

# 膜孔灌自由入渗条件下 VG 模型参数的敏感性分析

樊倩雯<sup>1</sup>, 费良军<sup>1\*</sup>, 刘念<sup>2</sup>

(1.西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2.榆林市榆阳区水旱灾害防治中心, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 【目的】探究膜孔灌自由入渗条件下 VG 模型参数敏感性。【方法】基于 HYDRUS-2D 软件, 采用单因子扰动分析方法, 研究 van Genuchten 方程中  $\alpha$ 、 $n$ 、 $\theta_r$  对膜孔灌单点源自由入渗特性的影响。【结果】①单位膜孔面积累积入渗量与  $\alpha$  负相关, 与  $n$  正相关,  $\theta_r$  对单位膜孔面积累积入渗量无影响。水平湿润锋运移距离与  $\alpha$  负相关,  $\theta_r$  对其无影响。垂直湿润锋运移距离与  $\theta_r$  负相关, 与  $n$  正相关。入渗结束时高含水率湿润体面积与  $\theta_r$ 、 $n$  正相关,  $n$  的扰动对高含水率湿润体面积影响最大。②单位膜孔面积累积入渗量的相对灵敏度随  $\alpha$  增大而逐渐减小,  $\alpha$  的正扰动对单位膜孔面积累积入渗量的影响程度弱于负扰动。 $\alpha$  负扰动时, 水平湿润锋运移距离的相对灵敏度随扰动幅度的增大而逐渐增大;  $\alpha$  正扰动时, 水平湿润锋运移距离的相对灵敏度随扰动幅度的增大而逐渐减小。③ $n$  负扰动时, 单位膜孔面积累积入渗量与垂直湿润锋运移距离的相对灵敏度均随扰动幅度的增大呈先增加后减小的趋势;  $n$  正扰动时, 单位膜孔面积累积入渗量的相对灵敏度随扰动幅度的增大呈先减小后增加再减小的趋势。【结论】 $n$  发生扰动对膜孔灌自由入渗特性影响最明显,  $\theta_r$  发生扰动对入渗特性影响最小。

**关键词:** 模型; 膜孔灌; 单点源; 入渗特性; 参数

中图分类号: S275.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023423

樊倩雯, 费良军, 刘念. 膜孔灌自由入渗条件下 VG 模型参数的敏感性分析[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(5): 55-62.

FAN Qianwen, FEI Liangjun, LIU Nian. Sensitivity analysis of the impact of soil hydraulic parameters on water infiltration from a single point source in membrane-hole irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(5): 55-62.

## 0 引言

【研究意义】土壤水分特征曲线是描述土壤体积含水率与土壤水吸力之间关系的曲线, 其形状反映了土壤水力特性以及孔隙结构, 对研究土壤中的水分运动以及溶质迁移具有重要意义<sup>[1]</sup>。【研究进展】国内外学者为描述土壤水分特征曲线建立了很多经验公式, 较为常见的有 Gardner 模型<sup>[2]</sup>、Brooks-Corey 模型<sup>[3]</sup>以及 van Genuchten (简称 VG) 模型<sup>[4]</sup>, 其中 van Genuchten 模型应用最为广泛<sup>[5-8]</sup>。VG 模型包括  $m$ 、 $n$ 、 $\theta_r$ 、 $\theta_s$ 、 $K_s$ 、 $\alpha$  共 6 个参数, 且为非线性函数, 故参数求解较为困难, 许多学者针对 VG 模型参数的确定开展了大量研究<sup>[9-11]</sup>。杜国明等<sup>[12]</sup>利用微粒群优化借助 Visual Basic.NET 语言编程求解 VG 模型参数; 查元源等<sup>[13]</sup>根据瞬时剖面法的思想, 建立了一种可以通过土壤剖面含水率来推求均质土水力参数的方法; 也有学者采用了积分法<sup>[14]</sup>、鸟群算法<sup>[15]</sup>、改进的萤火

虫算法<sup>[16]</sup>、混合遗传算法<sup>[17]</sup>、阻尼最小二乘法<sup>[18]</sup>、随机粒子群算法<sup>[19]</sup>来求解 VG 模型参数。

模型参数的精确度直接影响模拟结果的准确性, 对 van Genuchten 模型中参数 ( $m$ 、 $n$ 、 $\theta_r$ 、 $\theta_s$ 、 $K_s$ 、 $\alpha$ ) 进行敏感性分析以确定这些参数对土壤水分入渗规律的影响具有重要意义。范严伟等<sup>[20]</sup>分析了不同土质条件下 VG 模型参数发生扰动对一维垂直入渗规律的影响, 表明土质由粗变细时,  $\alpha$ 、 $n$  对入渗规律的影响程度逐渐增加,  $K_s$  对入渗规律的影响程度逐渐降低。王志涛等<sup>[21]</sup>对 VG 模型的 5 个参数进行扰动以研究参数变化对粉壤土水分入渗特性的影响, 表明参数  $n$ 、 $\theta_s$ 、 $K_s$  对入渗特性影响较大,  $\theta_r$  对其影响最小。梁冰等<sup>[22]</sup>分析了 VG 模型中的参数  $\alpha$ 、 $n$  发生扰动对土壤入渗特性与释水过程的影响, 表明参数  $\alpha$ 、 $n$  较小时, 均不利于释水过程的进行。【切入点】以上研究均考虑了 VG 模型参数发生扰动对一维垂直入渗特性的影响, 而针对膜孔灌三维入渗条件下 VG 模型参数变化对入渗规律的影响研究较少。【拟解决的关键问题】为此, 本文基于 HYDRUS-2D 软件, 采用单因素扰动法研究 VG 模型参数对膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积入渗量、水平湿润锋运移距离、垂直湿润锋运移距离、入渗结束时高含水率湿润体面积的影响, 以保证调参过程中得到精确解, 减小模拟误差。

收稿日期: 2023-09-09 修回日期: 2024-03-11

基金项目: 陕西省重大水利科技项目 (2023SLKJ-2); 国家自然科学基金项目 (52079105)

作者简介: 樊倩雯 (2000-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为节水灌溉。E-mail: fqw32857@163.com

通信作者: 费良军 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为节水灌溉与农业水资源利用。E-mail: feiliangjun2008@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

# 1 膜孔灌单点源自由入渗模型

## 1.1 基本方程

HYDRUS-2D 对膜孔灌自由入渗水分运动过程的模拟基于柱坐标系下的 Richards 方程<sup>[23]</sup>:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rK(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(h)}{\partial z}, \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为土壤体积含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $t$  为入渗时间 (min);  $r$  为径向坐标 (cm);  $z$  为垂向坐标 (cm);  $h$  为压力水头 (cm);  $K$  为导水率 (cm/min)。

Richards 方程中水分特征曲线的计算采用 VG 模型<sup>[24]</sup>:

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

式中:  $\theta_r$  为滞留含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_s$  为饱和含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\alpha$  为与进气吸力相关的参数 ( $\text{cm}^{-1}$ );  $m$ 、 $n$  为形状系数,  $n > 1$ ,  $m = 1 - 1/n$ 。

## 1.2 定解条件

土箱长×宽×高为 30 cm×30 cm×50 cm, 膜孔直径为 6 cm, 入渗水头为 5 cm, 建立柱坐标系下的膜孔灌单点源自由入渗模型 (图 1):

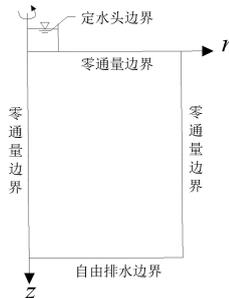


图 1 膜孔灌单点源入渗模型  
Fig.1 Single point source infiltration model of membrane hole irrigation

## 1) 边界条件

$$0 \leq r \leq L, \quad 0 \leq z \leq H, \quad t \geq 0, \quad (3)$$

$$h = h_0; \quad 0 \leq r \leq \frac{D}{2}, \quad z = 0, \quad t \geq 0, \quad (4)$$

$$K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) = 0; \quad \frac{D}{2} \leq r \leq L, \quad z = 0, \quad t \geq 0, \quad (5)$$

$$K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) = 0; \quad 0 \leq r \leq L, \quad z = H, \quad t \geq 0, \quad (6)$$

$$K(h) \frac{\partial h}{\partial r} = 0; \quad r = 0, \quad 0 \leq z \leq H, \quad t \geq 0, \quad (7)$$

$$K(h) \frac{\partial h}{\partial r} = 0; \quad r = L, \quad 0 \leq z \leq H, \quad t \geq 0, \quad (8)$$

## 2) 初始条件

$$\theta = \theta_0, \quad 0 \leq r \leq L, \quad 0 \leq z \leq H, \quad t = 0, \quad (9)$$

式中:  $L$  为土箱长度,  $L = 30$  cm;  $H$  为土箱高度,  $H = 50$  cm;  $\theta_0$  为土壤初始含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $D$  为膜孔直径,  $D = 6$  cm。

## 1.3 模型参数

VG 模型中的参数  $K_s$  可直接通过定水头法<sup>[25]</sup>测得,  $\theta_s$  可通过烘干法<sup>[26]</sup>测得, 而其余参数值均难以获取, 且参数  $m = 1 - 1/n$ , 故本文只研究参数  $\theta_r$ 、 $\alpha$ 、 $n$  发生扰动对膜孔灌单点源自由入渗特性的影响。采用 HYDRUS-2D 中的典型壤质砂土, VG 模型的 3 个参数 ( $\theta_r$ 、 $\alpha$ 、 $n$ ) 扰动幅度均设为 -50%~+50%, VG 模型参数取值见表 1。

## 1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2019 进行数据处理、图表绘制, 采用 Auto CAD 2014 读取入渗结束时土壤含水率在 24% 以上的湿润体面积。

表 1 VG 模型参数取值

Tab.1 Parameter values of VG model

指标	扰动幅度/%										
	0	10	20	30	40	50	-10	-20	-30	-40	-50
$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	0.057	0.062 7	0.068 4	0.074 1	0.079 8	0.085 5	0.051 3	0.045 6	0.039 9	0.034 2	0.028 5
$\alpha/\text{cm}^{-1}$	0.124	0.136 4	0.148 8	0.161 2	0.173 6	0.186	0.111 6	0.099 2	0.086 8	0.074 4	0.062
$n$	2.28	2.508	2.736	2.964	3.192	3.42	2.052	1.824	1.596	1.368	1.14
$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	0.41										
$K_s$	350.2										

采用相对灵敏度表征 VG 模型 3 个参数变化对膜孔灌单点源自由入渗过程的影响程度:

$$RS_i = \left| \frac{\Delta O_i}{O_i} \right| / \left| \frac{\Delta P_i}{P_i} \right|, \quad (10)$$

式中:  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。  $RS_i$  为相对灵敏度;  $\Delta O_i$  为参数  $P_i$  变化而引起目标函数  $O_i$  的变化量;  $\Delta P_i$  为参数  $P_i$  的变化量。

采用 Kostiakov 公式对膜孔灌单点源自由入渗单位膜孔面积累积入渗量与入渗时间的关系进行拟合:

$$I = Kt^{\alpha'}, \quad (11)$$

式中:  $I$  为单位膜孔面积累积入渗量 (cm);  $t$  为入渗时间 (min);  $K$  为入渗系数 (cm/min);  $\alpha'$  为入渗指数。

## 2 结果与分析

### 2.1 $\theta_r$ 对膜孔灌自由入渗过程的影响

将入渗结束时土壤含水率 > 24% 的土体定义为高含水率湿润体<sup>[27]</sup>。图 2 为不同  $\theta_r$  值下膜孔灌单点源自由入渗单位膜孔面积累积入渗量  $I$ 、水平湿润锋运移距离  $F_x$ 、垂直湿润锋运移距离  $F_z$  随入渗时间的变

化曲线以及入渗结束时高含水率湿润体面积与  $\theta_r$  的关系曲线。因  $\theta_r$  对入渗过程影响不大，如果将 11 个扰动变幅全部绘制在图 2 中则会有部分曲线揉合在一起，故只取典型的几条曲线说明总体的变化趋势。由图 2 可知， $\theta_r$  发生变化对单位膜孔面积累积入渗量、

水平湿润锋运移距离均基本无影响，对垂直湿润锋运移距离影响较小。同一入渗时间， $\theta_r$  越大，则垂直湿润锋运移距离越近。随着  $\theta_r$  增加，入渗结束时高含水率湿润体面积逐渐增大。

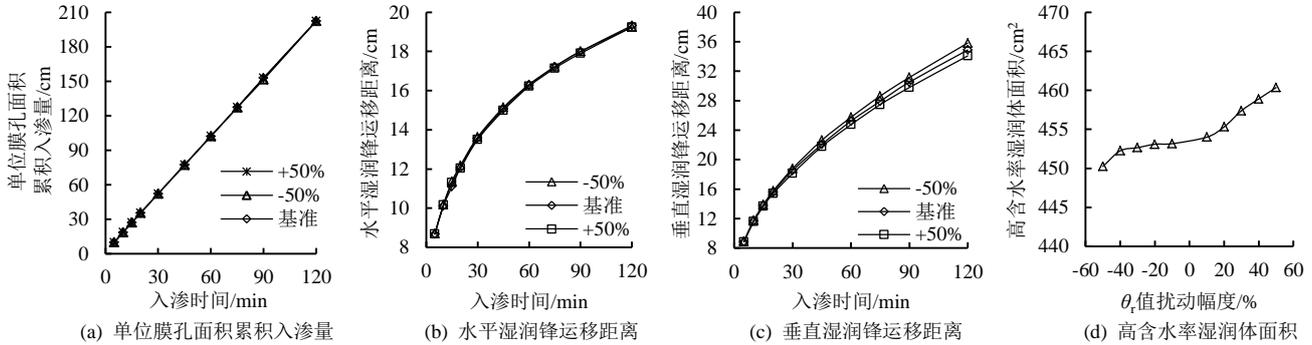


图 2  $\theta_r$  对膜孔灌单点源入渗特性的影响

Fig.2 Influence of  $\theta_r$  on infiltration characteristics of a single point source for membrane hole irrigation

图 3 为不同  $\theta_r$  下入渗时间为 30、60、120 min 时的垂直湿润锋运移距离相对灵敏度变化曲线。由图 3 可知， $\theta_r$  值发生负扰动时，扰动幅度为-20%，入渗时间为 30、60、120 min 对应的垂直湿润锋运移距离相对灵敏度最大，分别为 0.027、0.046、0.054；扰动幅度为-10%，入渗时间为 30、60、120 min 对应的垂直湿润锋运移距离相对灵敏度最小，分别为 0.005、0.032、0.023； $\theta_r$  发生正扰动时，扰动幅度为+10%，入渗时间为 30、60、120 min 对应的垂直湿润锋运移距离相对灵敏度最大，分别为 0.059、0.083、0.052。入渗第 30 分钟， $\theta_r$  正扰动对垂直湿润锋运移距离的影响大于负扰动。

2.2  $\alpha$  对膜孔灌自由入渗过程的影响

图 4 为不同  $\alpha$  值下膜孔灌单点源自由入渗单位膜孔面积累积入渗量  $I$ 、水平湿润锋运移距离  $F_x$ 、垂直湿润锋运移距离  $F_z$  随入渗时间的变化曲线以及入渗结束时高含水率湿润体面积与  $\alpha$  的关系曲线。本文只取典型的几条曲线说明总体的变化趋势。由图 4 可知， $\alpha$  发生扰动对单位膜孔面积累积入渗量、水平湿润锋运移距离均有较大影响，对垂直湿润锋运移距离影响较小。随着  $\alpha$  增大，相同入渗时间单位膜孔面积累积入渗量逐渐减小，水平湿润锋运移距离逐渐减小。入渗第 90 分钟之前，不管  $\alpha$  发生正扰动还是负扰动，垂直湿润锋运移距离与基准值相比均较大， $F_z$  变幅为 1.59%~9.83%；入渗第 90 分钟之后， $\alpha$  发生正扰动时垂直湿润锋运移距离与基准值相比较大，变幅为 4.16%~5.59%， $\alpha$  发生负扰动时垂直湿润锋运移距离与基准值相比较小，变幅为-0.29%~-1.32%。随着  $\alpha$  增大，入渗结束时高含水率湿润体面积呈先减小后增加趋势。 $\alpha$  发生正扰动时，随着  $\alpha$  增大，高含水率湿润体面积缓慢增大，变幅为 0~0.67%； $\alpha$  发生负扰动时，随着  $\alpha$  扰动幅度的增加，高含水率湿润体面积迅速增大，变幅为 0~4.57%。

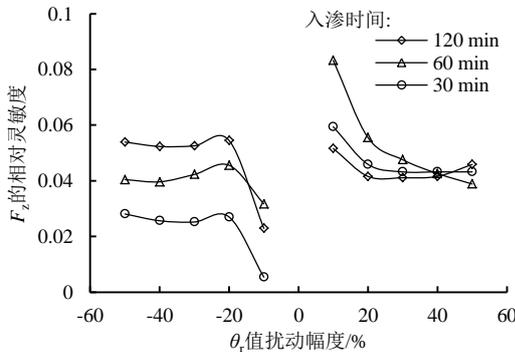


图 3 不同  $\theta_r$  值下  $F_z$  的相对灵敏度变化曲线

Fig.3 Relative sensitivity change curves of  $F_z$  under different  $\theta_r$  values

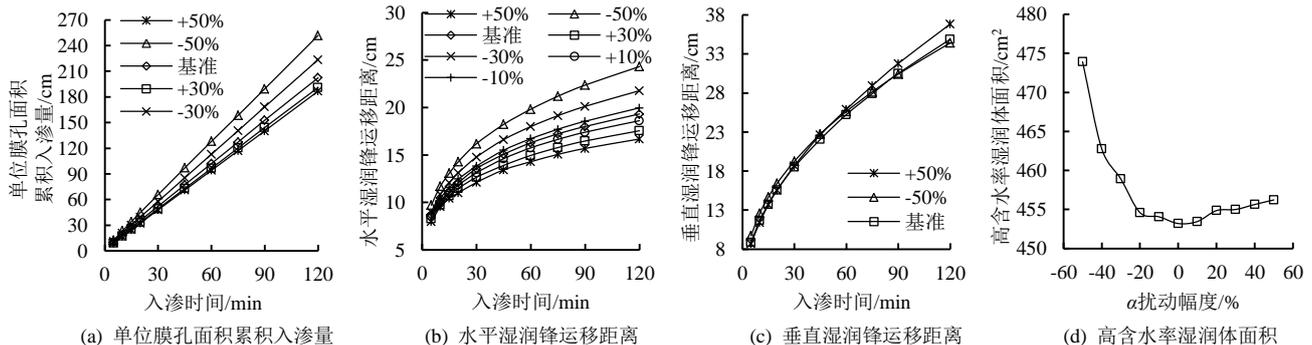


图 4  $\alpha$  对膜孔灌单点源入渗特性的影响

Fig.4 Influence of  $\alpha$  on the infiltration characteristics of a single point source of membrane hole irrigation

采用式 (11) 对不同  $\alpha$  值下膜孔灌单点源自由入渗单位膜孔面积累积入渗量与入渗时间的关系曲线进行拟合, 拟合结果见表 2。

表 2 不同  $\alpha$  值下 Kostiakov 模型拟合结果

Tab.2 Kostiakov model fitting results under different  $\alpha$  values

$\alpha$ 扰动幅度/%	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	入渗系数 $K/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	入渗指数 $\alpha'$	$R^2$
-50	0.062	2.700 6	0.943	0.999 8
-30	0.086 8	2.342 4	0.947 7	0.999 8
0	0.124	2.079 2	0.952 3	0.999 8
+30	0.161 2	1.94	0.955 1	0.999 8
+50	0.186	1.881 5	0.956 3	0.999 8

表 3 单位膜孔面积累积入渗量计算值与软件模拟值对比

Tab.3 Comparison of calculated values with software simulation values of cumulative infiltration amount per unit membrane hole area

指标	入渗时间/min									
	5	10	15	20	30	45	60	75	90	120
模拟值/cm	9.153	17.118	25.040	32.821	48.525	71.867	95.210	118.553	141.471	188.157
计算值/cm	8.770	16.953	24.930	32.775	48.195	70.870	93.171	115.197	137.007	180.119
相对误差/%	4.191	0.961	0.441	0.142	0.680	1.388	2.142	2.831	3.156	4.272

$\alpha$  扰动幅度为+40%时, 膜孔灌单点源自由入渗单位膜孔面积累积入渗量的软件模拟值与模型计算值相对误差均在  $\pm 5\%$  以内, 所建模型拟合精度较高。

图 5 为不同  $\alpha$  值下入渗时间为 30、60、120 min 时单位膜孔面积累积入渗量、水平湿润锋运移距离的相对灵敏度变化曲线。由图 5 可知, 随着  $\alpha$  增大, 单

可以看出, 随着  $\alpha$  增大, 入渗系数  $K$  逐渐减小, 入渗指数  $\alpha'$  基本保持在 0.951 左右。经分析, 入渗系数  $K$  与  $\alpha$  符合二次函数关系:

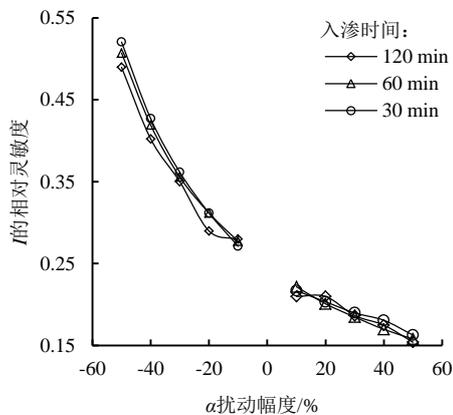
$$K=56.864\alpha^2-20.391\alpha+3.724, R^2=0.993, (12)$$

将式 (12) 带入式 (11) 中得单位膜孔面积累积入渗量与入渗时间、 $\alpha$  的关系模型:

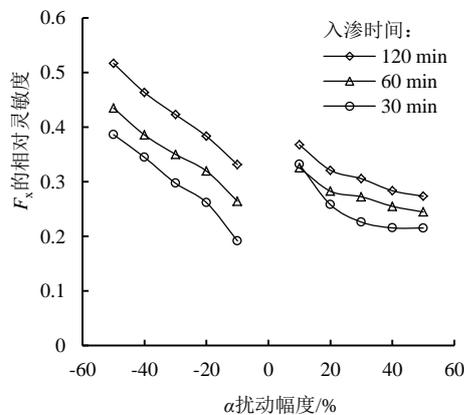
$$I=(56.864\alpha^2-20.391\alpha+3.724)t^{0.951}, (13)$$

将  $\alpha$  扰动+40%即  $\alpha$  为  $0.173 6 \text{ cm}^{-1}$  的累积入渗量数据带入式 (13), 并与软件模拟值进行对比, 来验证所建模型的可靠性, 结果见表 3。

位膜孔面积累积入渗量的相对灵敏度逐渐减小,  $\alpha$  正扰动对单位膜孔面积累积入渗量的影响程度弱于负扰动。 $\alpha$  发生负扰动时, 随扰动幅度的增大, 水平湿润锋运移距离的相对灵敏度逐渐增大;  $\alpha$  发生正扰动时, 随扰动幅度的增大, 水平湿润锋运移距离的相对灵敏度逐渐减小。



(a) 单位膜孔面积累积入渗量



(b) 水平湿润锋运移距离

图 5 不同  $\alpha$  值下  $I$ 、 $F_x$  的相对灵敏度变化曲线

Fig.5 Relative sensitivity change curves of  $I$  and  $F_x$  under different  $\alpha$

### 2.3 $n$ 对膜孔灌自由入渗过程的影响

图 6 为不同  $n$  值下膜孔灌单点源自由入渗单位膜孔面积累积入渗量  $I$ 、水平湿润锋运移距离  $F_x$ 、垂直湿润锋运移距离  $F_z$  随入渗时间的变化曲线以及入渗结束时高含水率湿润体面积与  $n$  的关系曲线。由图 6 可知,  $n$  发生扰动对单位膜孔面积累积入渗量、垂直湿润锋运移距离均有较大影响, 对水平湿润锋运移距离影响较小。同一入渗时间,  $n$  越大单位膜孔面积累积入渗量越大, 垂直湿润锋运移距离越大。入渗第

30 min 之后,  $n$  不管发生正扰动还是负扰动, 水平湿润锋运移距离与基准值相比均较小; 入渗第 30 分钟之前,  $n$  发生正扰动时水平湿润锋运移距离与基准值相比较较大,  $n$  发生负扰动时水平湿润锋运移距离与基准值相比较小。随着  $n$  增加, 入渗结束时高含水率湿润体面积从  $373.876 \text{ cm}^2$  逐渐增大到  $532.003 \text{ cm}^2$ 。

采用 Kostiakov 公式对不同  $n$  值下膜孔灌单点源自由入渗单位膜孔面积累积入渗量与入渗时间的关系曲线进行拟合, 拟合结果见表 4。

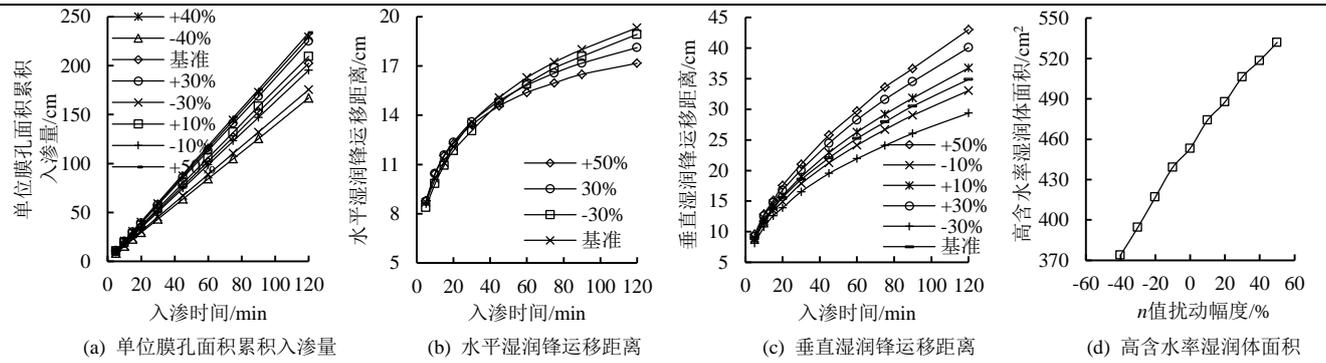


图 6  $n$  值对膜孔灌单点源入渗特性的影响

Fig.6 Influence of the change of  $n$  value on the infiltration characteristics of single point source of membrane hole irrigation

表 4 不同  $n$  值下 Kostiakov 模型拟合结果

Tab.4 Results of Kostiakov model fitting under different  $n$  values

$n$ 值扰动幅度/%	$n$ 值	入渗系数 $K/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	入渗指数 $\alpha'$	$R^2$
+50	3.42	2.35	0.957 1	0.999 9
+40	3.192	2.308 2	0.957	0.999 9
+30	2.964	2.266 6	0.956 1	0.999 8
+10	2.508	2.148 7	0.952 9	0.999 8
0	2.28	2.079 2	0.952 3	0.999 8
-10	2.052	2.040 5	0.948 7	0.999 8
-30	1.596	1.857 8	0.945 3	0.999 7
-40	1.368	1.812 7	0.939 1	0.999 6

表 5 不同  $n$  值下  $I$  的计算值与软件模拟值对比表

Tab.5 Comparison of calculated values and software simulation values of  $I$  under different  $n$  values

指标	入渗时间/min									
	5	10	15	20	30	45	60	75	90	120
模拟值/cm	10.54	19.81	28.86	37.77	55.74	82.48	109.22	135.95	162.69	216.45
计算值/cm	10.20	19.72	29.00	38.12	56.06	82.43	108.37	133.99	159.35	209.50
相对误差/%	3.22	0.44	-0.47	-0.92	-0.57	0.06	0.78	1.45	2.05	3.21

参数  $n$  扰动幅度为+20%时，膜孔灌单点源自由入渗单位膜孔面积累积入渗量的模拟值与计算值相对误差均在 $\pm 4\%$ 以内，所建模型拟合精度较高。

图 7 为不同  $n$  值下入渗时间为 30、60、120 min 时单位膜孔面积累积入渗量、水平湿润锋运移距离、垂直湿润锋运移距离的相对灵敏度变化曲线。由图 7 可知，入渗时间为 30、60、120 min， $n$  发生负扰动

时，随扰动幅度的增大，单位膜孔面积累积入渗量与垂直湿润锋运移距离的相对灵敏度均呈先增后减的趋势， $n$  为-40%时，入渗时间为 30、60、120 min 时的单位膜孔面积累积入渗量的相对灵敏度均达到最大，分别为 0.427、0.433、0.437。 $n$  发生正扰动时，随扰动幅度的增大，单位膜孔面积累积入渗量的相对灵敏度呈先减小后增加再减小的趋势。

$$K = -0.041 3n^2 + 0.466 9n + 1.239 1, R^2 = 0.996 3, \quad (14)$$

由表 4 可以看出，随着  $n$  减小，入渗系数  $K$  逐渐减小，入渗指数  $\alpha'$  基本保持在 0.951 左右。经分析，入渗系数  $K$  与  $n$  符合二次函数关系：

$$I = (-0.041 3n^2 + 0.466 9n + 1.239 1) t^{0.951}, \quad (15)$$

将式 (14) 带入式 (11) 中得单位膜孔面积累积入渗量与入渗时间、 $n$  的关系模型：

表 5 不同  $n$  值下  $I$  的计算值与软件模拟值对比表

Tab.5 Comparison of calculated values and software simulation values of  $I$  under different  $n$  values

指标	入渗时间/min									
	5	10	15	20	30	45	60	75	90	120
模拟值/cm	10.54	19.81	28.86	37.77	55.74	82.48	109.22	135.95	162.69	216.45
计算值/cm	10.20	19.72	29.00	38.12	56.06	82.43	108.37	133.99	159.35	209.50
相对误差/%	3.22	0.44	-0.47	-0.92	-0.57	0.06	0.78	1.45	2.05	3.21

时，随扰动幅度的增大，单位膜孔面积累积入渗量与垂直湿润锋运移距离的相对灵敏度均呈先增后减的趋势， $n$  为-40%时，入渗时间为 30、60、120 min 时的单位膜孔面积累积入渗量的相对灵敏度均达到最大，分别为 0.427、0.433、0.437。 $n$  发生正扰动时，随扰动幅度的增大，单位膜孔面积累积入渗量的相对灵敏度呈先减小后增加再减小的趋势。

图 7 为不同  $n$  值下入渗时间为 30、60、120 min 时单位膜孔面积累积入渗量、水平湿润锋运移距离、垂直湿润锋运移距离的相对灵敏度变化曲线。由图 7 可知，入渗时间为 30、60、120 min， $n$  发生负扰动

时，随扰动幅度的增大，单位膜孔面积累积入渗量与垂直湿润锋运移距离的相对灵敏度均呈先增后减的趋势， $n$  为-40%时，入渗时间为 30、60、120 min 时的单位膜孔面积累积入渗量的相对灵敏度均达到最大，分别为 0.427、0.433、0.437。 $n$  发生正扰动时，随扰动幅度的增大，单位膜孔面积累积入渗量的相对灵敏度呈先减小后增加再减小的趋势。

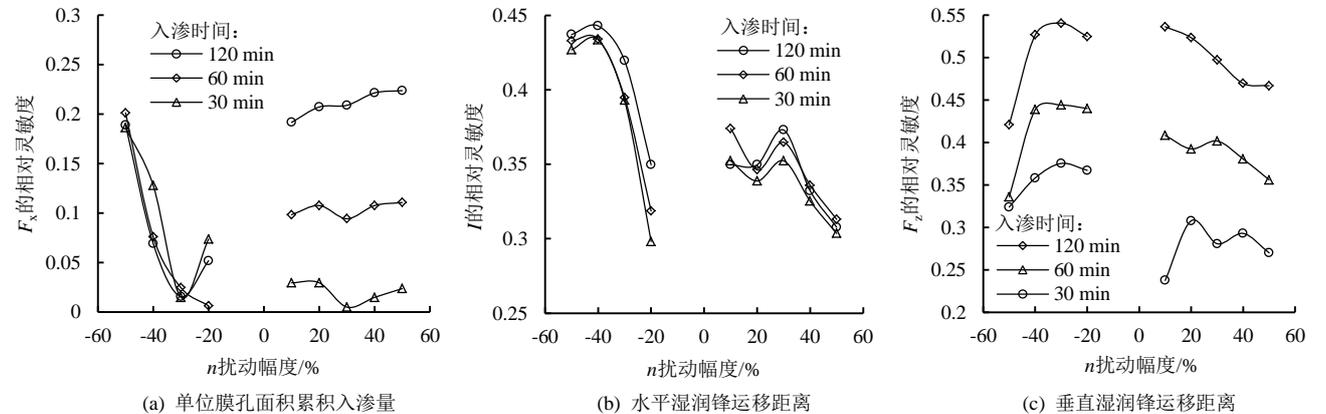


图 7 不同  $n$  值下相对灵敏度变化曲线

Fig.7 Relative sensitivity curves under the condition of different  $n$  values

图 8 为  $\alpha$ 、 $n$ 、 $\theta_r$  值扰动幅度与入渗结束时高含水率湿润体面积相对灵敏度的关系曲线。由图 8 可知，

与  $\alpha$ 、 $\theta_r$  相比， $n$  发生扰动时，入渗结束时高含水率湿润体面积的相对灵敏度最大。与  $n$ 、 $\theta_r$  相比， $\alpha$  发

生正扰动时,高含水率湿润体面积的相对灵敏度最小。与  $\alpha$ 、 $n$  相比,  $\theta_r$  发生负扰动时,高含水率湿润体面积的相对灵敏度最小。

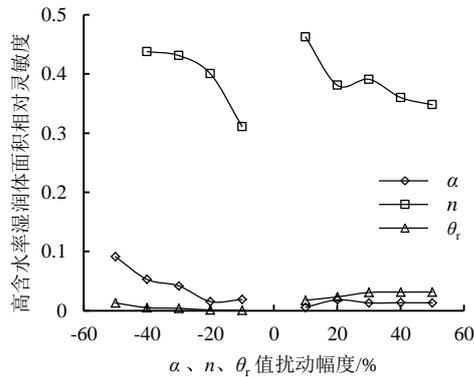


图 8  $\alpha$ 、 $n$ 、 $\theta_r$  扰动幅度与高含水率湿润体面积的相对灵敏度关系曲线

Fig.8 Relationship curves of the disturbance amplitude of  $\alpha$ ,  $n$  and  $\theta_r$  values with the relative sensitivity of the wetted body area with high moisture content

### 3 讨论

本研究表明,  $\theta_r$  发生扰动对膜孔灌自由入渗规律影响较小。  $\theta_r$  发生扰动对累积入渗量基本无影响,  $n$  发生扰动对累积入渗量的影响程度大于  $\alpha$ , 与范严伟等<sup>[20]</sup>、张海阔等<sup>[28]</sup>关于土壤一维垂直入渗 VG 参数敏感性分析的结果一致。此外,  $\theta_r$  发生扰动对水平湿润锋运移距离基本无影响, 对垂直湿润锋运移距离影响较小, 且二者呈负相关关系。考虑到  $\theta_r$  获取较为困难, 通常可将土壤水吸力为 1 500 kPa 时对应的含水率作为滞留含水率的估算值<sup>[20,29-30]</sup>。

本研究发现,  $\alpha$  发生扰动对膜孔灌自由入渗规律影响较大。同一入渗时间,  $\alpha$  越大, 则单位膜孔面积累积入渗量越少, 水平湿润锋运移距离越近, 这主要是由于  $\alpha$  越大, 则进气值越小, 土壤水分特征曲线中间平缓部分位置越高, 同等含水率条件下土壤吸力越大, 土壤持水能力更好, 故入渗更慢<sup>[31]</sup>。范严伟等<sup>[20]</sup>的研究结论也表明了该观点,  $\alpha$  发生扰动对土壤入渗规律的影响随土质由细变粗而逐渐减小。

本研究表明,  $n$  发生扰动对膜孔灌自由入渗规律影响明显。同一入渗时间,  $n$  越大, 则单位膜孔面积累积入渗量越大, 垂直湿润锋运移距离越大, 高含水率湿润体面积越大, 这主要是由于  $n$  越大, 则土壤水分特征曲线低含水率区下降部分越陡, 同等含水率条件下土壤吸力越小, 土壤释水能力更好, 故入渗更快<sup>[32]</sup>。本研究发现, 对于垂直湿润锋运移距离, 参数的影响程度从大到小依次为  $n$ 、 $\alpha$ 、 $\theta_r$ , 这与王志涛等<sup>[21]</sup>关于粉壤土入渗 VG 参数敏感性研究的结果一致。参数  $\alpha$  与  $n$  可通过 RETC 软件进行初步预测。

### 4 结论

1) 同一入渗时间,  $\theta_r$  越大, 垂直湿润锋运移距离越近。随着  $\theta_r$  增加, 入渗结束时高含水率湿润体面积逐渐增大。

2)  $\alpha$  与单位膜孔面积累积入渗量、水平湿润锋运移距离均呈负相关关系。随着  $\alpha$  增大, 单位膜孔面积累积入渗量的相对灵敏度逐渐减小。

3)  $n$  与单位膜孔面积累积入渗量、垂直湿润锋运移距离、入渗结束时高含水率湿润体面积均呈正相关关系。

4) 与  $\alpha$ 、 $\theta_r$  相比,  $n$  发生扰动时, 入渗结束时高含水率湿润体面积的相对灵敏度最大。与  $n$ 、 $\theta_r$  相比,  $\alpha$  发生正扰动时, 高含水率湿润体面积的相对灵敏度最小。与  $\alpha$ 、 $n$  相比,  $\theta_r$  发生负扰动时, 高含水率湿润体面积的相对灵敏度最小。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

### 参考文献:

- [1] 吴蓉, 周志芳. 砂粒的物理性质与水分特征曲线模型参数的相关性分析[J]. 勘察科学技术, 2010(1): 3-6, 32.  
WU Rong, ZHOU Zhifang. Correlation analysis of physical properties of sand and model parameters of water characteristic curve[J]. Site Investigation Science and Technology, 2010(1): 3-6, 32.
- [2] XING X G, MA X Y. Simplification of the Gardner model: Effects on maximum upward flux in the presence of a shallow water table[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(4): 1 117-1 122.
- [3] SU L J, YANG X, WANG Q J, et al. Functional extremum solution and parameter estimation for one-dimensional vertical infiltration using the Brooks-Corey Model[J]. Soil Science Society of America Journal, 2018, 82(6): 1 319-1 332.
- [4] NGO-CONG D, ANTILLE D L, TH VAN GENUCHTEN M, et al. A modeling framework to quantify the effects of compaction on soil water retention and infiltration[J]. Soil Science Society of America Journal, 2021, 85(6): 1 931-1 945.
- [5] 王全九. 土壤物理与作物生长模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [6] 孙志祥, 邓建波, 吕玉娟, 等. 长江上游低山丘陵区土壤水分特征曲线传递函数研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 97-104.  
SUN Zhixiang, DENG Jianbo, LYU Yujuan, et al. Pedo-transfer function for estimating hydraulic properties of soils in hilly areas in the upper reach of the Yangtze River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 97-104.
- [7] 李敏, 李雯, 陈祎彤, 等. 膨胀土干湿循环自然胀缩下土壤水分特征三维曲线研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 121-129.  
LI Min, LI Wen, CHEN Yitong, et al. Soil water characteristic curves accounting for soil swelling and shrinking[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 121-129.
- [8] 常凯, 邢旭光. 不同钠质化程度土壤水分特征曲线及土体收缩特征[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 131-136, 144.  
CHANG Kai, XING Xuguang. Water characteristic curve and shrinkage characteristics of different sodification degree[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 131-136, 144.
- [9] 秦文静, 樊贵盛. 基于粒子群优化算法-支持向量机的原状黄土 Van Genuchten 模型参数土壤传输函数[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11): 132-137.

- QIN Wenjing, FAN Guisheng. Pedo-transfer functions of undisturbed loess Van Genuchten model based on particle swarm optimization algorithm and support vector machine[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(11): 132-137.
- [10] 李彬楠, 樊贵盛. 土壤水分特征曲线 Van-Genuchten 模型参数的土壤传输函数比选[J]. *中国农村水利水电*, 2018(5): 33-36.  
LI Binnan, FAN Guisheng. Van-genuchten model parameters of soil water characteristics curve are compared with the soil transfer function[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(5): 33-36.
- [11] 白玉, 张玉龙. 半干旱地区风沙土水分特征曲线 V.G.模型参数的空间变异性[J]. *沈阳农业大学学报*, 2008, 39(3): 318-323.  
BAI Yu, ZHANG Yulong. Spatial variability of V.G.model parameters of soil water characteristic curve of aeolian sandy soil in northwest Liaoning[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2008, 39(3): 318-323.
- [12] 杜国明, 张玉良. 微粒群优化求解 Van Genuchten 方程参数[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(6): 60-63.  
DU Guoming, ZHANG Yuliang. Calculate the Van Genuchten equation parameters based on PSO[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(6): 60-63.
- [13] 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.  
ZHA Yuanyuan, ZHOU Fachao, YANG Jinzhong. An approach to estimate soil hydraulic parameters using soil profile moisture data[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(8): 883-891.
- [14] HAN X W, SHAO M G, HORTON R. Estimating van genuchten model parameters of undisturbed soils using an integral method[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(1): 55-62.
- [15] 吕棚棚. 基于鸟群算法的土壤水分特征曲线模型参数估算[J]. *水资源开发与管理*, 2018(10): 22-26.  
LYU Pengpeng. Parameter estimation of soil moisture characteristic curve model based on bird swarm algorithm[J]. *Water Resources Development and Management*, 2018(10): 22-26.
- [16] 付强, 蒋睿奇, 王子龙, 等. 基于改进萤火虫算法的土壤水分特征曲线参数优化[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 117-122.  
FU Qiang, JIANG Ruiqi, WANG Zilong, et al. Optimization of soil water characteristic curves parameters by modified firefly algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(11): 117-122.
- [17] 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.  
GUO Xianghong, SUN Xihuan, MA Juanjuan. Parametric estimation of the Van Genuchten's equation based on hybrid genetic algorithm[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(5): 677-682.
- [18] 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): 179-180.  
MA Yingjie, HUDAN Tumaerba, SHEN Bing. Estimating parameters by solving Van Genuchten equation using the damper least square method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(8): 179-180.
- [19] 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.  
CHEN Dachun, MA Yingjie. Optimized algorithm for estimating parameters by solving Van Genuchten equation based on stochastic particle swarm optimization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(12): 82-85.
- [20] 范严伟, 赵文举, 毕贵权. 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. 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.
- [21] 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.
- [22] 梁冰, 姜利国. 非饱和带水分运动模型的 Picard 解法及参数灵敏度分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(5): 23-27.  
LIANG Bing, JIANG Ligu. Picard solution of moisture movement model in unsaturated zone and parameter sensitivity analysis[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2009, 20(5): 23-27.
- [23] 霍丽娟, 李一菲, 钱天伟. 定水头法和降水水头法测定黄土的饱和导水率[J]. *太原科技大学学报*, 2010, 31(3): 256-259.  
HUO Lijuan, LI Yifei, QIAN Tianwei. Determination of saturated hydraulic conductivity of loess soil by constant-head method and falling-head method[J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 2010, 31(3): 256-259.
- [24] 徐爱珍, 胡建民, 熊永, 等. TDR 法、干烧法及烘干法测定土壤含水量的比较研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(2): 253-256.  
XU Aizhen, HU Jianmin, XIONG Yong, et al. Comparison of soil moisture measurement using TDR method, dry burning method and oven drying method[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(2): 253-256.
- [25] 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.
- [26] VAN 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.
- [27] 黎朋红. 陕北黄土丘陵旱林地涌泉根灌湿润带研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.  
LI Penghong. Study on the moist soil of surge root irrigation for jujube in the loess hilly region in northern Shaanxi[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [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 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.
- [29] 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): 1-8.  
SHAO Ming'an, WANG Quanjiu, ROBERT Horton. A simple infiltration method for estimating soil hydraulic properties of unsaturated soils I. theoretical analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(1): 1-8.
- [30] 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(2): 1-6.  
WANG Jinsheng, YANG Zhifeng, CHEN Jiajun, et al. Study on water hysteresis in aerated soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000(2): 1-6.
- [31] 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): 147-153.  
CHEN Weijin, CHENG Donghui, TAO Wei. Physical significance of the parameters in the Van Genuchten model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 147-153.
- [32] 吴礼舟, 黄润秋. 非饱和土渗流及其参数影响的数值分析[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(1): 94-98.  
WU Lizhou, HUANG Runqiu. A numerical analysis of the infiltration and parameter effects in unsaturated soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(1): 94-98.

## Sensitivity analysis of the impact of soil hydraulic parameters on water infiltration from a single point source in membrane-hole irrigation

FAN Qianwen<sup>1</sup>, FEI Liangjun<sup>1\*</sup>, LIU Nian<sup>2</sup>

(1. Xi'an University of Technology Jointly Established the State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Conservancy in Northwest Arid Areas, Xi'an 710048, China; 2. Yulin Yuyang District Flood and Drought Disaster Prevention Center, Yulin 719000, China)

**Abstract:** **【Objective】** Water infiltration in soil is an important process for designing drip irrigation and is impacted by soil properties. The purpose of this paper is to investigate the effect of soil hydraulic properties on water infiltration from a single-point source in membrane-hole irrigation. **【Method】** The studies were based on the HYDRUS-2D software, with the soil hydraulic properties described by the van Genuchten formula. **【Result】** ① The cumulative infiltration amount was negatively correlated with the parameter  $\alpha$ , positively correlated with the parameter  $n$ , and was independent of the residual water content parameter  $\theta_r$ . The horizontal advancement of the wetting front was negatively correlated to the parameter  $\alpha$  and was independent of the parameter  $\theta_r$ . The vertical advancement of the wetting front was negatively correlated to the parameter  $\theta_r$  and positively correlated to the parameter  $n$ . At the end of infiltration, the volume of the wetted zone was positively correlated to the parameters  $\theta_r$  and  $n$ . Change in the parameter  $n$  had the greatest effect on the size of the wetted zone. ② The relative sensitivity of the cumulative infiltration gradually decreased with the increase in  $\alpha$ ; The positive perturbation of  $\alpha$  affected the cumulative infiltration per unit membrane pore area to a weaker extent than the negative perturbation.  $\alpha$  occurred in the negative perturbation, the relative sensitivity of the transport distance of the horizontal wetting front increased with the increase of the perturbation amplitude, and  $\alpha$  occurred in the positive perturbation, the relative sensitivity of the transport distance of the horizontal wetting front decreased with the increase of the perturbation amplitude. ③ When  $n$  was negatively perturbed, the relative sensitivities of cumulative infiltration per unit membrane pore area and vertical wetting front transport distance both showed a tendency to increase and then decrease with the increase of perturbation amplitude; when  $n$  was positively perturbed, the relative sensitivities of cumulative infiltration per unit membrane pore area showed a tendency to decrease and then increase and then decrease with the increase of perturbation amplitude. **【Conclusion】** Disturbing the parameter  $n$  has the most significant effect on water infiltration from the single-point source in membrane hole irrigation, while disturbing the parameter  $\theta_r$  had the least effect.

**Key words:** model; membrane hole irrigation; single point source; infiltration characteristics; parameters

责任编辑: 白芳芳