

土壤初始含水率对膜孔灌湿润体特征的影响

介飞龙, 费良军^{*}, 钟 韵, 刘利华, 康守旋

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘 要: 为了研究膜孔灌中土壤初始含水率对湿润体特征及累积入渗量的影响, 首先通过室内试验验证 HYDRUS 模拟西安粉壤土膜孔灌湿润体形状以及含水率分布的可靠性, 然后基于 HYDRUS 模型模拟在不同初始含水率条件下膜孔灌湿润体的变化过程。结果表明: 基于 HYDRUS 模型模拟的累积入渗量和湿润锋运移距离与室内试验结果的 R^2 均接近 1, 标准偏差绝对值均小于 10%, 拟合良好, 表明 HYDRUS 模型模拟入渗过程的可靠性。膜孔灌湿润锋形状可采用椭圆方程表示。当初始含水率较小 (不大于 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 时, 湿润体半径的含水率分布可采用椭圆方程表示; 从膜孔中心到湿润锋表面, 随着初始含水率的增大, 湿润体内的含水率梯度减小, 湿润体半径的含水率分布曲线由椭圆曲线逐渐转变为平缓曲线。基于湿润体含水率分布规律建立了考虑初始含水率的累积入渗量模型, 累积入渗量与湿润体半径的三次方呈正比, 湿润体半径可表示为湿润锋水平运移距离和垂向运移距离的几何平均值; 对于不同的膜孔半径 (1~5 cm), 模型计算累积入渗量与 HYDRUS 模拟值的 R^2 为 0.99, 标准偏差绝对值小于 10%; 对于粉土、粉壤土和壤土, 当初始体积含水率不大于 $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 算累积入渗量与 HYDRUS 模拟值的 R^2 为 0.99, 标准偏差绝对值小于 10%, 结果表明该模型对不同土壤质地和膜孔半径的适用性良好; 该模型在计算作物灌水需求量方面优于 Kostiacov 模型等传统的经验模型。该研究揭示了不同初始含水率下的膜孔灌湿润体特征, 并建立了累积入渗量模型, 可为膜孔灌灌溉水量的计算提供参考依据。

关键词: 入渗; 含水率; 土壤; 膜孔灌; 湿润体; HYDRUS

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.021

中图分类号: S274.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-14-0174-08

介飞龙, 费良军, 钟韵, 等. 土壤初始含水率对膜孔灌湿润体特征的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 174-181.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.021 <http://www.tcsae.org>

Jie Feilong, Fei Liangjun, Zhong Yun, et al. Effect of initial soil water content on wetting body characteristics of film hole irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 174-181. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.021 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

中国西北干旱半干旱地区的农业用水问题日益严重^[1-2], 因此节水灌溉技术被广泛应用^[3]。随着地膜覆盖在农业应用中愈加广泛^[4-6], 膜孔灌这种节水灌溉方法应运而生^[7]。膜孔灌是通过地膜上的作物孔和专用灌水孔将水分输送至土壤的灌溉技术^[8], 单个膜孔的入渗方式类似于地表点源入渗。与传统的地面灌溉方法相比, 膜孔灌技术显著提高了水分利用效率^[3,7-10], 因此深入研究膜孔灌对节水灌溉具有积极意义。

目前研究膜孔灌的方法主要有野外试验、室内试验和数值模拟 3 种。野外试验能够充分反映膜孔灌入渗的真实情况, 但在试验中无法观测湿润锋的变化情况, 且在野外试验中难以采用控制变量法, 不易于定量分析膜孔灌的入渗过程, 因此该方法不适合机理性研究。而室内试验能够较好地控制各试验变量: 如土壤质地、灌水

深度、膜孔直径等, 因此该方法广泛应用于膜孔灌的研究; 此外, 在对于膜孔灌湿润体特征的研究中, 室内试验可直接观测到湿润锋的变化过程, 在试验结束时还可定点取土样测定湿润体的含水率, 但该方法仅能测定灌水结束时刻的含水率。由于试验条件的限制, 目前尚无较好的方法能够观测膜孔湿润体含水率分布随入渗时间的变化, 如在使用时域反射仪 (Time-domain Reflectometer, TDR) 等设备观测湿润体含水率时易产生优先流, 此外由于膜孔灌的湿润体并不大, 若监测设备间距过小就会对土壤扰动过大, 若监测设备间距过大又难以准确地反映湿润体内含水率变化的规律, 因此很难通过室内试验研究湿润体含水率分布的动态变化特征。随着计算机技术的迅速发展, HYDRUS 等软件已广泛应用于灌溉系统设计中, 以评价灌溉系统的用水效率。与室内试验和野外试验相比, HYDRUS 模拟膜孔灌能够更加直观地了解入渗过程, 如湿润锋形状、入渗速率、累积入渗量, 尤其湿润体含水率分布随时间的变化规律。

近年来, 中国开展了大量的膜孔灌及湿润体的相关研究^[11-16], 然而目前为止对膜孔灌入渗模型的研究大多都是针对累积入渗量与入渗时间的关系^[17-21], 缺乏累积入渗量与湿润锋的定量研究, 事实上膜孔灌的湿润体含水率分布特征能够更加直观地体现膜孔灌的入渗规律。对于作物根系而言, 湿润体含水率的分布远比入

收稿日期: 2020-04-01 修订日期: 2020-06-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0400204); 国家自然科学基金基金项目 (51779205)

作者简介: 介飞龙, 博士生, 主要从事农业水资源利用研究。

Email: jiefli@foxmail.com

^{*}通信作者: 费良军, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉与农业水资源利用研究。Email: feiliangjun2008@163.com

渗时间对根系的影响更大,因此对湿润体含水率分布特征的研究尤为重要。近年来已有许多对膜孔灌湿润体含水率分布特征的研究,费良军等^[22]提出了计算湿润体内平均含水率的方法。范严伟等^[23]通过数值模拟研究了膜孔灌湿润体水分分布,结果表明土壤质地、容积密度对土壤水分分布有一定影响。钟韵等^[24]通过室内试验研究了不同土壤容重的膜孔灌湿润体含水率分布特征,结果表明含水率随着离膜孔距离的增大而不断减小,最终都逐渐接近初始含水率。刘利华等^[25]研究表明膜孔灌湿润体含水率分布等值线呈半椭圆形态。虽然湿润体含水率特征分布的研究已有很多,但多为定性研究和经验性研究,缺乏定量研究。Jie 等^[26]通过数值模拟定量研究了膜孔灌湿润体水分分布特征,并基于初始含水率较小的前提下提出了一种湿润体含水率分布的经验模型。然而,对于不同的初始含水率情况下土壤湿润体分布规律仍有待探讨,因此,本文在前人研究的基础上进一步分析了不同土壤初始含水率条件下的湿润体含水率分布特征,并建立了膜孔灌的灌溉入渗量与湿润体之间的定量关系,以期对膜孔灌精准灌溉提供理论与技术参考。

1 材料与方法

1.1 供试土样和装置

本试验用土取自西安市北郊农田表层土壤,经过风干后土壤体积含水率为 $0.1\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。土壤质地是采用英国马尔文公司生产的 Mastersizer-2000 激光粒度仪(精度 $0.02\sim2\,000\text{ }\mu\text{m}$)测定,其黏粒(直径 $<0.002\text{ mm}$)、粉粒($0.002\leq\text{直径}<0.02\text{ mm}$)和砂粒(直径 $\geq 0.02\text{ mm}$)的体积百分比分别为 6.75%、44.71%和 48.54%,按国际制土壤质地分类方法,试验土壤质地为粉壤土。

膜孔灌试验模拟装置如图 1 所示,装置包括土箱、马氏瓶、膜孔装置和连接管。土箱长宽均为 30 cm,高为 40 cm,膜孔半径为 3 cm,积水深度为 5 cm。在试验过程中,膜孔内的积水深度通过调节马氏瓶高度控制,通过记录马氏瓶内的水位变化,可换算出不同时刻的入渗量及入渗速率。

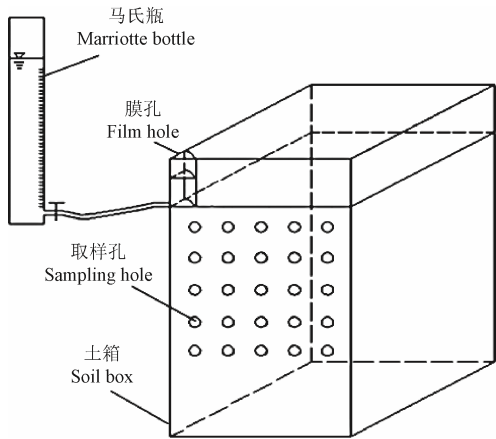


图 1 膜孔灌试验装置图
Fig.1 Film hole irrigation setup

1.2 室内试验

试验中土箱装填土壤容重为 $1.4\text{ g}/\text{cm}^3$;装填土箱时按 5 cm 分层称质量装填,为了使土层紧密贴合,装填下层土壤时将相邻的上层土壤刮毛;装填土壤时注意土壤要与土箱侧壁紧密贴合,以防止试验时侧壁产生优先流。试验结束时,从取样孔取出不同位置处的土样并采用烘干法测定其含水率。

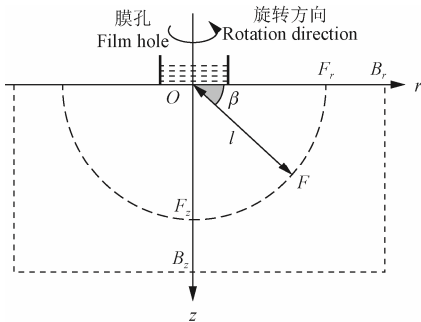
1.3 数值模拟

通过 HYDRUS 软件进行数值模拟,模拟试验包括 3 部分:1)利用数值模拟方法重复室内试验从而验证模型的可靠性;2)模拟不同初始含水率下的膜孔灌入渗过程,从而建立不同初始含水率条件下的膜孔灌累积入渗量模型;3)验证试验,为了验证累积入渗量模型对不同土壤质地和膜孔半径的适用性。数值模拟试验中除了初始含水率和膜孔半径外,积水深度与室内试验相同,本研究共设计数值模拟试验 20 组,试验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案
Table 1 Experiment scheme

土壤质地 Soil texture	试验类型 Type of experiment	初始体含水率 Initial water content ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	膜孔半径 Film hole radius/cm
粉壤土 Silt loam	室内试验	0.10	3
	数值模拟	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3	3
	验证试验(模拟)	0.10	1, 2, 3, 4, 5
典型壤土 Loam	验证试验(模拟)	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3	3
典型粉土 Silt	验证试验(模拟)	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3	3

膜孔灌在直角坐标系中是三维入渗过程,但由于膜孔灌的入渗过程可看作是柱对称问题,因此在柱坐标系下可将膜孔灌简化为二维入渗问题处理。根据膜孔灌的入渗特点建立柱坐标系下的膜孔灌概念模型如图 2 所示。



注: r 为径向坐标, cm; z 为垂向坐标, cm; F_r 和 F_z 分别表示湿润锋在水平方向和垂直方向的最大迁移距离, cm; B_r 和 B_z 分别为土箱内土的宽度和高度, cm; O 点为膜孔圆心; l 为湿润体半径, cm; β 表示湿润体半径与水平方向的夹角, ($^\circ$)。
Note: r represents the radial coordinate, cm. z represents the vertical coordinate, cm. F_r and F_z respectively represent the maximum migration distance of wetting front in horizontal and vertical direction, cm. B_r and B_z are the width and height of the soil in the soil box, cm. point O is the center of the film hole circle. l is the radius of the wetting body, cm. β represents the angle between the radius of the wetting body and the horizontal direction, ($^\circ$).

图 2 膜孔灌概念模型

Fig.2 Conceptual model of film hole irrigation

根据膜孔灌入渗的特点,建立膜孔灌的数学模型:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} \left[rK(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right]; \\ & 0 \leq r \leq B_r, 0 \leq z \leq B_z, t \geq 0 \\ & h = h_0; 0 \leq r \leq B_r, 0 \leq z \leq B_z, t = 0 \\ & h = H_0; 0 \leq r \leq R', z = 0, t \geq 0 \\ & K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) = 0; R \leq r \leq B_r, z = 0, t \geq 0 \\ & K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) = 0; 0 \leq r \leq B_r, z = B_z, t \geq 0 \\ & K(h) \frac{\partial h}{\partial r}; r = 0, 0 \leq z \leq B_z, t \geq 0 \\ & K(h) \frac{\partial h}{\partial r}; r = B_r, 0 \leq z \leq B_z, t \geq 0 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中 h 为负压水头, cm; t 为入渗时间, min; K 为导水率, cm/min; h_0 为初始负压水头, cm; H_0 为膜孔内积水深度, cm; R' 为膜孔半径, cm。土壤水分特征曲线采用 van Genuchten 模型, 本研究采用 HYDRUS 软件的神经网络模块预测土壤的初始参数, 将土壤质地 (体积分数: 黏粒 6.75%、粉粒 44.71%、砂粒 48.54%, 容重 1.4 g/cm^3) 作为输入项, 神经网络模型自动预测相应土壤的各项参数, 将预测结果作为初始参数进行 HYDRUS 模拟, 将模拟结果与试验结果对比验证, 通过微调初始参数来率定模拟结果, 直到模拟的累积入渗量和湿润锋动态变化值与室内试验观测到的结果吻合良好, 率定结束。参数率定结果如表 2 所示。

表 2 土壤物理参数表
Table 2 Soil physical parameters

参数类别 Parameter types	参数值 Parameter values
饱和含水率 Saturated water content/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.45
残余含水率 Residual water content/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.088
进气值倒数 Reciprocal of air-entry value (α)/ cm^{-1}	0.009
Van-Genuchten 模型参数 m Parameter m in Van-Genuchten model	0.330 3
Van-Genuchten 模型参数 n Parameter n in Van-Genuchten model	1.49
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.005 6

1.4 统计分析

采用统计学方法中的均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE)、偏差百分比 (Percentage of Bias, PBIAS) 和平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 3 个指标评价 HYDRUS 数值模拟和累积入渗量模型的准确性, 当 RMSE 和 MAE 越接近于 0, PBIAS 的绝对值小于 10% 时, 则表明 2 组数据差异较小, 吻合良好。各指标的计算利用 Excel 软件中的函数功能实现, 使用 Excel 和 Suffer 软件绘制所需图形。

2 结果与分析

2.1 HYDRUS 模型验证

图 3a 为粉壤土试验的累积入渗量模拟值和试验实测值对比图, $R^2=0.99$, RMSE 和 MAE 分别为 9.46 和 7.51 cm^3 , $|PBIAS|=0.6\% < 10\%$, 表明累积入渗量的模拟

值与试验观测值吻合; 图 3b 为湿润锋运移距离的模拟值和试验实测值对比情况, 水平方向湿润锋运移距离的 $R^2=0.99$, 接近于 1, RMSE 和 MAE 分别为 0.29 和 0.16 cm, $|PBIAS|=1.0\% < 10\%$, 垂直方向湿润锋运移距离的 $R^2=0.99$, 接近于 1, RMSE 和 MAE 分别为 0.30 和 0.18 cm, $|PBIAS|=0.8\% < 10\%$, 表明使用 HYDRUS 模拟膜孔灌的入渗过程准确可靠, 可用于模拟不同初始含水率条件下的膜孔灌入渗过程。

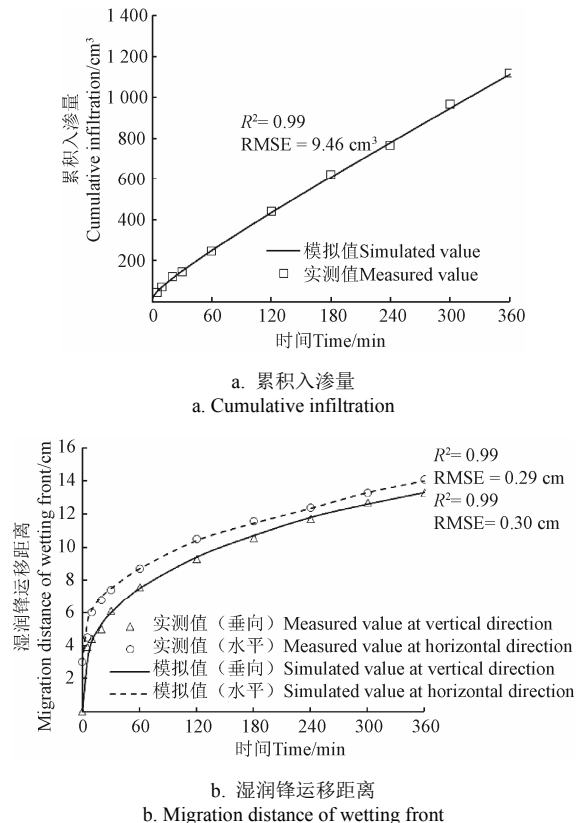


图 3 HYRUS 数值模拟与室内试验结果的对比

Fig.3 Comparison of HYRUS numerical simulated results and experimental results in laboratory experiment

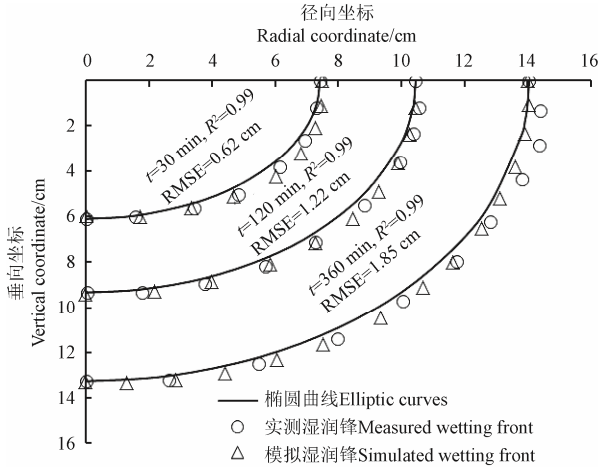
2.2 湿润锋形状

图 4 为室内试验和 HYDRUS 模拟得到的粉壤土湿润锋在不同时刻的形状, 由图可知湿润锋随着时间的增加不断推进, 在不同时刻的湿润体形状均近似于旋转椭球体的一半。为了定量研究湿润锋曲线与椭圆曲线的拟合程度, 在实测湿润锋曲线上取若干点, 再在椭圆曲线上取与这些点纵坐标对应的若干点, 最后将实测湿润锋曲线上的点和椭圆曲线上的点的径向坐标进行拟合即可得到实测湿润锋曲线和椭圆曲线的 R^2 、RMSE 和 MAE 值。根据实测湿润锋曲线与椭圆曲线的拟合结果, 当入渗时间 t 在 30 min 时, 实测湿润锋曲线与椭圆曲线的 RMSE 和 MAE 分别为 0.62 和 0.22 cm, $|PBIAS|=5.7\% < 10\%$; 当 t 在 120 min 时, 实测湿润锋曲线与椭圆曲线的 RMSE 和 MAE 分别为 1.22 和 0.38 cm, $|PBIAS|=6.9\% < 10\%$; 当 t 在 360 min 时, 实测湿润锋曲线与椭圆曲线的 RMSE 和 MAE 分别为 1.85 和 0.56 cm, $|PBIAS|=7.4\% < 10\%$; 表明湿润锋与椭圆曲线拟合较好, 因此可使用椭圆曲线方程

表示湿润锋形状。假设湿润锋在水平方向和垂直方向的运移距离分别为椭圆曲线的长半轴和短半轴, 则椭圆曲线的方程可表示为

$$\frac{r^2}{F_r^2} + \frac{z^2}{F_z^2} = 1 \quad (2)$$

式中 F_r 和 F_z 分别表示湿润锋在水平方向和垂直方向的最大运移距离, cm。



注: t 表示入渗时间, min; R^2 和 RMSE 表示实测湿润锋和椭圆曲线的决定系数和均方根误差。下同。

Note: t represents the infiltration duration, min; R^2 and RMSE represent the determination coefficient and root mean square error of measured wetting front curve and elliptic curve. Same as below.

图 4 不同时刻湿润锋与椭圆曲线拟合图

Fig.4 Wetting fronts and fitted results by elliptic curve at different time

2.3 初始含水率对湿润体含水率分布的影响

图 5 为不同初始含水率条件下西安粉壤土灌水 360 min 后的含水率等值线图。由图 5a 可知, 当初始体积分含水率为 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时, 土壤含水率从膜孔中心到湿润锋表面逐渐减小, 而含水率的变化速率逐渐增大, 在湿润锋处含水率梯度很大; 这与费良军等^[22-23]的研究结果一致。然而, 这种现象存在于初始含水率较小的情况下, 随着初始含水率的增大 (图 5b 和图 5c), 含水率等值线的分布逐渐均匀, 此时湿润体内的含水率分布也越均匀; 其原因是当初始含水率较小时土壤吸力较大, 在

湿润体表层形成较大的水力梯度, 反之当初始含水率较大时土壤吸力较小, 湿润体的水力梯度也较小, 因此含水率梯度也逐渐变小。

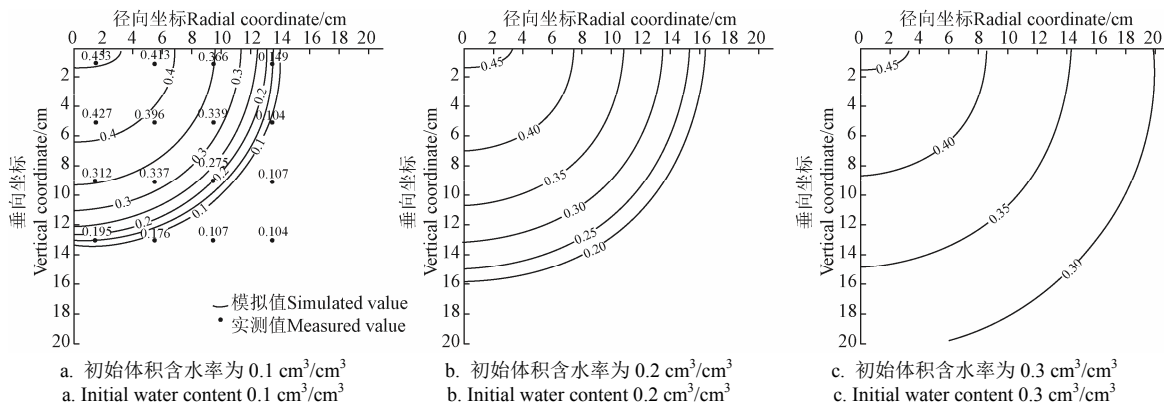
图 6 为初始体积分含水率为 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 的粉壤土灌水 360 min 时的湿润体半径含水率分布图。根据计算结果, 当 $\beta=0^\circ$ 时, HYDRUS 模拟的含水率值与椭圆曲线的 RMSE 和 MAE 分别为 0.03 和 $0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $|\text{PBIAS}|=9.1\%<10\%$, 实测的含水率值与椭圆曲线的 RMSE 和 MAE 分别为 0.05 和 $0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $|\text{PBIAS}|=6.8\%<10\%$; 当 $\beta=45^\circ$ 时, 模拟的含水率值与椭圆曲线的 RMSE 和 MAE 分别为 0.02 和 $0.00 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $|\text{PBIAS}|=5.7\%<10\%$, 实测的含水率值与椭圆曲线的 RMSE 和 MAE 分别为 0.01 和 $0.00 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $|\text{PBIAS}|=1.1\%<10\%$; 当 $\beta=90^\circ$ 时, 模拟的含水率值与椭圆曲线的 RMSE 和 MAE 分别为 0.02 和 $0.00 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $|\text{PBIAS}|=5.6\%<10\%$, 实测的含水率值与椭圆曲线的 RMSE 和 MAE 分别为 0.01 和 $0.00 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $|\text{PBIAS}|=1.3\%<10\%$ 。这表明 HYDRUS 模拟和实测的湿润体半径含水率分布曲线均与椭圆曲线拟合较好, 这说明当 β 取不同值时, 任意湿润体半径含水率变化都符合椭圆曲线。王文焰等^[27]研究结果表明在一维垂直入渗条件下的土壤水分含水率的分布可采用椭圆曲线表示。本研究发现当初始体积分含水率较小为 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时, 膜孔灌湿润体的含水率分布具有相似的性质。

当初始含水率较小时, 湿润体半径的含水率分布可采用椭圆曲线方程表示, 根据椭圆曲线的特性, 湿润体内任意一点的含水率满足椭圆曲线方程

$$\frac{(\theta - \theta_i)^2}{(\theta_s - \theta_i)^2} + \frac{x^2}{l^2} = 1 \quad (3)$$

式中 l 表示湿润体半径, cm; θ_s 表示饱和含水率, cm^3/cm^3 ; θ_i 表示土壤初始含水率, cm^3/cm^3 ; x 表示湿润体半径上的一点与膜孔中心 O 点的距离, cm; θ 表示湿润体半径上与 O 点距离为 x 处的土壤含水率, cm^3/cm^3 。将式 (3) 整理可得到含水率关于 x 的函数表达式

$$\theta = (\theta_s - \theta_i) \sqrt{1 - \frac{x^2}{l^2}} + \theta_i \quad (4)$$

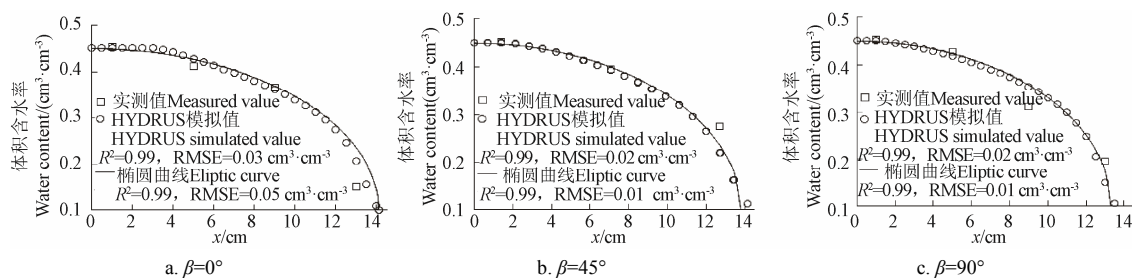


注: 土壤质地为粉壤土; 膜孔半径为 3 cm; 等值线上的值表示土壤体积分含水率, cm^3/cm^3 。

Note: The soil texture is silt loam, radius of film hole is 3 cm. The value on the contour line represents the soil water content, cm^3/cm^3 .

图 5 灌水 360 min 后的含水率等值线图

Fig.5 Soil water content contours after 360 min of irrigation



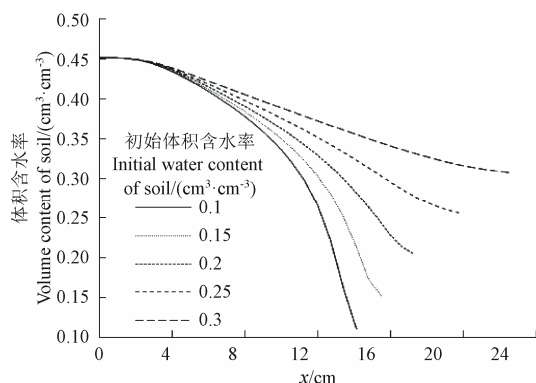
注：土壤质地为粉壤土，膜孔半径为 3 cm。

Note: The soil texture is silt loam, radius of film hole is 3 cm.

图 6 灌水 360 min 湿润体半径含水率分布

Fig.6 Soil water content distribution on wetting body radius after 360 min of irrigation

图 7 为粉壤土灌水 360 min 时 $\beta=45^\circ$ 的湿润体半径含水率分布图，由图可以看出，随着初始含水率的增大，湿润体半径逐渐增大，其原因是初始含水率越大，土壤孔隙所需填充的水分越少，因此湿润体体积越大。此外，随着初始含水率的增大，湿润体半径的含水率分布曲线逐渐平缓，由椭圆形逐渐转变为近似直线，这是由于初始含水率越大，湿润锋处的土壤吸力越小，产生的水力梯度越小，因此土壤含水率变化梯度变小。



注：土壤质地为粉壤土，膜孔半径为 3 cm。

Note: The soil texture is silt loam. Radius of film hole is 3 cm.

图 7 土壤初始含水率对灌水 360 min 湿润体半径含水率的影响

Fig.7 Effect of initial soil water content on water content distribution on wetting body radius after 360 min of irrigation

2.4 初始含水率对累积入渗量的影响

当初始含水率较小时湿润体形状可用式 (2) 表示，湿润体内的含水率分布可由式 (4) 表示，因此可通过积分方法得到湿润体内的总水量，从而计算出膜孔灌的累积入渗量。建立如图 8 所示的坐标系。

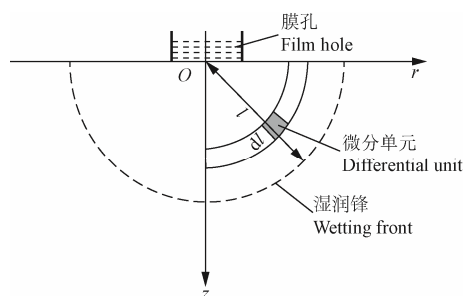


图 8 湿润体剖面图

Fig.8 Wetting body profile

在湿润体内任选一体积为 dV 的单元，则根据积分结

果累积入渗量可表示为

$$I = \iiint_{\Omega} (\theta_s - \theta_i) dV \quad (5)$$

式中 I 表示累积入渗量， cm^3 ； dV 表示单元体体积， cm^3 ； Ω 表示积分范围。联立式 (4) 和式 (5) 并计算积分结果得

$$I = \frac{1}{8} \pi^2 (\theta_s - \theta_i) l^3 \quad (6)$$

式 (6) 表示累积入渗量与湿润体半径之间的关系。已知湿润锋水平运移距离 F_r 和垂直运移距离 F_z ，则根据旋转椭球体的几何性质，可采用椭球体的等效半径（几何平均值）代替湿润体半径，则湿润体半径可表示为

$$l = \sqrt[3]{F_r F_z} \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (6) 得到累积入渗量关于湿润锋运移距离的表达式为

$$I = \frac{1}{8} \pi^2 (\theta_s - \theta_i) F_r^2 F_z \quad (8)$$

式 (8) 表示当湿润体含水率分布符合椭圆曲线时的累积入渗量与湿润锋运移距离之间的关系，该式仅适用于土壤初始体积含水率较小约为 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 的情况。同理，可通过积分计算得到当湿润体初始含水率较大时，湿润体含水率分布为直线时的累积入渗量与湿润锋之间的关系式为

$$I = \frac{1}{6} \pi (\theta_s - \theta_i) F_r^2 F_z \quad (9)$$

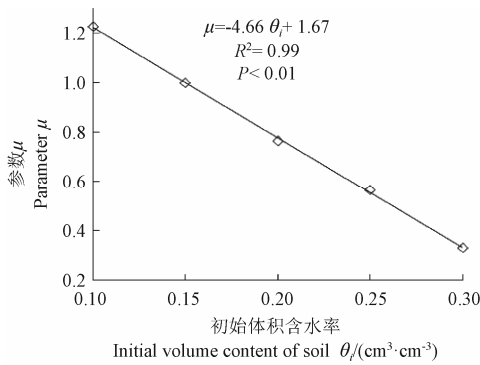
由式 (8) 和式 (9) 不难发现，当初始含水率不同时，累积入渗量都与 $[(\theta_s - \theta_i) F_r^2 F_z]$ 呈正比关系，仅系数不同，为了使公式具有普适性，引入与初始含水率有关的系数参数 μ 可表示为

$$\mu = f(\theta_i) = \frac{I}{(\theta_s - \theta_i) F_r^2 F_z} \quad (10)$$

为了研究初始含水率 θ_i 与参数 μ 之间的关系，通过数值模拟计算了不同初始含水率条件下的累积入渗量和湿润锋运移距离，将结果代入式 (10) 可求出不同初始含水率 θ_i 对应的 μ 值。图 9 为不同初始含水率对应的 μ 值计算结果，经回归分析得到初始含水率 θ_i 与 μ 在 0.01 水平上呈极显著线性相关关系 ($R^2=0.99$)。

参数 μ 与初始含水率 θ_i 的相关关系可表示为

$$\mu = -4.66 \theta_i + 1.67 \quad (11)$$

图 9 初始体积含水率 θ_i 与参数 μ 的相关关系图Fig.9 Relationship between initial soil water content θ_i and parameter μ

将式 (11) 代入式 (10) 得

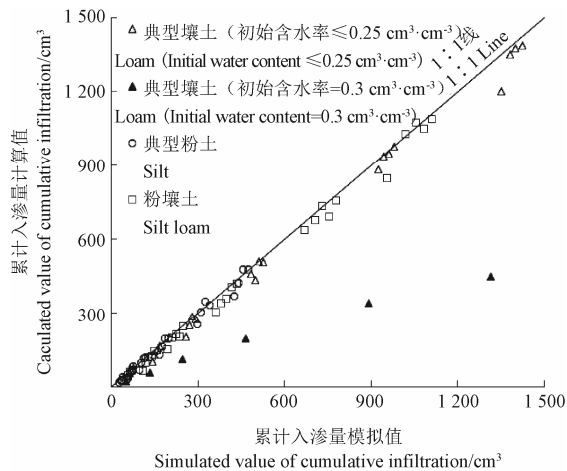
$$I = (-4.66\theta_i + 1.67)(\theta_s - \theta_i)F_r^2 F_z \quad (12)$$

式 (12) 是考虑了初始含水率的膜孔灌累积入渗量计算公式。为了验证式 (12) 的准确性及适用性, 采用 3 种典型土壤 (粉土、粉壤土、壤土) 和 5 种不同膜孔半径 (1, 2, 3, 4 和 5 cm) 的模拟结果对式 (12) 进行验证。

图 10a 为 3 种不同土壤质地的累积入渗量的验证结果, 由图可看出粉壤土、粉土和部分壤土的计算结果分布在 1:1 线附近, 而另一部分壤土计算结果偏离较远。根据偏差百分比的结果, 粉壤土和粉土的 PBIAS 分别为

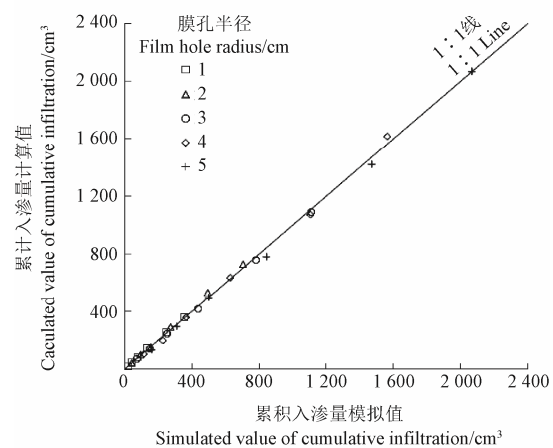
5.73% 和 9.54%, 当壤土初始含水率 $\leq 0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时 (图 10a 中的空心三角), 式 (12) 的计算结果与模拟结果的 PBIAS 为 4.80%, PBIAS 值均小于 10%, 表明 3 种土壤质地在不同初始含水率条件下, 由式 (12) 计算的累积入渗量与 HYDRUS 模拟值吻合较好; 但当壤土的初始含水率大于 0.25 时 (图 10a 中的实心三角), 计算结果偏离 1:1 线, PBIAS 为 62.41% 远大于 10%, 表明壤土的初始含水率过大时, 通过式 (12) 计算累积入渗量误差很大。这是因为壤土与粉土相比其粗颗粒相对较多, 当土壤初始含水率过大时, 土壤吸力很小, 土壤水在重力作用下产生了水分再分布的情况, 因此在灌溉入渗过程中土壤湿润体内的含水率分布不再服从图 7 的规律, 此时不再符合式 (12) 的计算结果。该结果表明, 式 (12) 在计算粉土和粉壤土的适用性较好, 对初始含水率不大于 $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 的壤土类型也可采用式 (12) 计算累积入渗量。

图 10b 为粉壤土在不同膜孔半径条件下的计算结果, 由图可看出计算点均分布在 1:1 线附近, 根据偏差百分比的计算结果, 当膜孔半径分别为 1, 2, 3, 4 和 5 cm 时, 由式 (12) 计算的累积入渗量与模拟结果的 PBIAS 值分别为 -5.86%, -5.83%, 2.69%, 0.05% 和 2.63%, 其绝对值均小于 10%, 表明在不同膜孔半径条件下, 由式 (12) 计算的累积入渗量与 HYDRUS 模拟值吻合良好, 模型在不同膜孔半径的条件下适用性良好。



a. 不同土壤质地的验证结果 (膜孔半径为 3 cm)

a. Verification results of different soil textures (film hole radius 3 cm)



b. 不同膜孔半径条件下的验证结果 (粉壤土)

b. Verification results of different film hole radius (silt loam)

图 10 累积入渗量计算误差

Fig.10 Calculation error of cumulative infiltration

Kostiakov 模型等传统的经验模型注重于研究累积入渗量随时间变化的规律, 而式 (12) 反映的是累积入渗量与湿润体形状之间的关系。由于不同的作物在不同的生长时期根系分布有所差异, 对于作物而言, 湿润体的分布特征对于作物的生长起到了关键性作用, 其对作物生长的影响远大于灌水时间长, 因此在计算作物的灌水需求量方面, 式 (12) 在一定程度上优于 Kostiakov 模型等传统的经验模型。

3 结 论

膜孔灌是一种高效节水的灌溉方式, 在农业生产中

具有广泛的应用前景。本文通过室内试验及 HYDRUS 数值模拟研究了西安典型粉壤土的膜孔灌入渗特性, 得到了以下结论:

1) 使用 HYDRUS 软件模拟西安粉壤土的膜孔灌入渗过程, 累积入渗量和湿润锋运移距离的模拟值与试验值拟合良好, 模拟值与实测值的决定系数均接近于 1, 模型准确可靠。

2) 膜孔灌入渗过程中形成的湿润体形状近似于旋转椭球体的一半, 其湿润锋曲线形状可采用椭圆曲线方程表示。当初始体积含水率较小, 为 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时, 湿润体半径的含水率分布曲线与椭圆曲线拟合良好; 随着初

始含水率的增大,湿润体半径的含水率分布曲线由椭圆曲线逐渐转变为接近直线的平缓曲线。

3)建立了考虑初始含水率的累积入渗量模型,累积入渗量与湿润体半径的三次方呈正比,湿润体半径可采用湿润锋水平运移距离和垂向运移距离的几何平均值表示;该模型适用于粉土、粉壤土以及初始体积含水率不大于 $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 的壤土;此外该模型在不同的膜孔半径条件下也具有较好的适用性。

本研究所建立的模型未考虑非均质土壤以及土壤初始含水率非均匀分布的情况,后续研究应进一步深入。

[参 考 文 献]

- [1] 王伟军,赵雪雁,张明军,等.西北干旱区内陆河流域公众的水资源感知及节水意向:以甘肃省河西走廊地区为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(11): 148-157.
Wang Weijun, Zhao Xueyan, Zhang Mingjun, et al. Public perception of water resources and water-saving intention in arid inland river basins of northwestern China: A case study of the Hexi Corridor in Gansu Province[J]. China Population Resources and Environment, 2019, 29(11): 148-157. (in Chinese with English abstract)
- [2] 冯起,龙爱华,王宁练,等.西北内陆区水资源安全保障技术集成与应用[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 103-108.
Feng Qi, Long Aihua, Wang Ninglian, et al. Integration of Water Resources Security Technology and Its Application in Northwest Inland Area[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 103-108. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张亮,周薇,李道西. 农业高效节水灌溉模式选择研究进展[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(5): 447-453.
Zhang Liang, Zhou Wei, Li Daoxi. Research progress in irrigation mode selection of high-efficiency water-saving agriculture[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(5): 447-453. (in Chinese with English abstract)
- [4] Steinmetz Z, Wollmann C, Schaefer M, et al. Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation?[J]. Science of the Total Environment, 2016, 550: 690-705.
- [5] Kader M A, Senge M, Mojid M A, et al. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment[J]. Soil & Tillage Research, 2017, 168: 155-166.
- [6] Lamont W J. Plastic mulches for the production of vegetable crops[J]. Horttechnology, 1993, 3: 35-39.
- [7] 徐首先. 膜孔灌技术[J]. 新疆水利, 1994(83): 22-26.
- [8] Saeed M, Mahmood S. Application of film hole irrigation on borders for water saving and sunflower production[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2013, 38: 1347-1358.
- [9] 吴军虎,费良军,王文焰. 膜孔灌溉单孔入渗特性研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 307-311.
Wu Junhu, Fei Liangjun, Wang Wenyan. Study on the infiltration characteristics of single filmed hole and its mathematical model under filmed hole irrigation[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(3): 307-311. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李应海,田军仓. 膜上灌技术的研究进展[J]. 宁夏农学院学报, 2003, 24(4): 96-100.
Li Yinghai, Tian Juncang. Research advances irrigating technique of film hole irrigation[J]. Journal of Ningxia Agricultural College, 2003, 24(4): 96-100. (in Chinese with English abstract)
- [11] 范严伟,赵彤,白贵林,等. 水平微润灌湿润体 HYDRUS-2D 模拟及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 115-124.
Fan Yanwei, Zhao Tong, Bai Guilin, et al. HYDRUS-2D simulation of soil wetting pattern with horizontal moistube-irrigation and analysis of its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(4): 115-124. (in Chinese with English abstract)
- [12] 费良军,王锦辉. 泥沙粒度组成对浑水膜孔灌单向交汇入渗特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 105-112.
Fei Liangjun, Wang Jinhui. Effect of clay and sand grades on single-line interference infiltration characteristics of muddy water film hole irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 105-112. (in Chinese with English abstract)
- [13] 费良军,王锦辉,金世杰. 不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 172-178.
Fei Liangjun, Wang Jinhui, Jin Shijie. Effect of clay and sand grades on single-line interference infiltration characteristics of muddy water film hole irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 172-178. (in Chinese with English abstract)
- [14] Dong Yuyun, Wang Baocheng, Jia Lihua. Effects of different irrigation treatments on maize water consumption, growth and yield under film hole irrigation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 501(1): 1986-1992.
- [15] 钟韵,费良军,刘乐,等. 膜孔灌溉下土壤入渗特征的多因素分析[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 53-61.
Zhong Yun, Fei Liangjun, Liu Le, et al. Analysis on soil infiltration characteristics of film hole irrigation as affected by multi-factors[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 53-61. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李发文,张行南,费良军. 膜孔多向交汇入渗影响因素试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(3): 44-48.
Li Fawen, Zhang Xingnan, Fei Liangjun. Experimental study on influential factors in film hole bilateral interference infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(3): 44-48. (in Chinese with English abstract)
- [17] 费良军,程东娟,雷雁斌,等. 膜孔灌单点源入渗特性与数学模型研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(5): 212-216.
Fei Liangjun, Cheng Dongjuan, Lei Yanbin, et al. Study on the infiltration characteristic and the mathematical model of the point source free infiltration under film hole irrigation[J]. Journal of Northwest A & F University: Nat Sci Ed, 2007, 35(5): 212-216. (in Chinese with English abstract)
- [18] 范严伟,马孝义,赵文举. 充分供水条件下点源入渗参数影响因素及其简化模型[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 190-195.
Fan Yanwei, Ma Xiaoyi, Zhao Wenju. Influencing factors of point source infiltration parameters and simplified model under adequate water supply[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(4): 190-195. (in Chinese with English abstract)
- [19] Li Yibo, Fan Yanwei, Liu Ye, et al. Influencing factors and simplified model of film hole irrigation[J]. Water, 2017, 9(1): 543-560.
- [20] 董玉云,费良军,穆红文. 膜孔肥液单向交汇入渗特性及数学模型研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3): 81-84.
Dong Yuyun, Fei Liangjun, Mu Hongwen. Mathematical models for single-line interference infiltration of fertilizer solution in film hole[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(3): 81-84. (in Chinese with English abstract)
- [21] 费良军,康守旋,聂卫波,等. 基于 Green-Ampt 的膜孔灌三维入渗模型建立与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 69-75.

- Fei Liangjun, Kang Shouxuan, Nie Weibo, et al. Development and verification of 3D Green-Ampt based membrane pore infiltration model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(20): 69-75. (in Chinese with English abstract)
- [22] 费良军, 吴军虎, 王文焰, 等. 充分供水条件下单点膜孔入渗湿润特性研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(5): 137-140. Fei Liangjun, Wu Junhu, Wang Wenyan, et al. Study on wetting characteristics of point source infiltration under film hole irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(5): 137-140. (in Chinese with English abstract)
- [23] 范严伟, 马孝义, 王波雷, 等. 膜孔灌土壤湿润体水分分布与入渗特性数值模拟[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11): 35-41. Fan Yanwei, Ma Xiaoyi, Wang Bolei, et al. Numerical simulation on soil wetting pattern moisture distribution and infiltration characteristics for film hole irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 35-41. (in Chinese with English abstract)
- [24] 钟韵, 费良军, 傅渝亮, 等. 土壤容重对浑水膜孔灌单点源自由入渗特性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 88-91, 96. Zhong Yun, Fei Liangjun, Fu Yuliang, et al. Influence of soil bulk density on single hole point source free infiltration characteristics of muddy water film hole irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 88-91, 96. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘利华, 费良军, 陈琳, 等. 浑水含沙率对膜孔灌肥液入渗土壤水氮运移特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 120-129. Liu Lihua, Fei Liangjun, Chen Lin, et al. Effects of sediment concentration of muddy water on water and nitrogen transport characteristics under film hole irrigation with fertilizer infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(2): 120-129. (in Chinese with English abstract)
- [26] 介飞龙, 费良军, 钟云, 等. Wetting body characteristics and infiltration model of film hole irrigation[J]. Water, 2020, 12(5): 1226-1238.
- [27] 王文焰, 汪志荣, 王全九, 等. 黄土中 Green-Ampt 入渗模型的改进与验证[J]. 水利学报, 2003, 35(1): 30-35. Wang Wenyan, Wang Zhirong, Wang Quanjie, et al. Improvement and evaluation of the Green-Ampt model in loess soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 35(1): 30-35. (in Chinese with English abstract)

Effect of initial soil water content on wetting body characteristics of film hole irrigation

Jie Feilong, Fei Liangjun^{*}, Zhong Yun, Liu Lihua, Kang Shouxuan

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The objective of this study was to explore the effect of different initial soil water contents on the characteristics of the wetting body and to establish the quantitative model of film hole irrigation between cumulative infiltration and the shape of the wetting body. Laboratory experiments and HYDRUS numerical simulation were carried out. The reliability of the simulation results using HYDRUS software in film hole irrigation was verified by laboratory experiment, and the results showed that the R^2 of HYDRUS simulation and laboratory experiment results (wetting front migration distance and cumulative infiltration amount) were both close to 1, and the absolute value of percentage of bias was less than 10%, indicating a good fitness. Based on this, the dynamic characteristics of Xi'an silt loam in film hole irrigation under different initial soil water content were simulated. The experimental results showed that the shape of the wetting body formed by film hole irrigation was approximately half of a rotating ellipsoid, and the shape of wetting front curve could be expressed using an elliptic curve equation. The horizontal and vertical migration distances of the wetting front were semi-major and semi-minor axis of the ellipse, respectively. When the initial soil water content was as low as around $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, the soil water content on the wetting body radius from the center of the film hole to the surface of the wetting front decreased gradually and the change rate of soil water content increased gradually, reaching the maximum near the wetting front. Moreover, the distribution of soil water content on the wetting body radius could be accurately expressed by using an elliptic curve equation. As the initial soil water content of the wetting body increased gradually, the water content gradient in the wetting body decreased, the water distribution became more uniform and the water content distribution curve of the wetting body radius gradually changed from an elliptic curve to a gentle curve close to a straight line. According to the distribution law of soil water content in the wetting body, the model of cumulative infiltration considering initial soil water content was established. The model showed that the cumulative infiltration of film hole irrigation was proportional to the third power of the equivalent radius of the wetting body, and the wetting body radius was equal to the geometric mean of the horizontal and vertical migration distances of the wetting body. In order to verify the accuracy and applicable scope of this model, the HYDRUS simulation results of three typical soils (silt, silt loam and loam) and five different film hole radius (1, 2, 3, 4 and 5 cm) were used to verify the model. For the silt, silt loam and the loam soils, when the initial water content was not higher than $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, the R^2 of calculated cumulative infiltration and simulated value using HYDRUS were both close to 1, and the absolute value of percentage of bias was less than 10%, which showed that the model had good applicability in silt, silt loam and the loam when the initial water content was not higher than $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. In addition, for the different film hole radii, the R^2 of calculated cumulative infiltration and simulated value using HYDRUS model were close to 1, and the absolute value of percentage of bias was less than 10%, which suggested that the model had good applicability to the conditions of different film hole radii. Since this model reflected the relationship between the cumulative infiltration and the shape of the wetting body, for crops, this model was superior to the traditional empirical models such as the Kostiacov model in calculating the irrigation demand of crops to a certain extent. This study revealed the characteristics of the wetting body of film hole irrigation under different initial water contents and established a model for calculating cumulative infiltration, which provided valuable information for the precise irrigation of film hole irrigation.

Keywords: infiltration; water content; soils; film hole irrigation; wetting body; HYDRUS