗下细结构, 主要岩性为细沙、粉砂以及粉质黏土为主, 因而基于岩性以及厚度, 本文将该岩性结构概化为四层结构, 将灌溉入渗补给系数作为研究对象^[18]

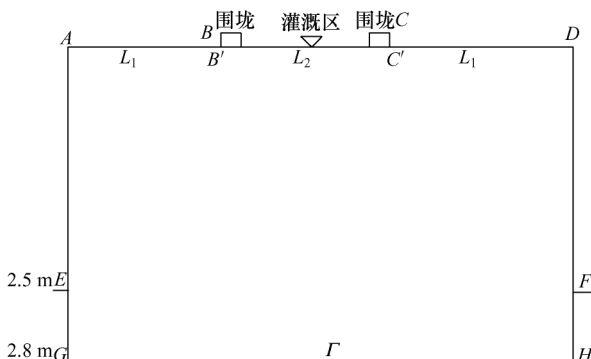


图 2 水文地质概念模型

3.2 数学模型

根据上述包气带水文地质概念模型, 建立以地表为基准, 选取 z 轴向下为正向二维包气带水分运移数学模型^[19]

$$\begin{cases}
 C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] & (x, z) \in \Omega \\
 h(x, z, t) = h_0 & t = 0 \\
 -k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = P + I - E & (x, z) \in AD, t \geq 0 \\
 \frac{\partial h}{\partial z} \Gamma = 0 & (x, z) \in \Gamma, t \geq 0 \\
 \frac{\partial h}{\partial x} AG = 0 & (x, z) \in AG, t \geq 0 \\
 \frac{\partial h}{\partial x} DH = 0 & (x, z) \in DH, t \geq 0 \\
 E = aE_{pm}
 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $C(h)$ 为容水度; Ω 为渗流区域; h_0 为初始时刻模型剖面的压力水头 (cm); Γ 为模型下部边界; P 为降水量, 未发生降雨设置为 0 (cm/d); I 为灌溉量 (cm/d); E 为潜在蒸发量 (cm/d); E_{pm} 为彭曼公式计算所得蒸发量; a 为 7—8 月新疆地区大型水体彭曼公式修正系数^[20], $a = 0.35$ 。

3.3 模型的离散化

利用等间隔的方法, 以 5 cm 为间隔将包气带进行剖分, 上粗下细研究结构剖面共形成结点数 1 980 个。模拟期为 2016 年 10 月 1 日—2017 年 9 月 31 日, 模型采用变时间间隔的方法, 初始初始时间间隔为 0.001 d, 最小时间间隔为 0.000 1 d, 最大时间间隔为 1 d。

3.4 土壤参数的识别

利用 TST-70 饱和渗透仪, 基于试验场的原状土测出饱和和导水率, 最后利用德国生产的 ku-pF 非饱和和导水率测定系统, 自动测定非饱和导水率和土壤水分特征曲线, 再利用 MATLAB 最小二乘法对试验数据进行参数拟合, 得到土壤参数如表 2 所列。

表 2 土壤水分特征曲线拟合参数

岩性	$\theta_s / \%$	$\theta_r / \%$	α / cm^{-1}	n	$K_s / \text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
壤质砂土	5	39	0.01	2.42	256.00
砂质壤土	1.1	41	0.20	1.80	98.00
粉砂质壤土	7.3	49	0.02	1.52	20.00
粉砂质壤土	7.3	49	0.10	1.45	24.00

基于误差平方和 (SSE) 与均方根 (RMSE) 进行误差分析 (见表 3), 土壤水分特征曲线拟合比较好, 符合要求。

表 3 土壤水分特征曲线拟合误差

岩 性	SSE	RMSE
壤质砂土	3×10^{-4}	3×10^{-3}
砂质壤土	4×10^{-3}	3×10^{-2}
粉砂质壤土	1×10^{-4}	1×10^{-3}
粉砂质壤土	3×10^{-4}	2×10^{-4}

3.5 模型识别与验证

在试验期间无降雨发生,由气象资料可知,在计算时段内研究区降雨有效补给量少,与灌水量相比非常小,因此降雨量设置为零,侧向边界距离灌

区较远,侧向补给较小可以忽略不计^[21],故一次灌水后,引起的含水率变化是由于灌水入渗补给所致。原位试验场采用以大水漫灌的方式进行灌溉,灌溉定额为 $0.16 \text{ m}^3/\text{m}^2$,本次数值模拟分别选择了西孔、中孔以及东孔作为模型的拟合孔,利用灌水结束后的第 3 d 以及第 6 d 模拟剖面含水率数据以及实测剖面含水率数据计算 0~200 cm 土层土壤储水量,绘制 0~200 cm 土层土壤储水量随时间变化曲线,模拟土层土壤储水量与实际土层土壤储水量变化趋势类似,拟合效果比较好(见图 3)。

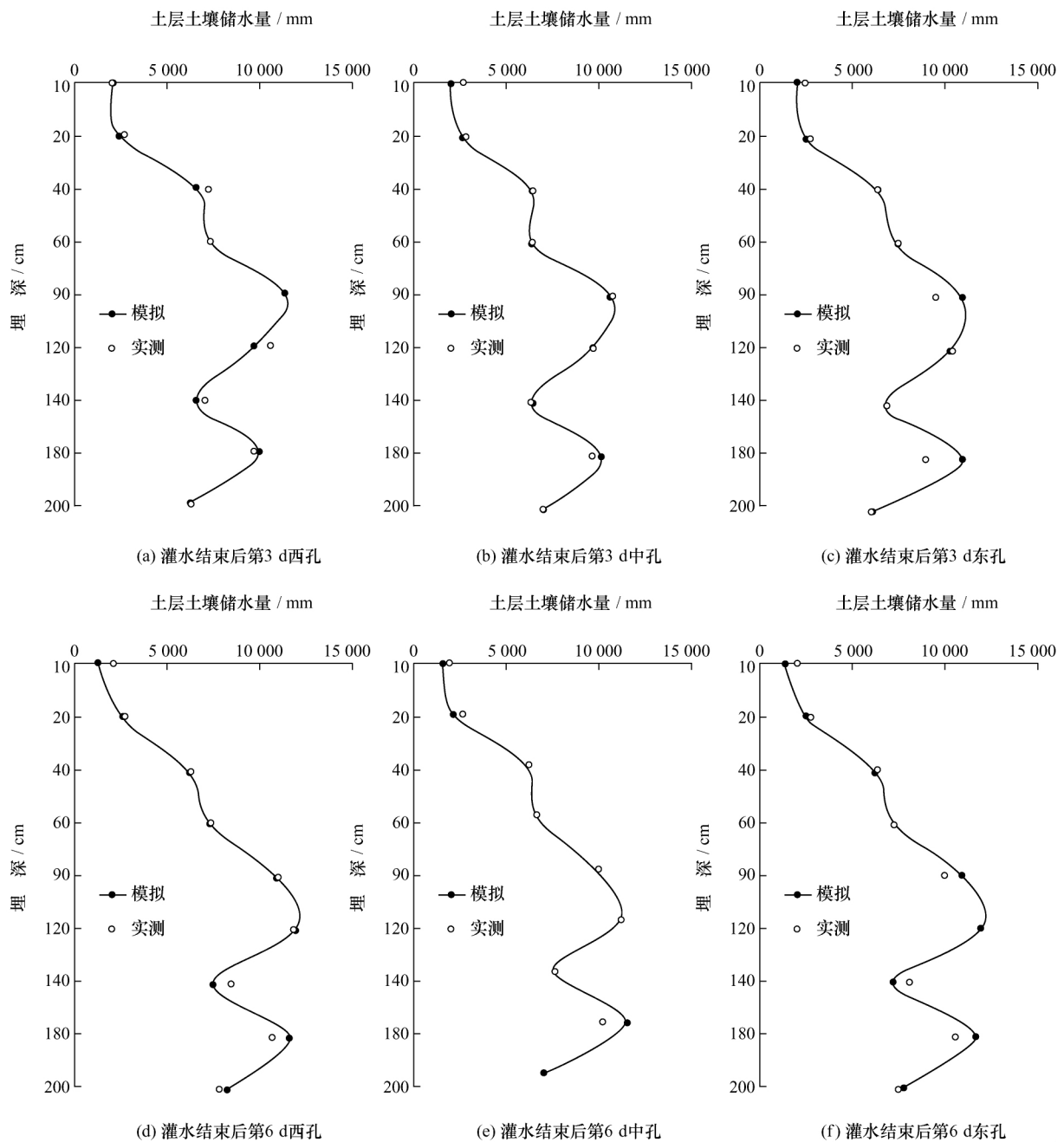


图 3 土壤剖面含水率拟合

4 参数敏感性分析

4.1 水力参数的获取

为了研究水力参数的敏感性以及参数间的耦合作用对灌溉补给系数的敏感性。本次研究根据实验区岩性、厚度以及 HYDRUS-2D 水力参数确定了 20 个参数。由于基于 VG 模型参数的灌溉补给系数的敏感性研究较少,因此本次模拟过程中,首先参考作物模型参数的敏感性分析,将 VG 模型中各参数增减变化幅度设置在 20%,此时这种变化导致模拟结果的变化并不明显,无法进行敏感性差异分析。随后结合前人的参数敏感性研究,将各参数的增减变化幅度调整为 50%,此时模拟结果的变化十分明显且各参数处于合理区间^[22],可进一步讨论 VG 模型参数中灌溉补给系数的敏感性。模型中的 5 种参数中 θ_r 、 θ_s 、 K_s 取决于土壤性质, α 、 n 是模型经验值用于描述刻画土壤水分特征曲线的形状(见表 4)。

4.2 EFAST 法的分析结果

为了研究水力参数的全局敏感性以及耦合作用,本次借助欧盟委员会联和研究中心提供的 Simlab (Version 2.2.1) 软件进行。此软件是基于 Monte Carlo 方法来研究模型参数的敏感性以及耦合作用。具体步

表 4 包气带岩性识别后土壤水力参数

$\theta_r / \%$	$\theta_s / \%$	α / cm^{-1}	n	$K_s / \text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$	l	深度 / cm
5	39	0.15	2.12	256.00	0.5	1~50
4	41	0.05	1.71	98.00	0.5	50~100
7.3	49	0.003	1.64	20.00	0.5	100~150
7.3	49	0.007	1.50	24.00	0.5	150~250

骤(见图 4): (1) 基于原位试验场读取模型所需的含水率参数及一系列土壤参数,概化边界条件建立 HYDRUS 模型,根据颗分确定水力参数和取值范围(见表 5); (2) 利用 Monte Carlo 法对参数随机采样,采样次数 6 805 次(EFAST 法认为采样次数大于参数个数 $\times 65$ 的分析结果有效); (3) 然后将取样的样本输入 HYDRUS,并将结果进行整理; (4) 最后使用 Simlab 软件对模型输出结果进行敏感性分析,得出水力参数的敏感性以及耦合强度,结果如图 5 所示。

目前,对敏感性分析划定尚无统一的标准,本文采用 DEJONGE^[23]在 EFAST 法中界定的一阶敏感指数 $S_i > 0.05$ 和总敏感指数 $ST_i > 0.1$ 为敏感指数的取值标准。当敏感指数小于上述的数据时,不予以讨论。图 5 为模型水力参数敏感指数,其中水力参数的一阶敏感性超过 0.05,从大到小依次排列为: θ_{s3} 、 θ_{s2} 、 θ_{s3} 的敏感指数为 0.76,而 θ_{s2} 的敏感指数为

表 5 水力参数的取值

深度 / cm	岩性	水文地质参数	描述	取值区间
1~50	壤质砂土	θ_{r1}	土壤残余含水率 /%	2.5~7.5
50~100	砂质壤土	θ_{r2}		2~6
100~150	粉砂质壤土	θ_{r3}		3.65~10.95
150~200	粉砂质壤土	θ_{r4}		3.65~10.95
1~50	壤质砂土	θ_{s1}	土壤饱和含水率 /%	19.5~58.5
50~100	砂质壤土	θ_{s2}		20.5~61.5
100~150	粉砂质壤土	θ_{s3}		24.5~73.5
150~200	粉砂质壤土	θ_{s4}		24.5~73.5
1~50	壤质砂土	K_1	饱和水力传导度 / $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$	128~384
50~100	砂质壤土	K_2		49~147
100~150	粉砂质壤土	K_3		10~30
150~200	粉砂质壤土	K_4		12~36
1~50	壤质砂土	α_1	模型形状参数 / cm^{-1}	0.075~0.225
50~100	砂质壤土	α_2		0.025~0.075
100~150	粉砂质壤土	α_3		0.0015~0.0045
150~200	粉砂质壤土	α_4		0.0035~0.0105
1~50	壤质砂土	n_1	模型形状参数	1.06~3.18
50~100	砂质壤土	n_2		1.197*~2.565
100~150	粉砂质壤土	n_3		1.148*~2.46
150~200	粉砂质壤土	n_4		1.05*~2.25

* 由于参数 n 不能减少到 1 以下,因此取值缩小 30%

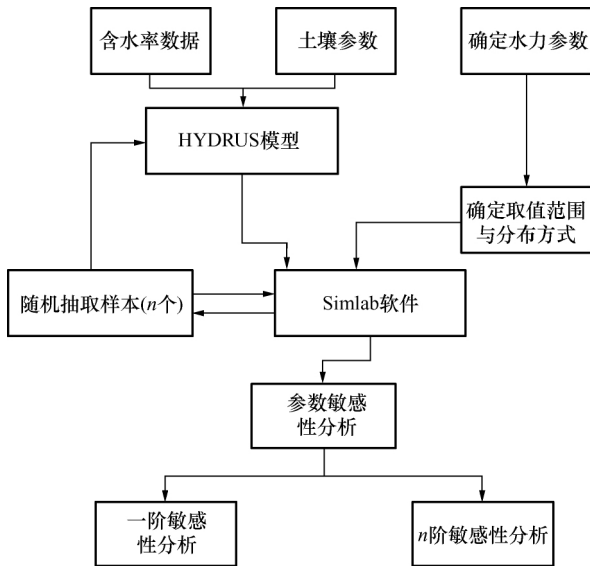


图4 敏感性分析路线

0.13, 其余水力参数的一阶敏感性指数, 没有达到划分标准, 不予以考虑。总敏感指数性指数超过 0.1, 从大到小依次排列为: θ_{s3} 、 θ_{s2} , 其中 θ_{s3} 总敏感性指数对灌溉补给系数的贡献率高达 0.80, 而 θ_{s2} 达到 0.15。除了第四层岩土, 不难看出, 随着岩土层颗粒的减少, 从上到下, 岩土层剖面饱和含水率对灌溉补给系数的贡献率是逐渐增加的。这主要是经过一个水

文年的水分运移后, 水分运移到下部粉质黏土层, 并接近饱和状态。总敏感指数 ST_i 和一阶敏感指数 S_i 之差, 可以表示为该参数与其他参数之间相互耦合对模型输出结果的影响, 差值越大, 则说明参数之间耦合作用越大。由图 5 中各个参数的耦合强度可知, θ_{s3} 和 θ_{s2} 在水力参数之中, 相对于其他参数的耦合程度最大。

4.3 Morris 筛选法的分析结果

同时选用在数值模拟中运用比较广泛的 Morris 筛选法, 对水力参数进行敏感性分析。首先基于水力参数取值范围(见表 5), 利用 Monte Carlo 方法随机取样 204 次, 然后将采样的随机数组, 输入 HYDRUS 模型, 获得灌溉补给系数, 最后通过 Simlab 软件的 Morris 筛选法, 计算参数的敏感性以及评价参数敏感性对模型输出结果的影响, 输出的结果如图 6 所示。

目前对于 Morris 筛选法的敏感参数的划分标准, 尚无统一的定论。本研究根据前人的研究和专家推荐的 Morris 筛选法界定 $\mu_{average}^* < \mu^* < \mu_{max}^*$ 的敏感参数, 当符合标准, 即认为敏感^[21]。图 6 为模型水力参数敏感性分析结果, 达标参数从大到小依次为: θ_{s3} 、 θ_{s2} 、 θ_{s4} 、 θ_{s1} 、 n_1 和 α_1 。其中敏感参数中 θ_{s2} 和 θ_{s4} 和 n_4 的水力参数耦合强度标准差最大, 表明土壤型水力参数中 θ_{s2} 和 θ_{s4} 两个水力参数的耦合作用比其他参数的耦合强度大, 模型形状参数中 n_4 的耦合作用比其他参数的耦合强度大。

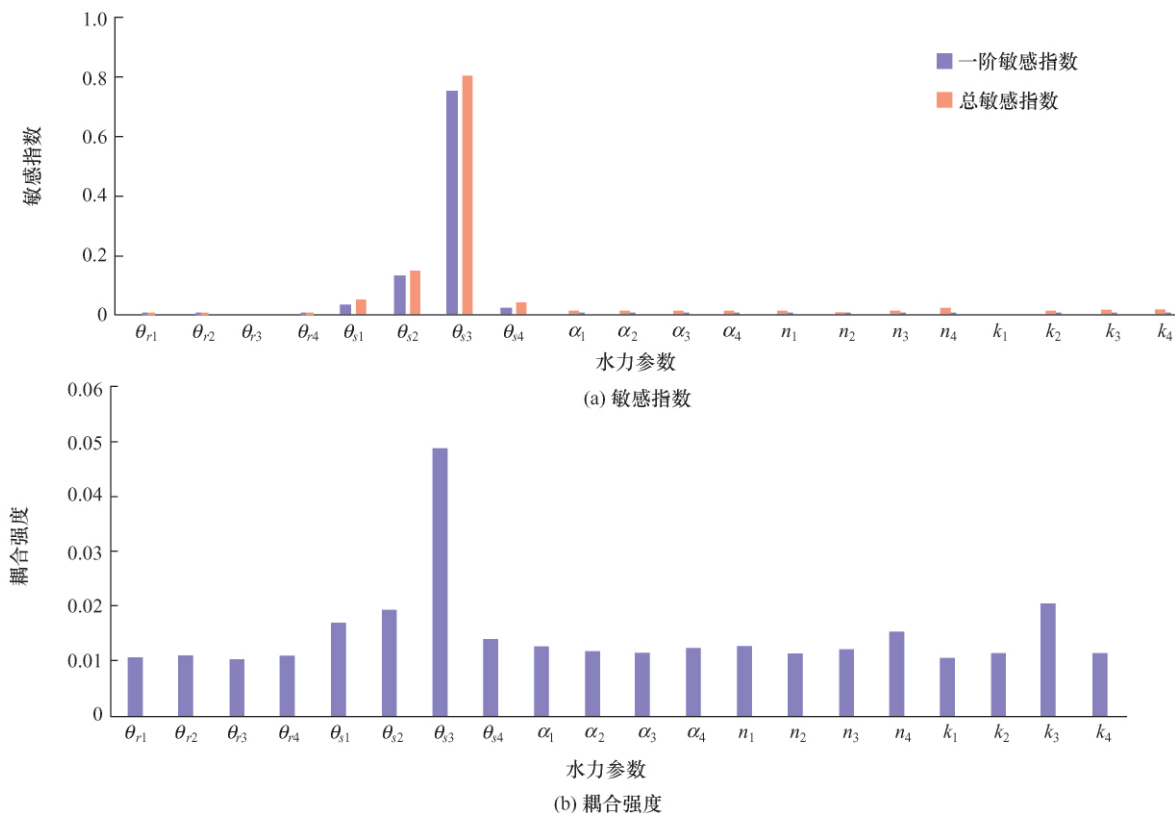


图5 基于 EFAST 法对水力参数的敏感性分析结果

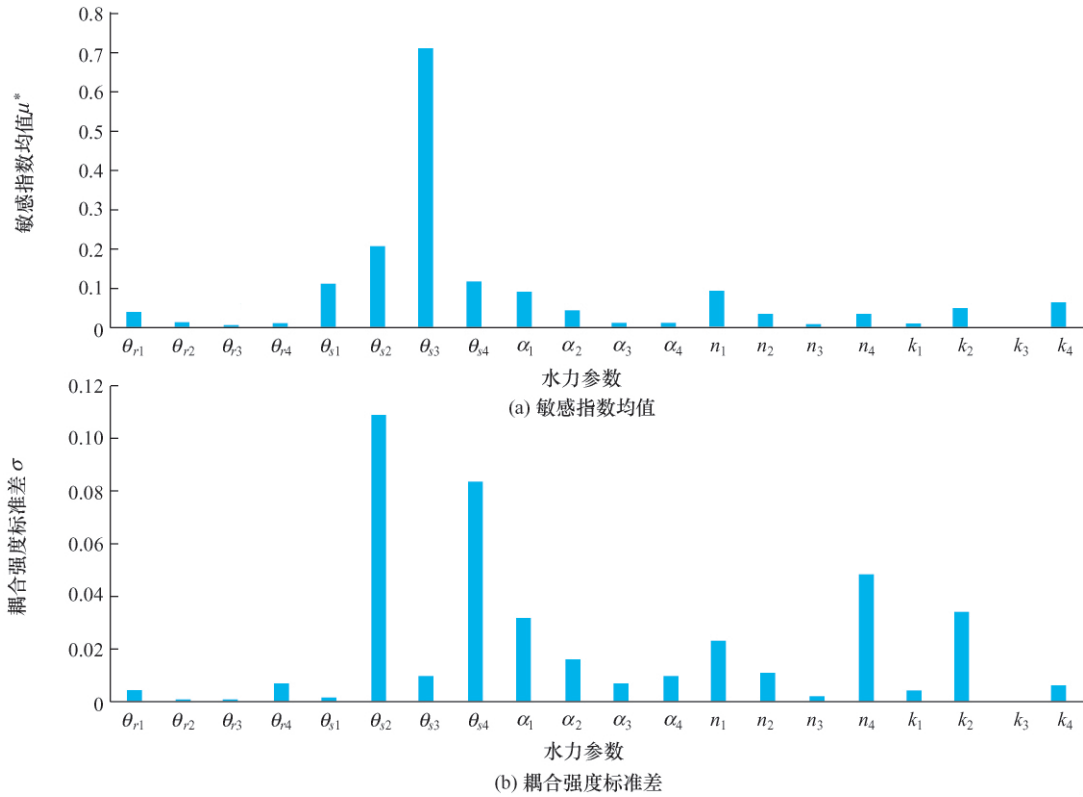


图 6 基于 Morris 筛选法对水力参数的敏感性分析结果

4.4 结果分析与讨论

利用 EFAST 法定量分析了各个水力参数对灌溉补给系数的敏感性，获得一阶敏感指数和总敏感指数，在符合 EFAST 法中界定的水力参数取值范围中，得出 θ_{s3} 和 θ_{s2} 这两个土壤型水力参数对灌溉补给系数影响最大，总敏感指数为 0.80，而 θ_{s2} 达到 0.15，而且 θ_{s3} 和 θ_{s2} 在水力参数之中，耦合程度最大。

利用相同的取值范围，Morris 筛选法和 EFAST 法敏感性的界限范围内，都得出 θ_{s3} 敏感度性最大， θ_{s2} 其次，Morris 筛选法和 EFAST 法得到参数敏感性分析有着较高的相关性，同时证明了分析结果的可靠性。在参数的耦合性方面，利用 EFAST 抽样分析，得到 θ_{s3} 和 θ_{s2} 的耦合强度最大，但是利用 Morris 筛选法分析，得到 θ_{s2} 和 θ_{s4} 耦合强度最大，这主要是因为 Morris 筛选法取样次数少于 EFAST 法取样次数 30 多倍，可能出现参数的取值过度简化等问题。因而，在实际应用低估了参数的耦合强度，所以当模型参数对模型敏感性分析要求比较高且参数数量适中时，从工作量及结果的可靠性来讲 EFAST 方法更加适用。

由图 4 和图 5 的计算结果可知，下部细颗粒饱和含水率对灌溉补给系数的影响比较大。而 JIMENEZ-MARTINEZ^[24] 和孟江丽等^[25] 认为， n 和 θ_s 对于灌溉

补给系数的影响比较最大。这主要是经过一个水文年的水分运移后，水分运移到下部粉质黏土层(见图 2)，并接近饱和状态。而在细颗粒中 VG 模型参数中 θ_s 对水分特征曲线低吸力段影响显著，而 n 变化会影响土壤水分特征曲线的弯曲程度以及整体形状，但其参数主要在土壤释水的后期，发挥着主导性作用，而 θ_r 在灌水后期开始发挥着重要作用^[26]。这也印证了 Morris 筛选法得出的 θ_{s2} 和 θ_{s4} 和 n_4 的水力参数耦合强度标准差最大，最为敏感。因此，当岩土层剖面处于上粗下细的情况下，土壤参数中的下部细颗粒岩层的饱和含水率及模型形状参数 n ，将是影响水分向下运移的重要因素。

5 结论

本文基于新疆伊犁霍城县原位试验场利用 EFAST 法和 Morris 筛选法，针对 VG 参数模型对 5 种灌溉补给系数进行敏感性分析，当包气带岩土层处于上粗下细的结构时，细颗粒饱和含水率对灌溉补给系数结果影响最大，即含水率 θ_s 最为敏感，而且细颗粒饱和含水率在水力参数之中，相对于其他参数的耦合程度最大。其次参数 n 决定着模型形状，其敏感性主要体现在土壤释水的后期， n 对土壤水分特征曲线的整体

形状起主导性作用。因此,在灌溉补给系数计算模型的实际应用中,需要对细颗粒的岩土层进行加密取样,保证参数的精确度,使用控制单因素变量法对 n 进行反复调整,提高参数精确度。

与局部敏感性分析相比全局敏感性克服了局部敏感性分析的片面性,但是从研究结果表明基于 VG 模型利用 Morris 筛选法以及 EFAST 法对灌溉补给系数进行全局敏感性分析的时候,从工作量及结果的可靠性来讲 EFAST 法更加适用。

参考文献:

- [1] KENDY E, GERARD-MARCHANT P, WALTER L D, et al. A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(10): 2011-2031.
- [2] 王鹏, 宋献方, 袁瑞强, 等. 基于 HYDRUS-1D 模型的农田 SPAC 系统水分通量估算: 以山西省运城城市董村农场为例[J]. *地理研究*, 2011, 30(4): 622-634.
- [3] 谭秀翠. 华北平原地下水补给研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- [4] 赵佳辉. 巴音河流域农田灌溉模式对地下水补给的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [5] 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): 137-142.
- [6] 王小丹, 凤蔚, 王文科. 基于 HYDRUS-1D 模型模拟关中盆地氮在包气带中的迁移转化规律[J]. *地质调查与研究*, 2015(4): 291-298.
- [7] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 水文模型参数敏感性分析方法评述[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(6): 105-112.
- [8] SALTELLI A, TARANTOLA S, CHAN P S. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output[J]. *Technometrics*, 1999, 41(1): 39-56.
- [9] 张海阔, 姜翠玲, 李亮. 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): 36-44.
- [10] 高志鹏, 屈吉鸿, 陈南祥. 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): 70-76.
- [11] CREVOISIER D, VOLTZ M. WATSFAR: numerical simulation of soil water and solute fluxes using a fast and robust method[C]// EGU General Assembly Conference Abstracts, Vienna, Austria: EGU, 2013.
- [12] GENUCHTEN V, TH. M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils I[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892.
- [13] 朱仲元, 刘廷玺, 王清宇, 等. 求灌溉入渗补给系数的一种简易方法: 趋势模拟积分法[J]. *内蒙古农牧学院学报*, 1995(2): 91-98.
- [14] 吴锦. 基于 EPIC 模型的冬小麦生长模拟参数全局敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 136-142.
- [15] ZENG W Z, XU C, WU J W, et al. Soil salt leaching under different irrigation regimes: HYDRUS-1D modelling and analysis[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(1): 44-58.
- [16] CAMPOLONGO F, CARIBONI J, SALTELLI A. An effective screening design for sensitivity analysis of large models[J]. *Environmental Model & Software*, 2007, 22(10): 1509-1518.
- [17] JAGTAP S S, LAL U, JONES J W, et al. Dynamic nearest-neighbor method for estimating soil water parameters[J]. *Transactions of ASAE*, 2004, 47(5): 1437-1444.
- [18] HOU L Z, WANG X S, HU B X, et al. Experimental and numerical investigations of soil water balance at the hinterland of the Badain Jaran Desert for groundwater recharge estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 386-396.
- [19] 霍思远, 靳孟贵. 不同降水及灌溉条件下的地下水入渗补给规律[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(5): 6-13.
- [20] 张国威, 周聿超. 新疆内陆干旱区蒸发的计算和分析[J]. *水科学进展*, 1992, 3(3): 226-232.
- [21] 周广林, 王全九, 李云. HYDRUS-3D 模型模拟田间点源入渗与水分再分布准确性评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(2): 113-121.
- [22] KENDALL C, DEJONGE, JAMES C, et al. Global sensitivity and uncertainty analysis of a dynamic agroecosystem model under different irrigation treatments[J]. *Ecological Modelling*, 2012, 231(4): 113-125.
- [23] 吴立峰, 张富仓, 范军亮, 等. 不同灌水水平下 CROPGRO 棉花模型敏感性和不确定性分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 55-64.
- [24] JIMENEZ-MARTINEZ J, SKAGGS T H, GENUCHTEN M T V, et al. A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 367(1): 138-149.
- [25] 孟江丽, 董新光, 周金龙, 等. HYDRUS 模型在干旱区灌溉与土壤盐化关系研究中的应用[J]. *新疆农业大学学报*, 2004, 27(1): 45-49.
- [26] 陈卫金, 程东会, 陶伟. Van Genuchten 模型参数的物理意义[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(6): 147-151.

(责任编辑 尹美娥)