

随机降雨对滨海盐碱土壤水分分布的影响

郭爱科¹, 武海霞^{1,2}, 陶涛³, 宋福如⁴,
宋利强⁴, 宋聚强⁴, 王利书^{1,2}, 程东娟^{1,2}

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038;
3. 海河水利委员会漳河上游管理局, 河北 邯郸 056038; 4. 河北硅谷肥业有限公司, 河北 邯郸 056038)

摘要:采用矩形脉冲模型随机模拟降雨过程, 驱动 HYDRUS 模型分析土壤水分分布状况, 应用析因设计方差分析方法量化降雨总量、降雨次数、极端降雨以及其时程分配特征对土壤含水率的影响。研究聚焦我国滨海平原盐碱地, 以黄骅市为典型对象, 定量分析 3 日逐小时降雨过程对不同深度土层(0~150 cm)土壤含水率的影响。结果表明: 相较降雨过程的随机性而言, 降雨对土壤含水率的影响因素降雨总量(A) > 降雨次数(B) > 极端降雨(C), 且降雨总量与次数间二阶交互作用对土壤含水率影响显著($P < 0.05$); 降雨总量一定时, 当降雨次数较低(10 次), 其平均降雨强度较大, 相较于降雨次数较高(15、20 次), 活跃层土壤含水率增高 2.74%~6.23%, 而相对稳定层土壤含水率降低 5.66%~15.63%; 随机降雨与均匀降雨对浅层土壤含水率影响的差异较小, 但随着土层深度的增大, 两种降雨方式下土壤含水率的差异不断增大, 当降雨总量为 250 mm 时, 均匀降雨条件下的稳定层土壤含水率相较于随机降雨最大增幅达 39.52%, 且相比于均匀降雨过程, 随机降雨在降雨总量较小(160 mm 与 200 mm)时可入渗至稳定层; 相较降雨总量对土壤含水率的影响, HYDRUS 模型参数土壤饱和含水率(θ_s)的不确定性对土壤含水率影响更大。

关键词: 随机降雨; 盐碱土; 土壤含水率; 降雨总量; HYDRUS-1D

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Effects of stochastic rainfall on water distribution in coastal saline-alkali soil

GUO Aike¹, WU Haixia^{1,2}, TAO tao³, SONG Furu⁴, SONG Liqiang⁴,
SONG Juqiang⁴, WANG Lishu^{1,2}, CHENG Dongjuan^{1,2}

(1. Hebei University of Engineering School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Handan, Hebei 056038, China;
2. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Handan, Hebei 056038, China;
3. Haihe Water Conservancy Committee Zhanghe Upstream Management Bureau, Handan, Hebei 056038, China;
4. Hebei Silicon Valley Fertilizer Co. Ltd., Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: This study employed the Neyman-Scott rectangular pulse model to simulate hourly rainfall with the restriction of total rainfall amount, rainfall frequency and extreme rainfall event. The HYDRUS model was performed to disclose the characteristics of soil water. Integrating aforementioned models, we presented a factorial ANOVA method to quantify impacts of total rainfall amount, rainfall frequency and extreme rainfall event on soil moisture movement. Compared with the randomness of rainfall process, the order of influencing factors of rainfall on soil moisture content was total rainfall (A) > rainfall frequency (B) > extreme rainfall (C), and the second-order interaction between total rainfall and frequency had a significant impact on soil moisture content ($P < 0.05$). When the total amount of rainfall was certain and the number of rainfalls was low (10), the average rainfall intensity was large. Compared with the higher number of rainfall (15 and 20 times), the surface soil moisture content increased

收稿日期: 2021-10-21

修回日期: 2021-12-12

基金项目: 河北省自然科学基金面上项目(D2019402151, E2019402468); 河北工程大学创新基金博士专项项目; 邯郸市科学技术研究与发展规划项目(201422012330, 19112012018); 山西省水利科学技术研究与推广项目(2022GM019)

作者简介: 郭爱科(1996-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为土壤盐运移与数值模拟。E-mail: guoaike126@126.com

通信作者: 武海霞(1978-), 女, 甘肃天水人, 博士, 副教授, 主要从事水资源高效利用与节水灌溉研究。E-mail: whx2307@126.com

by 2.74%~6.23%, while the soil moisture content in the relatively stable layer decreased by 5.66%~15.63%. The difference between random rainfall and uniform rainfall on shallow soil moisture content was relatively small, but with the increase of soil depth, the difference of soil moisture content was increasing under the two rainfall modes. While the total rainfall was 250 mm, the maximum increase of soil water content in the stable layer under the condition of uniform rainfall was 39.52% compared with the random rainfall. Compared with the uniform rainfall process, the random rainfall infiltrated into the stable layer when the total rainfall was small (160 mm and 200 mm). In addition, compared with the influence of total rainfall on soil moisture content, the uncertainty of saturated hydraulic conductivity(θ_s) of HYDRUS model parameter has a greater impact on soil moisture content.

Keywords: stochastic rainfall; saline-alkali soil; soil water content; total rainfall; HYDRUS-1D

盐碱土是一种世界范围内的低产土壤,由于我国水土资源日益减少,实行节水灌溉、改良利用盐碱土是解决水土资源危机的重要措施^[1]。盐碱土的水分分布状况直接决定其盐分分布规律,同时其土壤水分状况将影响灌溉制度的制定^[2]。降雨作为土壤水分动态变化的重要驱动因素,其随机时程分配特性是导致降雨入渗过程以及作物灌溉需水动态过程中不确定性产生的直接原因^[3]。揭示由随机降雨引起的土壤水分变化特征,研究其演变机理,分析降雨特性对其影响程度,对于合理制定节水灌溉制度、掌握盐碱土壤水分分布动态规律等方面具有重要实际意义与理论价值。

降雨对水文循环过程的研究至关重要,尤其是土壤水分空间分布规律的研究。刘汗等^[4]通过比较不同降雨强度下的土壤入渗性能,认为土壤水分入渗性能随着降雨强度的增加而降低。葛波等^[5]通过分析不同降雨等级下各层土壤含水率对降雨事件的响应,结果表明浅层土壤含水率与降雨量变化趋势具有良好的同步性。白盛元等^[6]研究了不同降雨量级对土壤剖面含水率的影响,研究结果认为土壤水分的垂直输送具有滞后性,降雨对土壤水分的补给效果随深度而减弱。目前关于降雨对土壤水分分布影响的研究较多,但学者们通常将自然降雨事件概化为均匀降雨过程,对于考虑降雨事件随机性的研究较少。

通常利用降雨单元的随机时程分配特性描述降雨过程的随机性,Rodríguez-Iturbe 等^[7-8]提出基于 Poisson 过程表示降雨事件的随机特性。Rodríguez-Iturbe 等^[9]首先在日尺度以下的随机降雨模拟中引入矩形脉冲理论,提出 Neyman-Scott 矩形脉冲降雨模型。Fowler 等^[10]基于 Neyman-Scott 矩形脉冲降雨模型,利用蒙特卡洛抽样法预测了英国约克郡 30 年内的气候变化情况。Mimeau 等^[11]利用 Neyman-Scott 矩形脉冲降雨模型模拟了地中海区域土壤含水率对随机降雨的响应。如上所述,目前国内学者

对于普通降雨特征对土壤水分的影响进行了诸多探讨,但降雨过程的随机性如何影响土壤水分分布状况,降雨随机时程分配特征对不同土层土壤水分的影响程度,当前研究关注较少。

综上所述,为揭示降雨过程的随机性对土壤水分的影响,以降雨总量、降雨次数与极端降雨量级为降雨特性,采用 Neyman-Scott 矩形脉冲模型模拟随机视角下的降雨过程,进而驱动 HYDRUS 模型分析土壤水分分布特征,应用析因设计方差分析方法量化降雨总量、降雨次数、极端降雨量级以及其时程分配特征对土壤水分的影响,并扩展性地讨论了相较降雨特征变化,HYDRUS 模型参数的不确定性对土壤水分的影响。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区域为河北省黄骅市典型盐碱地,地形为滨海平原,气候属于暖温带大陆性季风气候,冬春雨雪稀少,夏季降雨量占全年降雨总量的 75%,年均降雨总量为 627.8 mm,最大年降雨总量为 937.0 mm,最小年降雨总量为 303.6 mm。土壤类型主要为潮土、盐化潮土和沼泽化潮土,盐碱地占耕地面积 69%。土壤含盐量为 0.2%~2%,为硫酸盐氯化物盐土^[12]。

1.2 基于 Neyman-Scott 矩形脉冲 (NSRP) 模型的降雨模拟

一次完整的降雨事件可划分为若干连续的不同长度的时段,各时段内降雨强度相同,相邻时段间雨强不同。研究表明,该降雨事件的特征可通过若干基本的降雨单元进行模拟^[13-15]。鉴于此,Rodríguez-Iturbe 等^[16]基于点过程理论,引入 Neyman-Scott 矩形脉冲模拟降雨过程。该模型本质为簇生点过程模型,可采用少量参数表示降雨过程及其潜在的物理现象^[17]。模型中随机变量服从的分布、参数及其单位如表 1。

表 1 NSRP 模型随机变量分布及参数
Table 1 Distribution and parameters of stochastic variables of NSRP model

随机变量 Stochastic variable	概率分布 Probability distribution	参数 Parameter	单位 Unit
降雨事件起始点 Origin of storms	泊松分布 Poisson	λ	h^{-1}
降雨单元数 Number of cells	几何分布 Geometric	μ_c^{-1}	
降雨单元的位置 Position of cells		β	h^{-1}
降雨单元的持续时间 Duration of cells	指数分布 Exponential	η	h^{-1}
降雨单元的强度 Intensity of cells		μ_x^{-1}	$\text{h} \cdot \text{mm}^{-1}$

1.3 基于 HYDRUS 模型的土壤水分入渗模拟

1.3.1 HYDRUS 模型概述 HYDRUS 模型已被广泛应用于分析水流与溶质在非饱和介质中的运移过程。模型在非饱和水流中使用经典的 Richards 方程来描述一维垂直或水平水流运动:

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

式中, h 为负压水头 (mm), θ 为土壤体积含水率 ($\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}$), K 为水力传导系数 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$), t 为入渗时间 (h), z 为垂向坐标轴,向上为正 (mm)。

土壤水分特征曲线是反映土壤基质势与含水率之间关系的重要水力参数。HYDRUS 软件中分别提供了 VG (Van genuchten) 模型、BC (Brooks and Corey) 模型以及 Kosugi 模型用于拟合土壤水分特征曲线,本文采用应用广泛的 VG 模型,其方程为:

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

$$K(h) = K_s \frac{\{1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^m\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{\frac{m}{2}}} \tag{3}$$

式中, K_s 为饱和导水率 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$), θ_r 为土壤残余含水率 ($\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}$), θ_s 为土壤饱和含水率 ($\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}$), α 为进气吸力的倒数 (mm^{-1}), n 为孔径分布参数, m 为水分特征曲线参数。

1.3.2 初始条件与边界条件 本次研究模拟土壤深度为 150 cm,为分析逐小时尺度下降雨入渗情况,模型模拟时段设置为 72 h,模拟时间步长为小

时。为便于分析不同土层深度下降雨综合特性对土壤水分入渗的影响,根据不同土层土壤水分标准差与变异系数将土壤剖面概化为 4 层,0~20 cm 为活跃层(变异系数 35%~40%和标准差 9~10),20~60 cm 为次活跃层(变异系数 20%~35%和标准差 6~9),60~100 cm 为相对稳定层(变异系数 10%~20%和标准差 1~6),100~150 cm 为稳定层(变异系数<10%和标准差<1)^[18]。

初始条件:初始体积含水率(θ_0)为 15.67% ($\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}$)。

$$\theta(z,0) = \theta_0(z) \tag{4}$$

上边界:模型上边界条件设置为考虑积水的大气通量边界,最大积水深度为 10 cm。上边界输入变量为考虑随机时程分配的降雨方案。

$$-K \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + 1 \right) = q(t) - \frac{dh_f}{dt} \tag{5}$$

式中, K 为土体边界层的导水率 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); q 为入渗补给量,即降雨强度 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); h_f 为土体表层积水深度 (mm); dh/dt 为土体表面蓄水引起的水量的变化量 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)。HYDRUS 模型设定入渗率开始减小时刻为积水点,到达积水点后上边界转变为变水头边界,地表积水高度由于降雨而增加,因入渗而降低。

下边界:研究区域地下水位埋深平均为 7 m,下边界可概化为自由排水边界。

1.3.3 模型参数率定 基于 HYDRUS-1D 模型自带的 Rosetta 模块,输入土壤质地与容重,可初步得到土壤水分特性参数,然后通过一维垂直积水入渗试验实测数据进行参数率定。入渗试验土柱选用厚 1 cm 的 PVC 管,土柱内径为 7 cm,高 60 cm;填装土壤取自黄骅市盐碱地试验田,经风干后过 2 mm 筛,装填高度为 50 cm,装填容重为 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,试验重复 3 次。PVC 管侧均匀分布 10 个直径为 2 mm 的小孔,插入传感器测定不同时刻下土壤含水率,马氏瓶控制供水水头为 5 cm 左右。率定后的 VG 模型参数结果如表 2。

为验证模型参数的准确性,以率定后的 VG 模型参数(表 2)为 HYDRUS 模型的初始土壤水分特性参数并建立模型,模型初始条件与边界条件与反演试验一致。由图 1 可以看出,率定的模型参数很好地模拟了盐碱土壤水分入渗下土壤含水率的变化,且模拟值与实测值非常接近,其中模拟结束后各土层含水率与对应的实测值的皮尔逊相关系数(R)为 0.997,表明经率定后的 HYDRUS 模型参数可作为随机降雨入渗模型的参数。

表 2 率定后的 Van genuchten 模型参数
Table 2 Calibrated Van genuchten model parameters

土壤质地 Soil texture/(mm ³ ·mm ⁻³)	θ_r (mm ³ ·mm ⁻³)	θ_s (mm ³ ·mm ⁻³)	α (mm ⁻¹)	n	K_s (mm·h ⁻¹)
砂壤土 Sandy loam	0.0437	0.392	0.00108	1.36	15.64

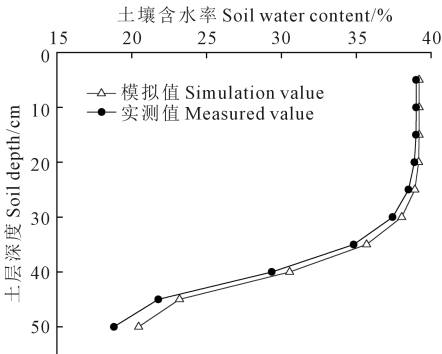


图 1 HYDRUS-1D 模型参数模拟值与实测值对比
Fig.1 Comparison of simulation and measurement of HYDRUS-1D model parameters

1.4 基于随机时程分配的降雨方案设计

采用三水平析因设计方法设计研究地区降雨方案,研究表明,黄骅市年降雨主要集中在夏季,且极端降雨量级以 40~60 mm·h⁻¹ 为主^[19]。本文基于黄骅市 2010—2020 年实测逐时降雨资料,在 Matlab 软件环境下,采用 Monte Carlo 方法以及 NSRP 降雨过程随机模拟模型,以降雨总量(A)、降雨次数(B)、极端降雨量级(C)为实验因子,每个因子设置高中低 3 个方案,两两组合形成 27 个方案。其中,以各个方案中降雨总量、降雨次数以及极端降雨量级为约束条件,采用 Monte Carlo 方法随机模拟每个方案 100 次(即重复数为 100),以此表征降雨过程的随机性,具体方案设置见表 3。

2 结果与分析

2.1 降雨资料分析与模拟结果

以黄骅地区 2001—2010 年 7 月实测的逐时降雨资料为基准,在 Matlab 软件环境下,采用矩法估计 NSRP 模型参数,结果见表 4。

基于黄骅地区 NSRP 降雨模型,采用 Monte Carlo 法,随机生成不同降雨总量、降雨次数、极端降雨约束下的多场降雨过程。以降雨总量为 200 mm(A₂方案)、降雨次数为 15 场(B₂方案)与极端降雨量级分别为 40 mm·h⁻¹(C₁方案)、50 mm·h⁻¹(C₂方案)、60 mm·h⁻¹(C₃方案)为例,随机模拟 5 场降雨过程,结果如图 2 所示。

表 3 基于随机时程分配的降雨方案设计
Table 3 Rainfall scheme design based on stochastic time and degree distribution of rainfall

项目 Item	降雨特性 Rainfall characteristics			重复数 Number of cases
	降雨总量 A Total rainfall /mm	降雨次数 B Rainfall frequency	极端降雨 C Extreme rainfall /(mm·h ⁻¹)	
L1	160	10	40	100
L2	200	15	50	100
L3	250	20	60	100

表 4 黄骅地区降雨资料的统计学参数及 NSRP 模型参数
Table 4 Statistical parameters of rainfall data and parameters of NSRP model

参数 Parameter	最小值 Min. value	最大值 Max. value	计算值 Calculated value
λ	1×10^{-5}	0.02	0.02
β	0.02	1.00	0.20
μ_c^{-1}	0.1	30.00	1.17
η	0.1	60.00	0.21
μ_λ^{-1}	0.01	4.00	0.18

2.2 降雨总量、降雨次数、极端降雨及随机时程分配对土壤含水率的影响

表 5 为采用析因设计方差分析方法分析降雨总量、降雨次数、极端降雨及随机时程分配对土壤含水率的影响结果。由表 5 可以看出,与降雨过程的随机性影响相比,降雨总量和降雨次数对各土层含水率均存在极显著影响($P<0.01$),而极端降雨仅对次活跃层影响显著($P<0.05$);对比 F 值发现降雨总量对除活跃层外的土层含水率影响远大于降雨次数与极端降雨。降雨总量与次数间二阶交互作用对除去表层土壤的其余土层含水率影响显著,而 3 种因素三阶交互作用($A \times B \times C$)对土壤含水率不存在显著影响。

2.3 降雨次数、极端降雨及随机时程分配对土壤含水率的影响

由于降雨总量对土壤含水率的影响最大,因此有必要在控制降雨总量的影响下,进一步分析降雨次数、极端降雨与降雨时程分配对不同土层土壤含水率的影响。此时,若控制降雨总量,则降雨次数一定程度上可反映雨强的大小。

表 6 为不同降雨总量下,降雨次数与极端降雨相较降雨过程的随机性对土壤含水率的影响。与 2.2 节所得结果相似,降雨次数对土壤含水率影响显著,且该影响随着降雨总量的变化呈现一定的差异;极端降雨对土壤含水率的影响则呈一定的随机性,即降雨总量为 160 mm 时,极端降雨对活跃层土壤含水率影响显著,降雨总量为 200 mm 时,其对次活跃层土壤含水率影响显著。

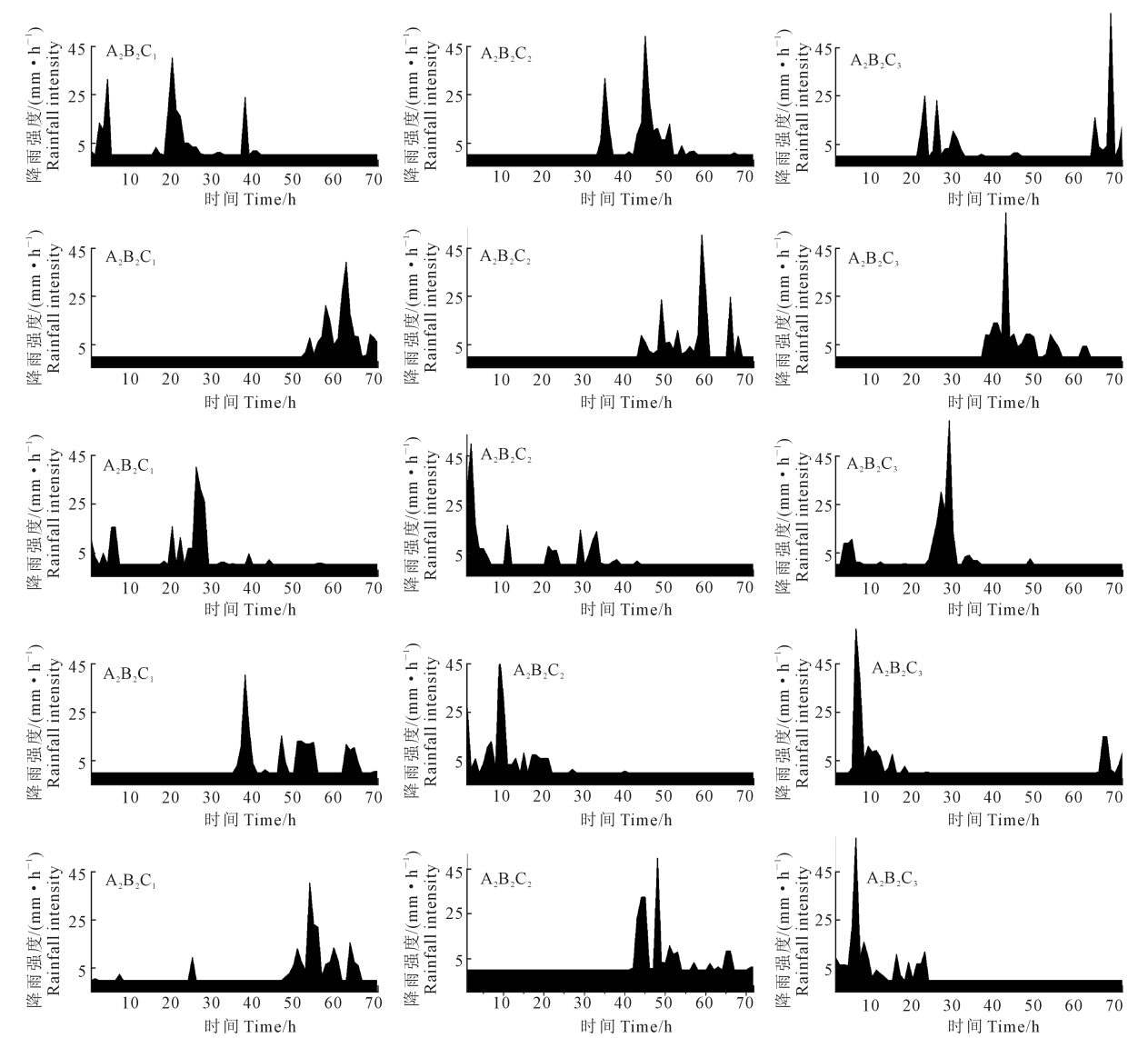


图 2 小时尺度下随机降雨实践模拟结果(以极端降雨的 3 个水平为例)

Fig.2 Simulation results of random rainfall practice on hourly scale (taking three levels of extreme rainfall as an example)

表 5 降雨总量、降雨次数以及极端降雨对各土层含水率的影响

变异来源 Source	活跃层 Active layer		次活跃层 Subactive layer		相对稳定层 Relative stable layer		稳定层 Stable layer	
	均方	F	均方	F	均方	F	均方	F
	Mean square		Mean square		Mean square		Mean square	
A	609.9	83.4 **	3902.5	545.25 **	18275.4	734.59 **	7788.1	558.7 **
B	716.37	97.96 **	109.27	15.27 **	5535.77	222.51 **	186.45	13.38 **
C	1.98	0.27	21.63	3.02 *	26.28	1.06	6.05	0.43
A×B	11.75	1.61	52.7	7.36 **	547	21.99 **	208.03	14.92 **
A×C	20.91	2.86 *	17.04	2.38	23.48	0.94	4.29	0.31
B×C	57.6	7.88 **	28.24	3.95 *	181.05	7.28 **	1.52	0.11
A×B×C	6.04	0.83	8.36	1.17	3.34	0.13	1.93	0.14
误差 Error	7.31		7.16		14.88		13.94	

注: A、B、C 分别代表降雨总量、降雨次数与极端降雨; “*”表示因子对试验结果影响显著($P<0.05$), “**”表示极显著($P<0.01$)。
Note: A, B and C represent total rainfall, rainfall frequency and extreme rainfall respectively; “*” indicates that factors have significant influence on test results ($P<0.05$); “**” indicates extremely significant ($P<0.01$).

整体来看,降雨次数对土壤含水率的影响较极端降雨更大。究其原因,土壤含水率在不同土层上的运移是连续的时间过程,单次的极端降雨事件对土壤含水率的空间运移影响小于持续多次的降雨事件。为进一步分析其原因,以降雨总量为 160 mm 为例,计算了不同降雨次数与不同极端降雨组合下,不同土层土壤含水率情况,结果见表 7。

表 6 降雨次数与极端降雨对不同降雨量下各土层土壤含水率的影响方差分析
Table 6 Variance analysis of influence of rainfall frequency and extreme rainfall on soil moisture content of different soil layers under different rainfall

降雨总量/mm Precipitation	项目 Item	活跃层 Active layer		次活跃层 Subactive layer		相对稳定层 Relative stable layer		稳定层 Stable layer	
		F	P	F	P	F	P	F	P
160	B	21.93	<0.01	0.76	0.47	19.75	<0.01	19.48	<0.01
	C	4.05	0.02	0.93	0.39	2.84	0.06	0.125	0.88
	B×C	5.97	<0.01	0.5	0.73	4.66	<0.01	0.14	0.97
200	B	39.97	<0.01	9.69	<0.01	98.89	<0.01	5.92	<0.01
	C	1.88	0.15	4.68	<0.01	0.88	0.41	0.93	0.39
	B×C	2.78	0.03	3.93	<0.01	2.86	0.02	0.47	0.76
250	B	39.53	<0.01	22.8	<0.01	116.71	<0.01	14.49	<0.01
	C	0.05	0.95	2.23	0.11	0.11	0.9	0.34	0.71
	B×C	0.76	0.55	1.94	0.1	1.18	0.32	0.13	0.97

表 7 降雨总量 160 mm 时降雨次数与极端降雨对各土层含水率的影响
Table 7 Effects of rainfall times and extreme rainfall on water content of soil layer unde 160 mm rainfall

降雨次数/次 Rainfall frequency	极端降雨/(mm·h ⁻¹) Extreme rainfall	土壤含水率 Soil water content/%			
		活跃层 Active layer	次活跃层 Subactive layer	相对稳定层 Relative stable layer	稳定层 Stable layer
10	40	35.82±3.35a	31.92±4.31a	19.2±4.53d	15.67±0.00a
	50	34.58±3.24b	31.47±4.03a	20.62±4.64c	15.67±0.00a
	60	34.47±3.14bc	31.76±3.44a	20.84±4.7bc	15.67±0.00a
15	40	33.72±2.53cd	32.19±1.72a	21.96±4.01ab	15.67±0.01a
	50	33.17±2.12d	31.87±1.76a	22.73±3.72a	15.67±0.00a
	60	33.55±2.35d	31.78±2.21a	22.25±3.84a	15.67±0.00a
20	40	33.73±2.26cd	31.92±1.9a	22.2±3.61a	15.67±0.00a
	50	33.77±2.38cd	31.77±1.85a	22.12±3.73a	15.67±0.00a
	60	33.53±2.84b	32.24±2.79a	22.02±4.04cd	15.67±0.00a

注:表中数据为平均值±标准差,同列数据不同小写字母表示处理间差异显著(邓肯检验, $P<0.05$)。
Note: Data are expressed as mean ± standard deviation. Different letters in the same column of data indicate significant difference between treatments. (Duncan's test, $P<0.05$)

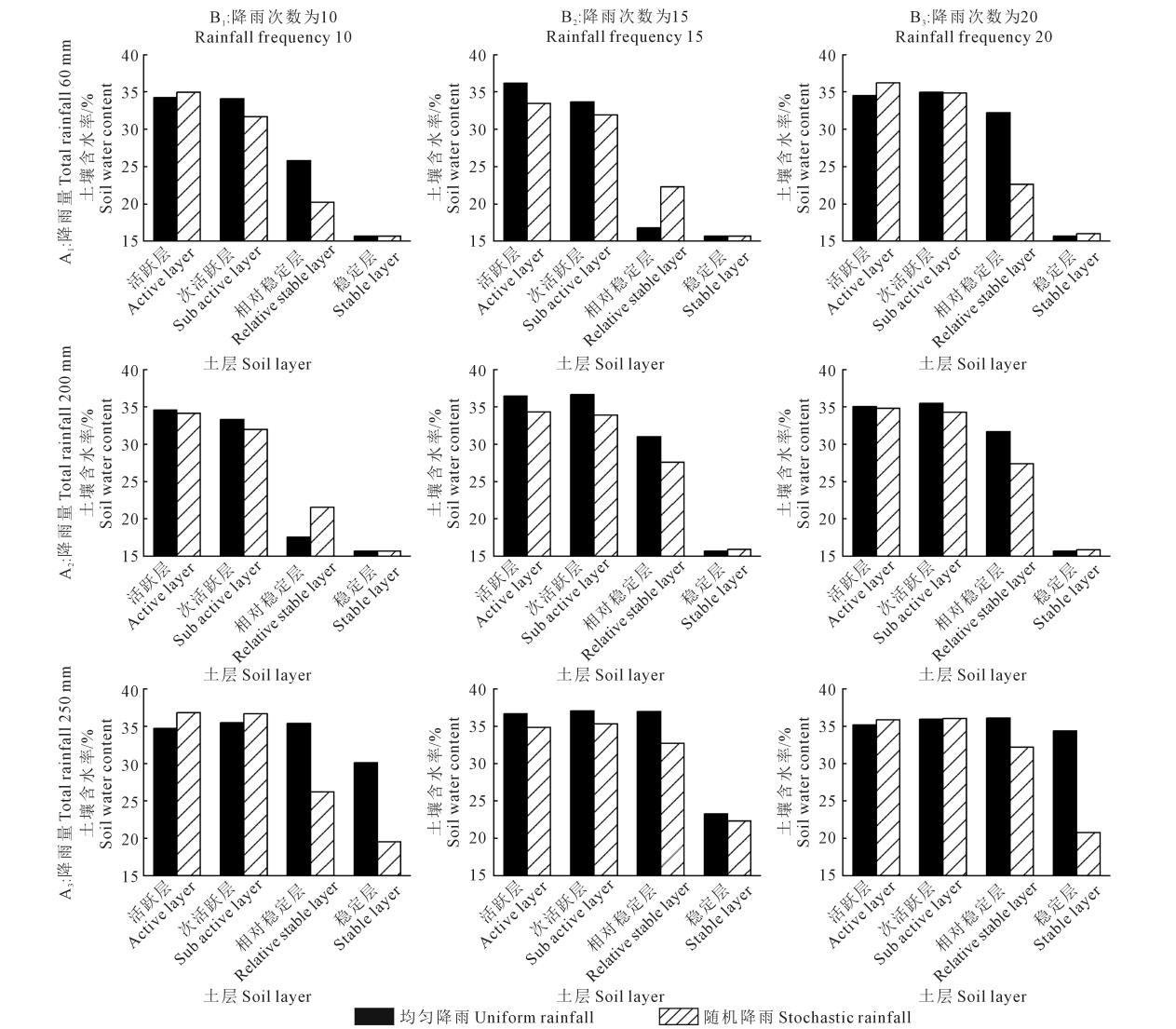
2.4 随机降雨与均匀降雨入渗对土壤含水率影响的对比分析

除去降雨总量、降雨次数与极端降雨对土壤含水率的影响外,仍需明晰降雨过程的随机性相较均匀降雨过程对不同土层土壤含水率影响程度的差异。由此,设降雨总量、降雨次数与随机降雨在相同水平下的均匀降雨方案,即不考虑降雨的随机时程分配,而将降雨总量按降雨次数均匀分布于研究时段内。

如图 3 所示,均匀降雨的降雨单元均匀分配于整个降雨过程,位于降雨过程后半段的降雨量由于响应时间较短无法及时入渗至土壤深层;而随机降雨的降雨单元可能聚集于降雨过程的前半部分,因此随机降雨在降雨总量为 160 mm 与 200 mm 时可

由表 7 可知,当降雨次数较低(10 次)时,其平均降雨强度较大,相较于降雨次数较高时(15、20 次),表层土壤含水率增高 2.74%~6.23%,而相对稳定层土壤含水率降低 5.66%~15.63%,这与鲍彪等^[20]的研究结果一致;对于活跃层土壤而言,降雨次数为 10 次、极端降雨量级为 40 mm·h⁻¹时土壤含水率最大,但相对稳定层土壤含水率最小。

通过比较两种降雨方式下各土层含水率可知(表 8),随机降雨与均匀降雨入渗对浅层土壤含水率影响的差异较小,但随着土层深度的增大,两种降



注:图中活跃层、次活跃层、相对稳定层及稳定层为按照土壤垂向水分变异系数划分的土层深度。
Note: The active layer, subactive layer, relatively stable layer and stable layer in the figure are the soil depth divided according to the soil vertical water variation coefficient.

图 3 不同降雨总量、降雨次数随机降雨与均匀降雨下不同土层土壤含水率
Fig.3 Soil water content of different soil layers under stochastic rainfall and uniform rainfall under different total rainfall amount and rainfall frequency

表 8 随机降雨与均匀降雨下土壤含水率的差异

土层 Soil layer	土壤含水量增量 Soil moisture increment/%								
	160 mm			200 mm			250 mm		
	10	15	20	10	15	20	10	15	20
活跃层 Active layer	2.03	-7.40	-1.15	4.96	-5.76	-0.62	6.15	-5.04	1.95
次活跃层 Subactive layer	-7.00	-5.10	-4.12	-0.26	-7.49	-3.39	3.30	-4.78	0.30
相对稳定层 Relative stable layer	-21.72	32.83	22.91	-29.74	-11.04	-13.51	-25.96	-11.53	-10.85
稳定层 Stable layer	0.01	0.00	0.00	2.16	1.47	1.05	-35.21	-4.05	-39.52

注:表中数据计算公式为 $(\theta_R-\theta_E)/\theta_E$, θ_R 指降雨总量与降雨次数一定时土壤含水率的均值, θ_E 指将降雨总量按降雨次数均匀分配至降雨事件时段内的土壤含水率。
Note: The calculation formula in the table is $(\theta_R-\theta_E)/\theta_E$, θ_R refers to the mean value of soil moisture content when the total amount of rainfall and the number of rainfalls is fixed, and θ_E refers to the soil moisture content evenly distributed to the rainfall event period according to the number of rainfall.

雨方式下土壤含水率的差异不断增大。在降雨总量为 160 mm,降雨次数为 15、20 次时,相较于均匀降雨,随机降雨下相对稳定层土壤含水率较大(增量为 32.83%、22.91%)。在降雨总量较大时,随机降雨条

件下稳定层土壤含水率均相对降低,降低幅度最高达 39.52%(降雨总量为 250 mm,降雨次数为 20)。

3 讨 论

降雨是影响土壤水分入渗变化最为直接的因素。以往众多研究表明^[22-24],土壤水分的入渗主要由降雨总量和降雨强度决定,且不同土层水分分布还与降雨时程分配特征有关。本研究采用定量的析因设计方差分析方法分析降雨综合特性对土壤水分的影响,与以往研究结论^[25]一致,相较降雨时程分配的随机性,降雨总量是影响降雨入渗后土壤水分分布状况的主要因素,降雨次数(即平均降雨强度)次之,极端降雨影响较小。

此外,有研究表明^[26-27],土壤含水率除受降雨影响外,土壤水力特性参数对其影响同样值得关

注。为进一步明晰土壤水力特性与降雨特性对土壤含水率的影响差异,且避免模型参数的不确定性对研究结果的影响,笔者扩展讨论了 HYDRUS 模型中 VG 模型的敏感性参数土壤饱和含水率(θ_s)、土壤孔径分布参数(n)与降雨总量对土壤含水率的影响程度。

以率定参数 n 、 θ_s 为基础,对其与降雨总量分别施加 $\pm 5\%$ 的扰动,分析不同土层土壤含水率的变化情况,结果见表 9。由表可知,参数 θ_s 和降雨总量对所有土层含水率影响均极显著($P < 0.01$),参数 n 对于活跃层与次活跃层土壤含水率影响显著,这与张海阔等^[28]的研究结论一致。同时,值得注意的是,活跃层土壤含水率受参数 θ_s 的影响最大,参数 n 的影响次之,降雨总量影响最小。综上,土壤水分的运移研究过程中,模型参数的不确定性不容忽视。

表 9 降雨总量与 VG 模型参数(n, θ_s)对不同深度土壤含水率的影响
Table 9 Effects of total rainfall and VG model parameters(n, θ_s) on soil moisture content at different depths

变异来源 Source	活跃层 Active layer		次活跃层 Subactive layer		相对稳定层 Relative stable layer		稳定层 Stable layer	
	F	P	F	P	F	P	F	P
θ_s	104.47	<0.01	10.99	<0.01	10.4	<0.01	2.31	0.11
n	13.63	<0.01	3.35	0.04	2.28	0.11	1.8	0.18
降雨总量/mm Total rainfall	3.42	0.04	7.87	<0.01	18.21	<0.01	1.54	0.22

4 结 论

本文以滨海盐碱土为研究对象,分析了降雨总量、降雨次数、极端降雨量以及其随机时程分配特征对土壤水分分布过程的影响,并讨论了模型参数不确定性与降雨特征相比对土壤水分分布的影响差异,取得了以下结论:

1) 整体来看,相较降雨过程的随机性而言,降雨对土壤含水率的影响因素:降雨总量(A)>降雨次数(B)>极端降雨量(C),且降雨总量与次数间二阶交互作用对土壤含水率影响显著($P < 0.05$)。

2) 降雨总量一定时,当降雨次数较低(10 次)时,其平均降雨强度较大,相较于降雨次数较高(15、20 次)时,表层土壤含水率增大 2.74%~6.23%,而相对稳定层土壤含水率降低 5.66%~15.63%。

3) 随机降雨与均匀降雨对浅层土壤含水率影响的差异较小,但随着土层加深,两种降雨方式下土壤含水率的差异不断增大,当降雨总量为 250 mm 时,均匀降雨条件下的稳定层土壤含水率相较于随机降雨最大增高 39.52%,且相比于均匀降雨过程,随机降雨在降雨总量较小(160 mm 与 200 mm)时可入渗至稳定层。

4) 在较浅的土层尤其表层土壤含水率受到 HYDRUS 模型参数 θ_s (土壤饱和含水率)与 n (孔径分布参数)的影响要远大于降雨总量,因此,在采用 HYDRUS 模型模拟土壤水分分布时,应重视土壤水力参数的不确定性影响。

参 考 文 献:

[1] KOVDA V A. Loss of productive land due to salinization[J]. Ambio, 1983, 12(2): 91-93.

[2] 刘小媛,高佩玲,张晴雯,等.微咸水矿化度对重度盐碱土壤入渗特征的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):102-107.
LIU X Y, GAO P L, ZHANG Q W, et al. Effect of mineralization degree of infiltration water on infiltration characteristics of severely saline-alkali soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 102-107.

[3] 高超.气候变化下基于事件特性的日随机降雨模型研究[D].杭州:浙江大学,2020.
GAO C. Study of stochastic daily rainfall models based on rainfall event characteristics under climate change[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

[4] 刘汗,雷廷武,赵军.土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响[J].中国水土保持科学,2009,7(2):1-6.
LIU H, LEI T W, ZHAO J. Effects of initial soil water content and rainfall intensity on loess infiltration capacity[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(2): 1-6.

[5] 葛波,杜妍,常猛,等.不同降雨等级下杉木林土壤含水率和侧向流变化特征[J].水土保持研究,2019,26(2):161-166.
GE B, DU Y, CHANG M, et al. Soil water content and lateral

rheology of *Cunninghamia lanceolata* forest under different rainfall levels[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 161-166.

[6] 白盛元,汪有科,马建鹏,等.黄土高原半干旱区降雨入渗试验研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):218-223,231.

BAI S Y, WANG Y K, MA J P, et al. Experimental study on rainfall infiltration in semiarid region of the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(2): 218-223, 231.

[7] RODRIGUEZ-ITURBE I. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics [J]. Water Resources Research, 2000, 36(1): 3-9.

[8] LAIO F, D'ODORICO P, RIDOLFI L. An analytical model to relate the vertical root distribution to climate and soil properties[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(18): L18401.

[9] RODRIGUEZ-ITURBE I, COX D R, ISHAM V. Some models for rainfall based on stochastic point processes[J]. Proceedings of the Royal Society of London-Series A-Mathematical and Physical Sciences, 1987, 410(1839): 269-288.

[10] FOWLER H J, KILSBY C G, O'CONNELL P E, et al. A weather-type conditioned multi-site stochastic rainfall model for the generation of scenarios of climatic variability and change[J]. Journal of Hydrology, 2005, 308(1/4): 50-66.

[11] MIMEAU L, TRAMBLAY Y, BROCCA L, et al. Modeling the response of soil moisture to climate variability in the Mediterranean region[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(2): 653-669.

[12] 李颖,陶军,钞锦龙,等.滨海盐碱地"台田-浅池"改良措施的研究进展[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):154-160,167.

LI Y, TAO J, CHAO J L, et al. Research progress of improving measures of "raised field-shallow pool" for coastal saline-alkaline land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(5): 154-160, 167.

[13] 殷水清,谢云,陈德亮,等.日以下尺度降雨随机模拟研究进展[J].地球科学进展,2009,24(9):981-989.

YIN S Q, XIE Y, CHEN D L, et al. Review of stochastic simulation of sub-daily scale precipitation[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(9): 981-989.

[14] BURTON A, FOWLER H J, BLENKINSOP S, et al. Downscaling transient climate change using a Neyman-Scott Rectangular Pulses stochastic rainfall model[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(1/2): 18-32.

[15] FAVRE A C, MUSY A, MORGENTHALER S. Unbiased parameter estimation of the Neyman-Scott model for rainfall simulation with related confidence interval[J]. Journal of Hydrology, 2004, 286(1/4): 168-178.

[16] RODRIGUEZ-ITURBE I, D'ODORICO P, PORPORATO A, et al. On the spatial and temporal links between vegetation, climate, and soil moisture [J]. Water Resources Research, 1999, 35(12): 3709-3722.

[17] FAVRE A C, MUSY A, MORGENTHALER S. Two-site modeling of rainfall based on the Neyman-Scott process[J]. Water Resources Research, 2002, 38(12): 43-143-7.

[18] 冯博,贾小旭,于冬雪,等.黄土高原北部草地土壤水分空间变异研究[J].土壤通报,2019,50(5):1123-1130.

FENG B, JIA X X, YU D X, et al. Spatial variability of soil moisture in northern grassland of the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(5): 1123-1130.

[19] 王晓雅,蒋卫国,邓越,等.基于多重现期的京津冀小时极端降雨特征分析及致灾因子危险性评估[J].地理研究,2020,39(11): 2581-2592.

WANG X Y, JIANG W G, DENG Y, et al. Characteristic analysis and fatalness of disaster-inducing factors assessment of hourly extreme rainfall in different return periods of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Geographical Research, 2020, 39(11): 2581-2592.

[20] 鲍彪,毕华兴,云雷,等.晋西黄土区刺槐林地土壤水分对降雨的响应[J].北京林业大学学报,2012,34(2):84-89.

BAO B, BI H X, YUN L, et al. Response of soil moisture to precipitation in *Robinia pseudosacacia* forestland in loess region of western Shanxi province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(2): 84-89.

[21] 刘小璐,鲁克新,李鹏,等.不同降雨条件下坡面土壤水分入渗过程研究与模拟[J].干旱区资源与环境,2018,32(11):114-118.

LIU X L, LU K X, LI P, et al. Research and simulation of soil water infiltration on slope under different rainfall conditions[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(11): 114-118.

[22] 李斌兵,郑粉莉.黄土坡面不同土地利用下的降雨入渗模拟与数值计算[J].干旱地区农业研究,2008,26(5):118-123.

LI B B, ZHENG F L. Rainfall infiltration simulation and numerical computation at different landuse on the loessial hillslope[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(5): 118-123.

[23] 李萍,李同录,王阿丹,等.黄土中水分迁移规律现场试验研究[J].岩土力学,2013,34(5):1331-1339.

LI P, LI T L, WANG A D, et al. In-situ test research on regularities of water migration in loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1331-1339.

[24] 张超,姜景山,王如宾,等.降雨非饱和入渗对土壤热量运移变化的影响[J].农业工程学报,2020,36(18):118-126.

ZHANG C, JIANG J S, WANG R B, et al. Influences of rainfall unsaturated infiltration on the change of heat transfer in soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(18): 118-126.

[25] 赵娇娜,徐学选,李星,等.长武塬区降雨入渗特征[J].中国水土保持科学,2012,10(4):37-44.

ZHAO J N, XU X X, LI X, et al. Characteristic of rainfall infiltration on Changwu tableland[J]. Science of soil and water conservation, 2012, 10(4): 37-44.

[26] 蔡耀辉,吴普特,张林,等.设计流量和土壤质地对微孔陶瓷灌水器入渗特性的影响[J].农业工程学报,2017,33(7):100-106.

CAI Y H, WU P T, ZHANG L, et al. Effects of designed flow rate and soil texture on infiltration characteristics of porous ceramic irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(7): 100-106.

[27] 刘昭,徐燕星,郑海金,等.农林复合种植模式对红壤坡地表土水力特性及储水的影响[J].农业工程学报,2019,35(12):98-105.

LIU Z, XU Y X, ZHENG H J, et al. Effects of agroforestry planting systems on top-layer soil hydraulic characteristics and soil water storage on red soil slopes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(12): 98-105.

[28] 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 H K, JIANG C L, LI L, 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.