

带状砂沟模式下土壤入渗过程模拟研究

范严伟, 梁金宇

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: [目的] 探究土壤质地类型和砂沟结构参数对土壤入渗过程的影响,为砂沟集雨工程设计、运行和管理提供科学依据。[方法] 基于 HYDRUS-2D/3D 软件,建立带状砂沟模式下土壤水分运动数学模型,利用室内试验验证模拟带状砂沟模式下土壤入渗过程的可靠性。在此基础上,模拟分析不同影响因素下带状砂沟模式下土壤累积入渗量和湿润锋运移变化过程。[结果] 模拟结果与实测数据无显著性差异且一致性良好,表明所建模型及其求解方法能够有效获取带状砂沟模式下不同时刻土壤累积入渗量和湿润锋运移距离数值;均质土壤填充带状砂沟存在明显的增渗效应。原土质地、砂沟距、砂沟宽和砂沟深均对增渗率有较大影响,增渗率随原土饱和导水率和砂沟距的增大而减小,随砂沟宽和砂沟深的增大而增大;土壤湿润锋轮廓呈下低上高的U形,随着时间的延长,U形侧边湿润锋逐渐靠近砂沟交汇面,顶部平台逐渐消失;原土质地对湿润锋运移距离影响较大,湿润体随原土饱和导水率的增大而增大;砂沟深对湿润锋的形态和分布影响较大,随砂沟深度的增大,U字体型垂向拉伸,左侧湿润深度显著增大,右侧湿润深度变化微弱;砂土质地、砂沟距和砂沟宽对湿润锋运移距离影响较小。[结论] 带状砂沟土体构型能够显著提高土壤入渗能力,土壤质地类型和砂沟结构参数对土壤累积入渗量和湿润锋运移距离均有不同程度影响。

关键词: 带状砂沟; 增渗; 湿润锋; 累积入渗量; HYDRUS-2D/3D

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0022-10

中图分类号: S152.72

文献参数: 范严伟, 梁金宇. 带状砂沟模式下土壤入渗过程模拟研究[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 22-31. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.003; Fan Yanwei, Liang Jinyu. Simulation investigation of soil infiltration process for banded sand ditches [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 22-31.

Simulation Investigation of Soil Infiltration Process for Banded Sand Ditches

Fan Yanwei, Liang Jinyu

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: [Objective] The influences of soil texture types and parameters of banded sand ditches on soil infiltration processes were studied in order to provide scientific evidence for the design, operation, and management of sand ditch rainwater harvesting projects. [Methods] HYDRUS-2D/3D software was used to establish a mathematical model for soil water movement in a banded sand ditch, and the reliability of simulating the soil infiltration process in a banded sand ditch model was verified using laboratory experiments. The cumulative infiltration and movement of the wetting front under different influencing factors in a banded sand ditch were simulated and analyzed. [Results] The simulated results were consistent with the measured data. The results showed no significant differences, indicating that the established model and its solution method can effectively produce the numerical values of cumulative soil infiltration and wetting front movement at different times in banded sand ditches. There was a significant increase in infiltration in homogeneous soil filled with banded sand ditches. The original soil texture, sand ditch spacing, sand ditch width and sand ditch depth all significantly impacted infiltration rate. Infiltration rate decreased with an increase in the original soil saturated hydraulic conductivity and sand ditch spacing, but increased with an increase in sand ditch width and depth. The soil-wetting front profile formed a U-shaped pattern with

收稿日期: 2023-09-06

修回日期: 2023-11-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“竖管滴灌节水控温理论研究及其在固沙植物幼苗保育中的应用”(51969013); 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室(西安理工大学)开放研究基金项目“带状砂沟模式下土壤增渗机理及入渗模型研究”(2020KFKT-6)

第一作者: 范严伟(1982—), 男(汉族), 山东省聊城市人, 博士, 副教授, 主要从事水土资源利用和节水灌溉技术研究。Email: fanyanwei24@163.com.

a lower front and a higher back. With time, the U-shaped side-wetting front gradually approached the intersection of the sand ditch, and the top plateau gradually disappeared. The original soil texture significantly impacted the migration distance of the wetting front, which increased with an increase in the original soil saturated hydraulic conductivity. Sand ditch depth significantly impacted the shape and distribution of the wetting front. With an increase in sand ditch depth, the U-shaped pattern stretched vertically, and the wetting depth on the left side increases significantly. The change in wetting depth on the right side was minimal. Sand soil texture, sand ditch spacing, and sand ditch width had relatively minor impacts on the migration distance of the wetting front. [Conclusion] Banded sand ditch structures can significantly improve soil infiltration capacity. Soil texture types and sand ditch structure parameters have different effects on soil cumulative infiltration and wetting front migration distance.

Keywords: banded sand ditch; enhancing water infiltration; wetting front; cumulative infiltration; HYDRUS-2D/3D

黄土高原地区光照充足,昼夜温差大,是世界上最大的苹果生产基地,然而该区地下水埋藏较深,加之灌溉水源有限,合理收集与利用雨水资源成为黄土高原林果业可持续发展的必然选择^[1-2]。黄土高原地区雨水收集利用历史悠久,积累了可操作的雨水收集利用技术,并建成了多种雨水储存设施,如雨水收集窖、雨水收集池等。这种收集与利用方式前期投资大,且占用部分林地,使得种植户积极性不高^[3-5]。为此,在降低投资成本的前提下,增加地表对雨水的消纳能力,进而提高根系层土壤含水量具有重要的现实意义^[6-8]。在单独降雨事件中,雨水就地消纳能力的提升依靠人为调控降雨强度是不现实的,只能通过增大土壤入渗速率来实现。影响土壤入渗速率的因素主要有土壤质地、土壤容重和土体构型等,其中土体构型对土壤入渗特性的影响最为显著^[9-10]。Abu-Zreig 等^[11-13]发现砂沟能够有效收集雨水,拦截径流,减少输沙量,延长暴雨峰值到达时间,提高作物产量;Widomski 等^[14-15]在奥尔赞卡的一个果园内评估了砂沟增渗效果,观察到配备填砂排水沟的梯田雨水资源会快速贮存在深层土壤中,其入渗率平均增加了 12.6%。由此可见,利用砂沟来提速雨水渗透和增加土壤水分储存是可行的,在降低投资成本的同时,达到了集雨增渗保水的目的,符合黄土高原林果区雨水资源化利用的客观实际。作为新发展的集雨技术,砂沟参数的组合与设计尚缺乏研究基础,系统开展不同砂沟技术参数组合下土壤水分运动规律是当务之急。试验观测是研究土壤水分运动规律的基本方法,但往往耗时费力;数值模拟可对不同参数组合下的土壤水分运动过程进行计算,是确定技术参数组合和结构优化设计的廉价方法^[16-17]。Wang 等^[18]利用 HYDRUS 软件,模拟分析了积水条件下具有粗砂夹层的细质地土壤的入渗特性,发现虽然粗砂的导水率高,但基质吸力低的粗砂夹层对土壤入渗有抑制作

用,而具有较高基质吸力的粗砂夹层对土壤入渗有促进作用。Xie Haowei 等^[19]构建了绿色屋顶的 HYDRUS 模型,评估了绿色屋顶对雨水径流的消纳作用。Saito 等^[20]通过室内试验证实了利用 HYDRUS 模型来模拟砂沟模式下土壤水分运动,评估砂沟的储水能力是可靠的。王社平等^[21]研究表明 HYDRUS-2D/3D 软件能够模拟设置土壤夹砂层的下凹式绿地中土壤水分的二维入渗过程。基于此,本文利用 HYDRUS-2D/3D 软件,建立砂沟土壤水分运动方程及定解条件并进行求解,通过试验资料验证模拟结果的可靠性。在此基础上,模拟研究不同影响因素(土壤质地、砂沟距、砂沟宽以及砂沟深)组合下带状砂沟入渗特性和湿润体运移规律,以为砂沟集雨工程设计、运行和管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 带状砂沟试验设计

本试验于 2023 年 4 月进行,室内试验的目的是验证 HYDRUS-2D/3D 模拟带状砂沟模式下土壤水分运动过程的可靠性。试验土样于 2023 年 3 月取自甘肃省白银市景泰县的壤土和细质砂土以及兰州市七里河区的粉土和粗质砂土,取土深度为 0—40 cm,经风干、碾压、均匀混合、过 2 mm 筛后备用。试验装置包括可调高度支架、土箱、供水系统和排水系统等 4 部分,其中,供水系统由蓄水桶、进水管、蠕动泵和出水管组成;排水系统由溢水管和量筒组成(如图 1 所示)。

土箱采用透明有机玻璃粘制而成,内部尺寸根据试验方案而定。本文共设计不同因素影响下的 4 组试验,设置 2 个原土质地(粉土、壤土),2 个砂土质地(细砂土、粗砂土),2 个砂沟间距(60, 80 cm),2 个砂沟宽(10, 14 cm)以及 2 个砂沟深(30, 40 cm),具体试验方案详见表 1。试验过程中,首先将所有土壤按 2%配初始含水量备用,再将备用的原始土壤按设计

容重(粉土 1.30 g/cm^3 , 壤土 1.40 g/cm^3)分层装入土箱, 为防止边壁土倒塌, 用薄金属板支撑原土, 随后立即将砂沟土壤按设计容重(细质砂土 1.60 g/cm^3 , 粗质砂土 1.70 g/cm^3)分层装入砂沟, 分层厚度均为 5 cm , 层间打毛, 装土完毕后将薄金属板抽出。为使土样初始水分分布均匀, 将装有土样的土箱静置 1 d 后开始试验。试验开始时, 迅速向土壤槽内用烧杯加水至预定的 2 cm 水头, 同时开启蠕动泵, 多余水量通过溢水管流出进入量筒。试验过程中记录不同时刻湿润锋位置和量筒水量。

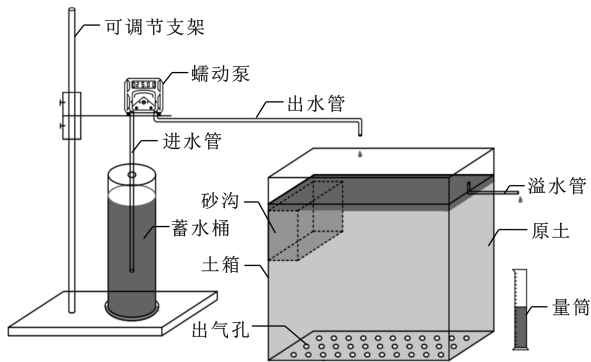


图 1 带状砂沟模式下土壤入渗试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of infiltration test device of banded sand ditches

表 1 带状砂沟模式下土壤入渗试验方案

Table 1 Test scheme of banded sand ditches infiltration

试验号	砂沟土壤	原始土壤	砂沟距/ cm	砂沟宽/ cm	砂沟深/ cm
T ₁	粗砂土	壤土	60	10	30
T ₂	粗砂土	粉土	80	10	30
T ₃	细砂土	壤土	80	10	40
T ₄	细砂土	粉土	60	14	40

1.2 数值模拟

1.2.1 基本方程 基于 HYDRUS-2D/3D 模型, 建立带状砂沟模式下土壤水分运动 Richard 方程^[22]。方程描述为:

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

式中: θ 为土壤体积含水率 (cm^3/cm^3); t 为时间 (min); $K(h)$ 为土壤非饱和导水率 (cm/min); h 为土壤压力水头 (cm); x 为水平坐标 (cm); z 为垂向坐标 (cm), 定义 z 向上为正。

土壤水力特性用 van Genuchten-Mualem^[23-24] 本构关系描述。其表达形式为:

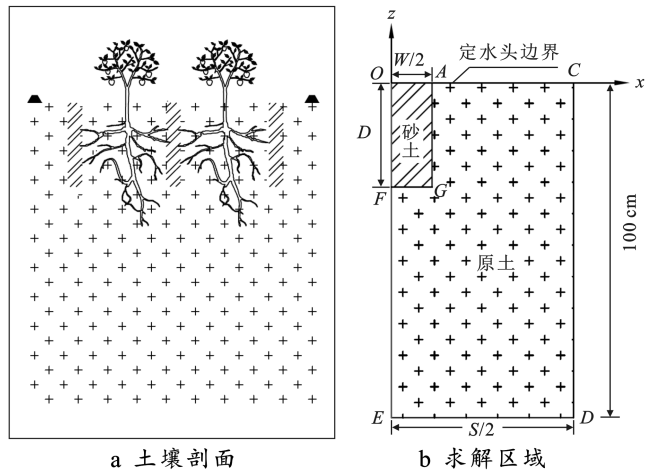
$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |ah|)^n} & (h < 0) \\ \theta_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (3)$$

$$\left[S_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{\theta_s - \theta_r}, m = 1 - \frac{1}{n}, n > 1 \right]$$

式中: θ_r 为土壤残余体积含水率 (cm^3/cm^3); θ_s 为土壤饱和体积含水率 (cm^3/cm^3); a, n, m 为和土壤物理特性有关的参数, a 单位为 (cm^{-1}); h 为土壤压力水头 (cm); $K(h)$ 为土壤非饱和导水率 (cm/min); K_s 为土壤饱和导水率 (cm/min)。

1.2.2 定解条件 带状砂沟模式下的土壤剖面构型如图 2a 所示。相同宽度和深度的砂沟按照同一间距平行排列, 属于轴对称的二维平面问题。考虑砂沟的对称性, 模拟计算区域选为 $1/2$ 砂沟控制面积部分 (如图 2b 所示)。模拟开始时砂土和原土的基质势均为初始基质势。因大多数时间内雨水不能及时下渗所以会在土壤上边界存在一层薄积水, 所以计算域上边界条件按照定水头设置, 高度为 $h = 2 \text{ cm}$; 下边界不受地下水和降雨的影响, 设置成自由排水边界; 砂土和原土的接触边界不受外界影响, 按自由边界设置; 左右两边界为零通量边界。



a 土壤剖面

b 求解区域

注: W 为砂沟宽 (cm); H 为砂沟深 (cm); S 为砂沟距 (cm)。

图 2 带状砂沟模式下土壤剖面及求解区域示意图

Fig.2 Schematic diagram of soil profile and solution area under banded sand ditches mode

1.2.3 数值求解方法 求解过程中, 采用 Galerkin 有限元法对土壤剖面进行空间离散, 采用隐式差分格式进行时间离散。模拟土层深度为 100 cm , 时间步长为 0.1 min , 空间步长为 1 cm , 模拟历时 180 min 。试验土壤水分特征曲线采用离心机法测定, 饱和导水率采用定水头法测定, 并通过 van Genuchten-Mualem 模型参数体现, 结果详见表 2。

1.3 误差统计分析

利用均方根误差 (RMSE) 以及纳什效率系数 (NSE) 对累积入渗量的实测值和模拟值进行评价, 统计方程为:

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2 \right]^{0.5} \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (6)$$

式中:RMSE 为均方根误差;NSE 为纳什效率系数; M_i 为第 i 个实测值; S_i 第 i 个模拟值; \bar{M} 为实测值的平均值; n 为数据总个数。RMSE 值越接近 0,

NSE 值越靠近 1,表明模拟值与实测值差异越小,两者吻合越好^[25]。

1.4 模拟方案

在试验验证数学模型及其求解方法可靠性的基础上,模拟分析 6 种土壤质地组合下砂沟距(S)、砂沟宽(W)和砂沟深(H)对带状砂沟模式土壤湿润锋和累积入渗量的影响,其中 6 种土壤质地的 van Genuchten-Mualem 模型参数列于表 3。

表 2 试验土壤 van Genuchten-Mualem 模型参数

Table 2 Van Genuchten-Mualem model parameters of test soil

土壤质地	$\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha / (\text{cm}^{-1})$	n	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	$\gamma / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
细砂土	0.029	0.294	0.010 0	1.945	0.070 0	1.6
粗砂土	0.010	0.434	0.021 8	5.937	0.218 0	1.7
粉土	0.064	0.471	0.013 0	1.341	0.003 8	1.3
壤土	0.060	0.456	0.008 0	1.500	0.036 7	1.4

表 3 6 种典型土壤的 van Genuchten-Mualem 模型参数^[26-29]

Table 3 Van Genuchten-Mualem model parameters for six typical soil types

土壤质地	缩写	$\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha / (\text{cm}^{-1})$	n	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$
粉土*	SM	0.095	0.410	0.019	1.31	0.004 2
粉壤土*	SLM	0.067	0.450	0.020	1.41	0.007 5
壤土*	LM	0.078	0.430	0.036	1.56	0.017 3
细砂土**	SD ₁	0.007	0.372	0.059	2.32	0.324 0
中砂土***	SD ₂	0.045	0.430	0.145	2.68	0.495 0
粗砂土****	SD ₃	0.080	0.455	0.015	1.45	0.750 0

参考田间砂沟布设实际^[11-12,15],本文采用单因素分析法,设置 3 个原土质地(粉土、粉壤土、壤土),3 个砂土质地(细砂土、中砂土、粗砂土),3 个砂沟距(60,80,100 cm),3 个砂沟宽(10,14,18 cm)和 3 个砂沟深(30,40,50 cm)。将中砂土、粉壤土、 $S=80$ cm, $W=14$ cm 和 $H=40$ cm 作为对照组,设计不同影响因素组合下模拟方案,共计 11 组,具体详见表 4。

表 4 带状砂沟 Hydrus 模拟方案

Table 4 Hydrus simulation scheme for banded sand ditches

处理编号	原土	砂土	S/cm	W/cm	H/cm
处理 1	SM	SD ₂	80	14	40
处理 2	SLM	SD ₂	80	14	40
处理 3	LM	SD ₂	80	14	40
处理 4	SLM	SD ₁	80	14	40
处理 5	SLM	SD ₃	80	14	40
处理 6	SLM	SD ₂	60	14	40
处理 7	SLM	SD ₂	100	14	40
处理 8	SLM	SD ₂	80	10	40
处理 9	SLM	SD ₂	80	18	40
处理 10	SLM	SD ₂	80	14	30
处理 11	SM	SD ₂	80	14	50

2 结果与分析

2.1 数值模拟结果可靠性评价

2.1.1 累积入渗量模拟值与实测值对比 整理不同时刻(5,10,30,60,90,120 min)土壤累积入渗量实测值和模拟值,绘制土壤累积入渗量变化曲线,如图 3 所示。由图 3 可见,不同时刻土壤累积入渗量模拟值与实测值变化规律基本一致,均随着时间的增大而逐渐增大;4 个处理相同时刻土壤累积入渗量模拟值与实测值基本吻合。误差统计指标 RMSE 数值介于 0.215 ~ 0.486 cm 之间,NSE 数值靠近于 1(≥ 0.961),进一步利用 t 检验计算得到 p 值(0.236, 0.959, 0.172, 0.062)均大于 0.05,说明模拟结果与实测数据无显著性差异且一致性良好,表明所建模型及其求解方法能够有效获取带状砂沟模式下土壤累积入渗量数值。

2.1.2 湿润锋模拟值与实测值对比 对表 1 中 4 组试验方案进行数值模拟,整理 4 个典型时刻(10,30,60,120 min)土壤湿润锋运移实测值和模拟值,绘制土壤湿润锋运移曲线对比图,如图 4 所示。由图 4 可

见,数值模拟所得的土壤湿润锋运移规律与土箱试验基本一致,均随时间的增大而逐渐下移;各处理下相同时刻土壤湿润锋曲线模拟值与实测值基本吻合。在每条湿润锋上水平向从 0 开始,每间隔 5 cm 选取一点(圆圈点)计算 RMSE 和 NSE 值, RMSE 数值介于 0.509~1.196 cm 之间, NSE 数值靠近于 1 (≥ 0.992), 进一步利用 t 检验计算得到 p 值 (0.726, 0.465, 0.812, 0.369) 均大于 0.05, 说明模拟结果与实测数据无显著性差异且一致性良好, 表明利用所建模型及其求解方法模拟带状砂沟模式下土壤湿润锋运移过程是可行的。

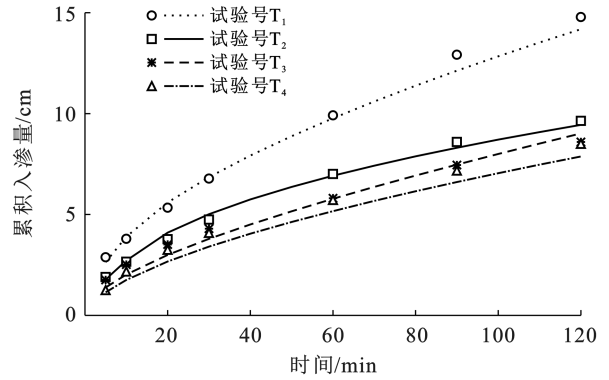


图 3 累积入渗量实测值与模拟值对比
Fig.3 Comparison between measured and simulated cumulative infiltration

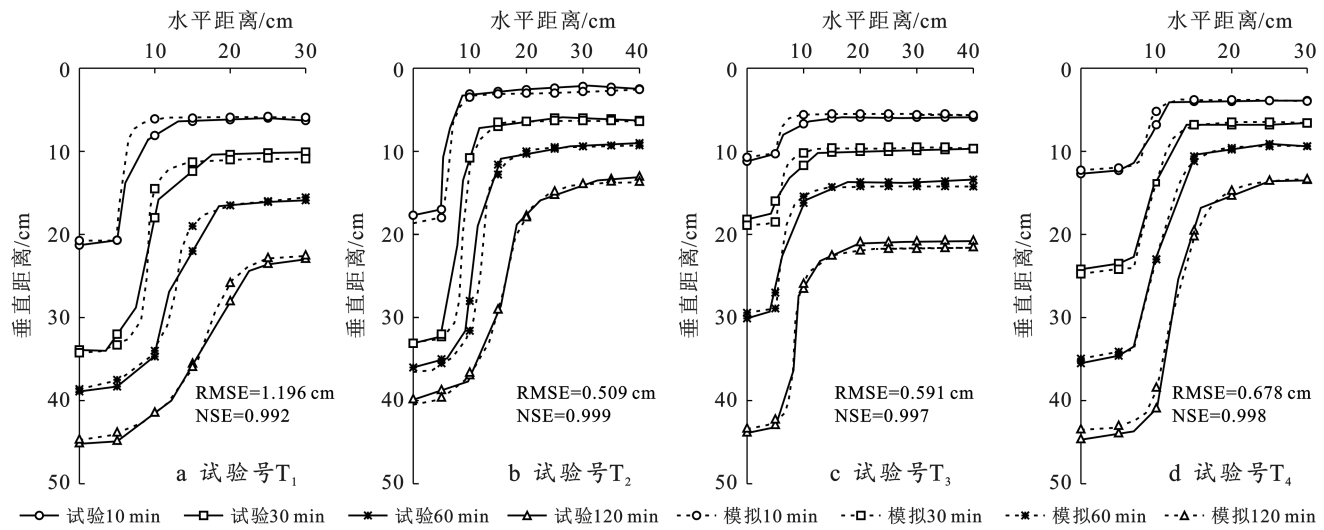


图 4 不同时刻土壤湿润锋运移曲线模拟值与实测值对比

Fig.4 Comparison between simulated and measured values of soil wetting front migration curve at different times

2.2 不同影响因素对累积入渗量影响

选取表 4 中 11 组处理的土壤累积入渗量模拟数据进行整理,并模拟获得无砂沟条件下 3 种原土质地的土壤累积入渗量,采用单因素分析法,绘制不同影响因素下土壤累积入渗量变化规律图,结果如图 5 所示。

由图 5 可见,相对而言,原土质地、砂沟距、砂沟宽和砂沟深均对增渗率有较大影响,而砂土质地的变化对增渗率的影响较小。同一时刻,随原土饱和导水率的增大,累积入渗量随之增大,但增渗效果却随之减小,增渗率表现为:壤土 < 粉壤土 < 粉土。如模拟结束时,未设置砂沟的壤土、粉壤土和粉土累积入渗量分别为 6.6, 3.6 和 2.5 cm, 设置砂沟后,壤土、粉壤土和粉土累积入渗量分别增长为 16.0, 10.9 和 8.8 cm, 3 种土壤(壤土、粉壤土和粉土)同比增渗了 142%, 203% 和 252%。无土沟模式下壤土、粉壤土和粉土累积入渗量分别为 23.8, 16.8 和 13.9 cm, 相较

于无砂沟模式,无土沟模式 3 种土壤同比增渗了 261%, 367% 和 456%。由此可见,无土沟的增渗效果更为显著。对比分析发现,在入渗前 30 min,砂沟内砂土质地越粗,其累积入渗量越大,增渗效果越明显,但 30 min 后填充中砂土的土体累积入渗量超过填充粗砂土的土体累积入渗量,增渗率表现为:细砂土 < 粗砂土 < 中砂土。增渗率与砂沟距呈负相关关系,表现出砂沟距越大增渗率越小的规律。模拟结束时刻填充为中砂土的粉壤土比无砂沟粉壤土, 3 种砂沟距 (60, 80, 100 cm) 同比增渗了 269%, 203%, 164%。增渗率与砂沟宽呈正相关关系,表现出砂沟越宽增渗率越大的规律。模拟结束时刻填充为中砂土的粉壤土比无砂沟粉壤土, 3 种砂沟宽 (10, 14, 18 cm) 同比增渗了 169%, 203%, 233%。增渗率与砂沟深呈正相关关系,入渗初期,湿润锋未穿过砂沟,砂沟深对累积入渗量无影响,随着时间的推移,砂沟越浅,曲线越早趋于平缓,而随着砂沟深的增加,累积

入渗量随之增大,对原土的增渗效果越大,表现出砂沟越深增渗率越大的规律。模拟结束时刻填充为中

砂土的粉壤土比无砂沟粉壤土,3种砂沟深(30,40,50 cm)同比增渗了147%,203%,256%。

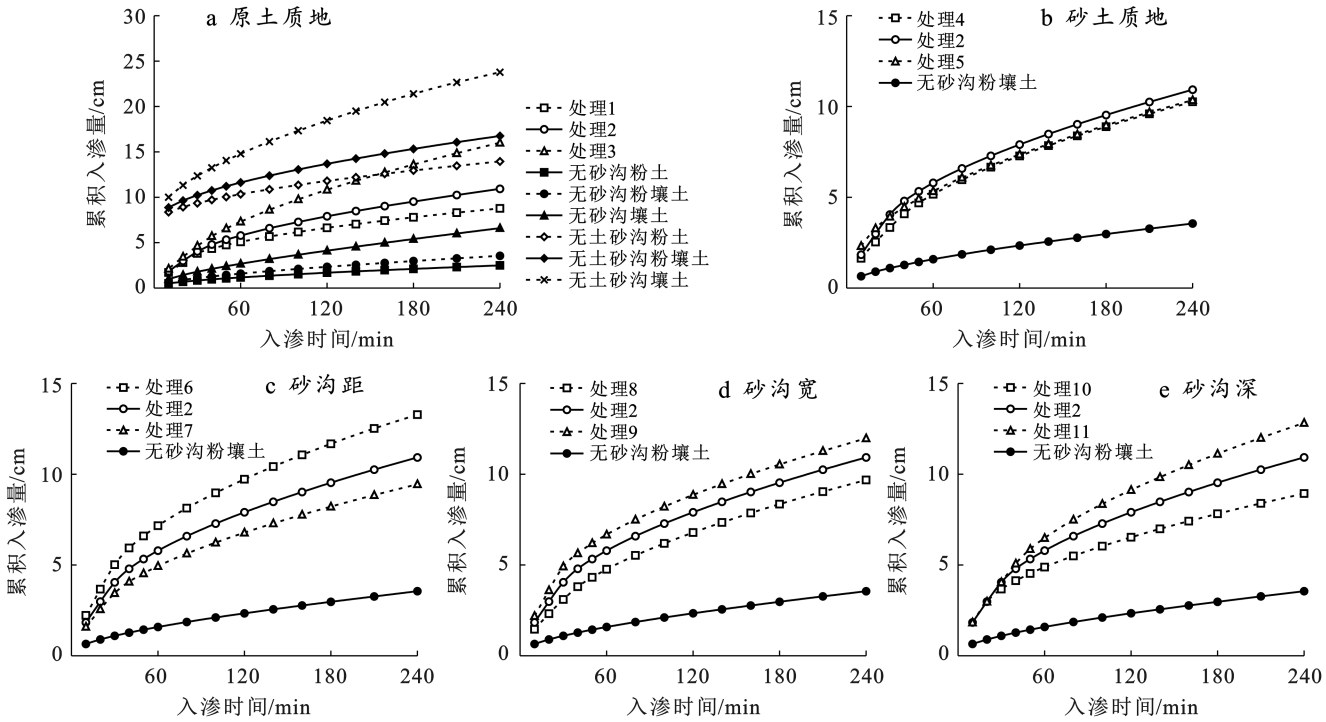


图 5 不同影响因素下土壤累积入渗量变化过程

Fig.5 Changing process of soil cumulative infiltration under different influencing factors

2.3 不同影响因素对湿润锋影响

为对比分析原土质地、砂土质地、砂沟宽、砂沟深以及砂沟距对土壤湿润锋的影响,对表 4 中不同因素组合下土壤水分运动进行模拟。

2.3.1 原土质地对湿润锋运移的影响 选取表 4 中处理 1,2,3 的模拟数据进行整理,绘制 3 种带砂沟原土质地土壤湿润锋运移过程图(如图 6 所示)。由图 6 可知,入渗初期,砂沟内湿润锋运移较快,湿润深度远大于原土湿润深度,湿润锋轮廓呈下低上高的 U 形;

随着时间的延长,湿润体逐渐下移增大,U 形侧边湿润锋逐渐靠近相邻砂沟交汇(中轴)面,顶部平台逐渐消失。进一步地,相同时刻,3 种原土质地土壤湿润体体积差异较大,表现为:粉土<粉壤土<壤土,模拟结束(240 min)时,粉土左右两侧湿润深度分别达 59.1,12.8 cm,粉壤土左右两侧湿润深度分别比粉土增加了 8.6%和 39.6%,而壤土左右两侧湿润深度分别比粉土增加了 18.6%和 138.2%,显然地,壤土湿润范围最大,粉壤土次之,粉土最小。

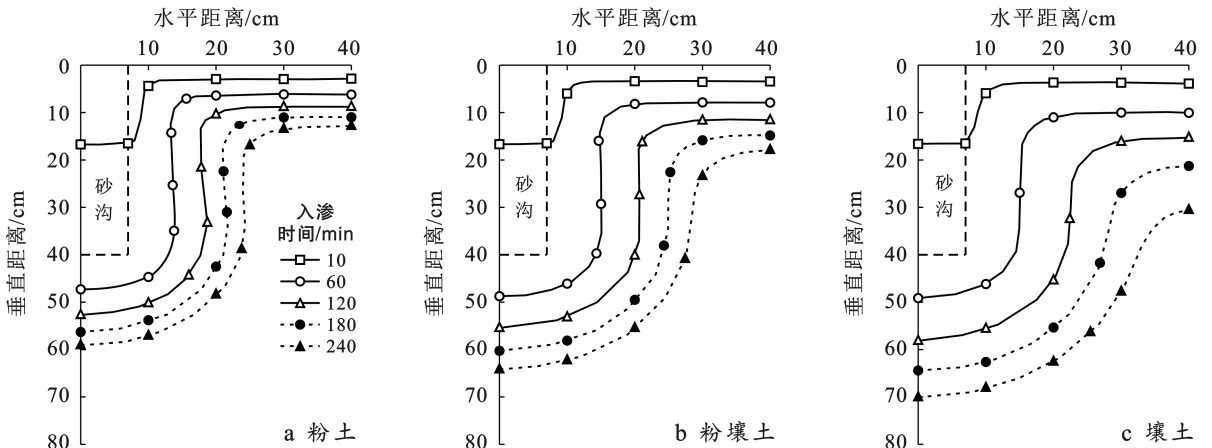


图 6 3 种原土质地土壤湿润锋动态变化过程

Fig.6 Dynamic process of soil wetting front for three types of primitive soil textures

2.3.2 砂土质地对湿润锋运移距离的影响 选取表 4 中处理 4, 2, 5 的模拟数据进行整理, 绘制 3 种砂土质地土壤湿润锋运移过程图(如图 7 所示)。由图 7 可见, 砂土质地对湿润锋的影响主要表现在入渗初期的砂沟内部, 砂土质地越粗, 砂沟内湿润锋运移越快, 如 $t=10$ min 时, 粗砂土湿润锋已到达砂沟底部

(40 cm), 而细砂土和中砂土仅运移了 12.5 和 16.7 cm。当湿润锋穿过砂沟底部后, 相同时刻, 3 种砂土质地土壤湿润深度差异主要体现在湿润锋左侧, 表现为: 细砂土 < 中砂土 < 粗砂土, 但三者差异较小, 如模拟结束时, 中砂土和粗砂土左侧湿润深度仅比细砂土左侧湿润深度(62.6 cm)增加了 2.6% 和 3.2%。

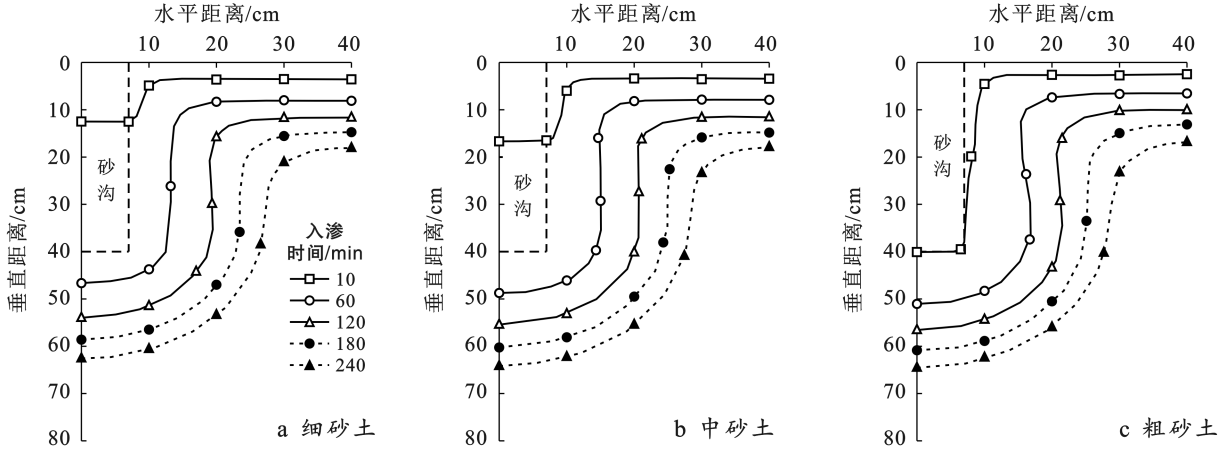


图 7 3 种砂土质地土壤湿润锋动态变化过程

Fig.7 Dynamic process of soil wetting front for three types of sandy soil textures

2.3.3 砂沟距对湿润锋运移距离的影响 选取表 4 中处理 6, 2, 7 的模拟数据进行整理, 绘制 3 种砂沟距土壤湿润锋运移过程图(如图 8 所示)。由图 8 可见, 0~180 min 时段, 砂沟距对湿润锋的形态和分布影响较小, 处理 2 和处理 6 近似为处理 7 中砂沟交面向左平移 10, 20 cm 所得。180~240 min 时段, 砂

沟距对湿润锋的影响主要表现在砂沟交汇面, 砂沟距越小, 交汇面处湿润深度越大, 如 $t=240$ min 时, 砂沟距为 100 cm 的交汇面湿润深度为 17.8 cm, 砂沟距为 80 cm 的交汇面湿润深度变化不大, 增加了 0.1 cm, 而砂沟距为 60 cm 的交汇面湿润深度已达 33.8 cm。

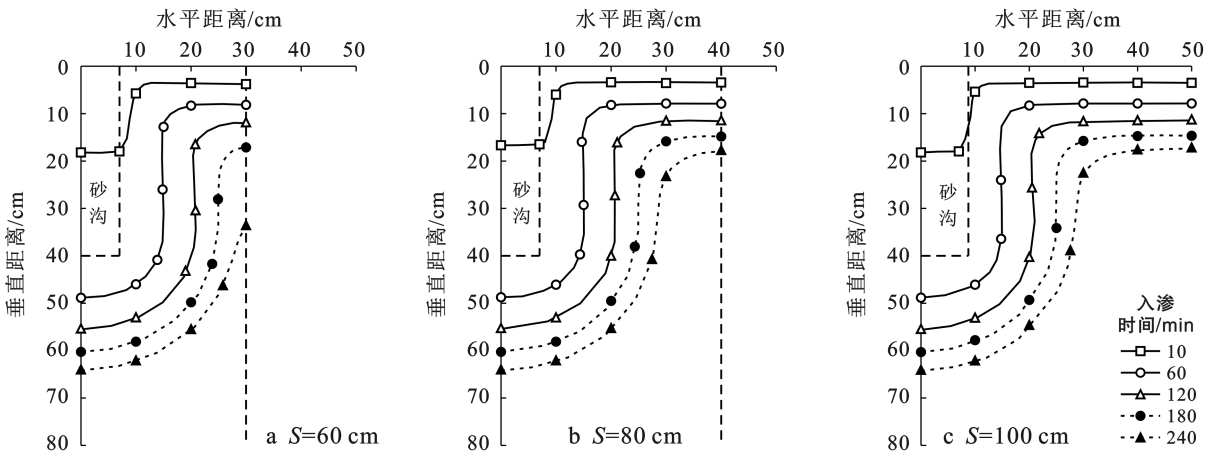


图 8 3 种砂沟距(S)土壤湿润锋动态变化过程

Fig.8 Dynamic process of soil wetting front for three types of distances of sand-ditch

2.3.4 砂沟宽对湿润锋运移距离的影响 选取表 4 中处理 8, 2, 9 的模拟数据进行整理, 绘制 3 种砂沟宽土壤湿润锋运移过程图(如图 9 所示)。由图 9 可见, 砂沟宽对湿润锋的形态和分布影响较小, 随着砂沟宽度的增大, 相同时刻湿润锋运移距离略有增大。如模拟

结束时, $W=10$ cm 的湿润深度左右两侧分别为 62, 17.6 cm, $W=14$ cm 的湿润深度左右两侧达到 64.2 和 17.9 cm, 比 $W=10$ cm 分别增加了 2.2, 0.3 cm, 而 $W=18$ cm 的湿润深度左侧比 $W=10$ cm 增加了 3.6 cm, 右侧增加了 0.9 cm, 左右两侧湿润深度分别为 65.6, 18.5 cm。

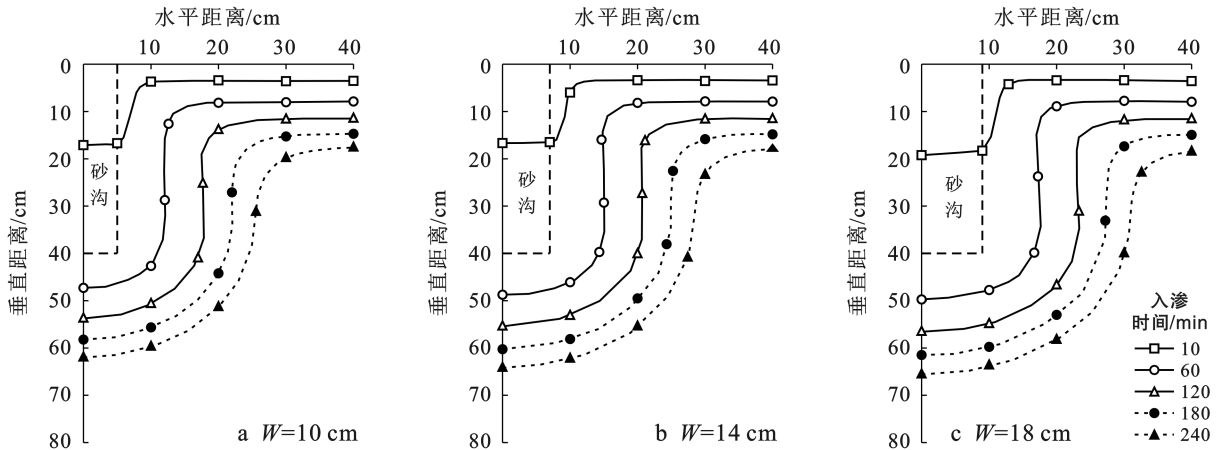


图 9 3 种砂沟宽(W)土壤湿润锋动态变化过程

Fig.9 Dynamic process of soil wetting front for three types of widths of sand-ditch

2.3.5 砂沟深对湿润锋运移距离的影响 选取表 4 中处理 10,处理 2,处理 11 的模拟数据进行整理,绘制 3 种砂沟深度土壤湿润锋运移过程图,结果如图 10 所示。

由图 10 可知,砂沟深对湿润锋的形态和分布影响较大,随着砂沟深度的增大,U 字体型进一步垂向

拉伸,相同时刻左侧湿润深度显著增大,右侧湿润深度变化微弱。如模拟结束时, $H=30\text{ cm}$ 的左侧湿润深度达到 53.2 cm,在 $H=40$ 和 50 cm 情况下,其左侧湿润深度比 $H=30\text{ cm}$ 的左侧湿润深度分别增加了 11.0 和 21.4 cm,达到 64.2 和 74.6 cm,而右侧湿润深度三者基本没有显著变化。

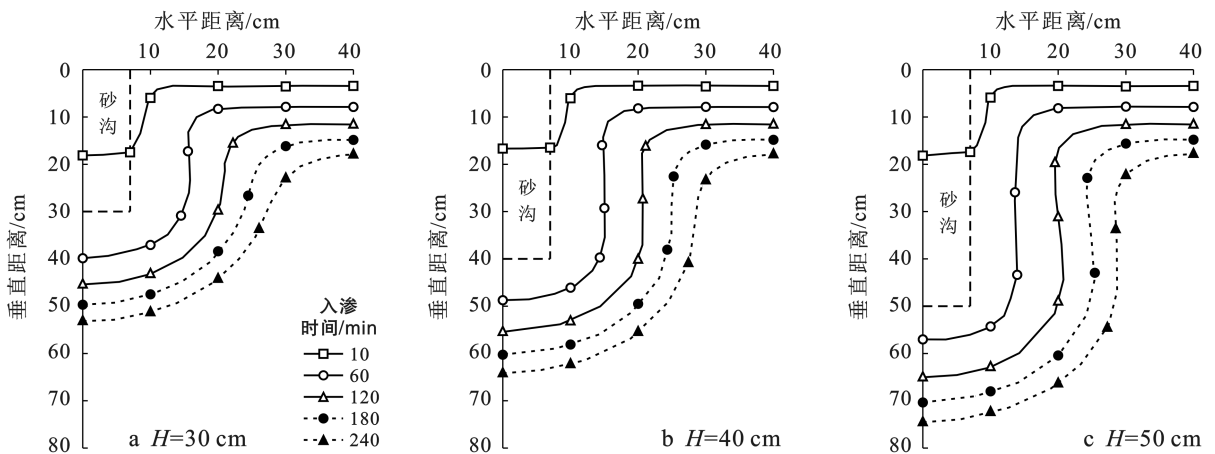


图 10 3 种砂沟深(H)土壤湿润锋动态变化过程

Fig.10 Dynamic process of soil wetting front for three types of depths of sand-ditch

3 讨论

相比于无砂沟原始土壤,无土沟或砂沟的设置均会对土体产生增渗效应,无土沟的增渗原理主要在于沟提供的渗水界面(沟底和沟坡)增大以及沟所提供的储水空间所致,砂沟的增渗原理主要在于砂质土壤的快速导水功能以及砂沟所提供的储水空间(饱和含水量-初始含水量)所致,在砂沟储水完毕后,其沟底和沟坡也相当于渗水界面,但因为有砂土的加持,渗水界面各点压力水头均小于无土沟,剔除无土沟和砂沟储水空间的差异,砂沟增渗效果略低于无土沟,说

明砂沟的增渗功能主要来自于沟的作用,这在图 5B 砂土质地对增渗影响较小也能体现。需要说明的是,无土沟增渗效果虽优于砂沟,但未采用此模式,而是将沟中填充了砂质土壤,主要是基于沟坡坍塌导致重复开沟和田间地块平整性方面的考虑。

增渗率随原土饱和导水率和砂沟距的增大而减小,随砂沟宽和砂沟深的增大而增大。究其原因是原土饱和导水率越大,其与砂土饱和导水率的差值越小,砂沟对原土的增渗功能越弱;另外,砂沟距的增大大间接减少了土体剖面砂沟所占比重(W/S),进而削弱了砂沟的增渗作用;砂沟宽和砂沟深均属于砂沟储水

空间和渗水边界,其数值越大代表储水空间和渗水面积越大,增渗效果越明显;砂沟内砂土质地对增渗率影响较小,这是因为砂沟储水空间被水充满后,其渗水界面(砂沟底和砂沟边)无差异所致,其差异主要体现在砂沟储水空间上的差别。

湿润锋运移距离随原土饱和导水率的增大而增大,原因是入渗开始后,水分同时向砂土和原土中运动,由于砂土饱和导水率大,水分很快将砂土饱和,导致砂沟底部和侧边成为渗水界面,出现原土饱和导水率越大,渗透能力越强,湿润锋运移速率越大的现象;湿润锋运移距离随砂土饱和导水率的增大而略有增大,且体现在湿润锋左侧,原因是砂土饱和导水率越大,水分在砂沟内运移得越快,更容易到达砂沟底部,从而影响到原土湿润锋运移距离;湿润锋运移距离随砂沟深的增大而增大,这是因为砂沟越深,湿润锋在砂沟内运移地越远,砂沟湿润距离所占比重越大,到时整体运移距离越大;湿润锋运移距离随砂沟宽的增大而略有增大,这是因为砂沟越宽,砂沟内水量越充足,无论是下渗还是侧渗均会有所增加;相对而言,砂沟距对湿润锋运移距离影响较小,主要体现在湿润锋右侧,U型侧边湿润锋未到达交汇面时,近似于交汇面的向左平移,到达交汇面时,因水量的叠加,交汇面湿润锋下移加快。

4 结论

(1) 均质土壤填充带状砂沟存在明显的增渗效应,入渗历时越长,增渗效果越明显;原土质地、砂沟距、砂沟宽和砂沟深均对增渗率有较大影响,增渗率随原土饱和导水率和砂沟距的增大而减小,随砂沟宽和砂沟深的增大而增大。

(2) 带状砂沟模式下湿润锋轮廓呈下低上高的U形,随着时间的延长,U形侧边湿润锋逐渐靠近相邻砂沟交汇面,顶部平台逐渐消失。原土质地对湿润锋运移距离影响较大,湿润体随原土饱和导水率的增大而增大;砂土质地对湿润锋运移距离影响较小,主要体现在入渗初期的砂沟内部,砂土饱和导水率,砂沟内湿润锋运移越快;砂沟距对湿润锋的形态和分布影响较小,砂沟距小的湿润锋轮廓近似为砂沟距大的将交汇面向砂沟侧平移所得;砂沟宽对湿润锋运移距离影响较小,湿润体随砂沟宽的增大而略有增大;砂沟深对湿润锋的形态和分布影响较大,随着砂沟深度的增大,U形进一步垂向拉伸,相同时刻左侧湿润深度显著增大,右侧湿润深度变化微弱。

需要说明的是本文在模拟过程中仅分析了5种主要影响因素,在后期的研究中应考虑降雨强度、土

壤容重、初始含水率等因素对带状砂沟土体入渗过程的影响,以达到描述更精准的目的。

参考文献 (References)

- [1] 刘锦月, 巩铁雄, 乔江波, 等. 近期气候变化对黄土高原苹果产区分布格局的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 153-158.
Liu Jinyue, Gong Tiexiong, Qiao Jiangbo, et al. Effects of recent climate change on distribution pattern of apple production areas in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 153-158.
- [2] 温慧娴, 赵西宁, 高飞. 黄土高原不同降水量区苹果园土壤干燥化效应及生产水足迹模拟[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1927-1936.
Wen Huixian, Zhao Xining, Gao Fei. Simulation of soil desiccation effects and production water footprint of apple orchards in different precipitation areas of the Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 1927-1936.
- [3] Fan Yanwei, Zhu Chunyan, Bai Guilin, et al. Numerical simulation of soil water movement by gravity subsurface hole irrigation [J]. Water Supply, 2022, 22(7): 6389-6404.
- [4] 赵西宁, 吴普特, 冯浩, 等. 黄土高原半干旱区集雨补灌生态农业研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3187-3194.
Zhao Xining, Wu Pute, Feng Hao, et al. Advance in research of supplemental irrigation of collected rain water for eco-agriculture in semi-arid Loess Plateau of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(9): 3187-3194.
- [5] Bhatnagar P, Srivastava R. Gravity-fed drip irrigation system for hilly terraces of the Northwest Himalayas [J]. Irrigation Science, 2003, 21(4): 151-157.
- [6] 张惠茹, 许航, 宋健峰. 西北地区农业灌溉用水反弹的影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(8): 129-135.
Zhang Huiru, Xu Hang, Song Jianfeng. What caused the irrigation water use rebound in Northwest China? [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(8): 129-135.
- [7] 陶虎, 张少英, 万冰清, 等. 湿陷性黄土地区一种雨水收集装置: 埋深对变形影响的试验研究[J]. 水利学报, 2019, 50(7): 894-902.
Tao Hu, Zhang Shaoying, Wan Bingqing, et al. Experimental study on the effect of buried depth of a rainwater collecting device on deformation in collapsible loess area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(7): 894-902.
- [8] 吴晨, 李发文, 冯平, 等. 设施农业雨水集蓄利用与番茄灌溉方案优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 153-162.
Wu Chen, Li Fawen, Feng Ping, et al. Rainwater harvesting and tomato irrigation schemes optimization for facilities agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering, 2021,37(21):153-162.
- [9] 梁磊,孙浩田,徐高明,等.田间原位试验分析长期机械作业下稻麦轮作地块土壤入渗性能[J].农业工程学报, 2023,39(7):110-118.
- Liang Lei, Sun Haotian, Xu Gaoming, et al. Soil infiltration of rice-wheat rotation field under long-term mechanical treatment based on field in situ experiments [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(7):110-118.
- [10] 马雪燕,穆兴民,王双银,等.黄土丘陵区不同植被恢复对土壤入渗影响及适宜模型研究[J].水土保持学报, 2023,37(2):67-75.
- Ma Xueyan, Mu Xingmin, Wang Shuangyin, et al. Study on the effects of different vegetation restoration on soil infiltration and suitable models in the loess hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(2):67-75.
- [11] Abu-Zreig M, Attom M, Hamasha N. Rainfall harvesting using sand ditches in Jordan [J]. Agricultural Water Management, 2000,46(2):183-192.
- [12] Abu-Zreig M, Tamimi A. Field evaluation of sand-ditch water harvesting technique in Jordan [J]. Agricultural Water Management, 2011,98(8):1291-1296.
- [13] Abu-Zreig M, Fujimaki H, Abd Elbasit M A. Enhancing water infiltration through heavy soils with sand-ditch technique [J]. Water, 2020,12(5):1312-1326.
- [14] 赵伟霞,张振华,蔡焕杰,等.砂沟滴灌技术参数模型[J].水科学进展,2009,20(6):845-850.
- Zhao Weixia, Zhang Zhenhua, Cai Huanjie, et al. Model for estimating technical parameters of sand furrow irrigation [J]. Advances in Water Science, 2009,20(6):845-850.
- [15] Widomski M K, Sobczuk H, Olszta W. Sand-filled drainage ditches for erosion control: effects on infiltration efficiency [J]. Soil Science Society of America Journal, 2010,74(1):213-220.
- [16] 冀荣华,王婷婷,祁力钧,等.基于 HYDRUS-2 D 的负压灌溉土壤水分入渗数值模拟[J].农业机械学报,2015,46(4):113-119.
- Ji Ronghua, Wang Tingting, Qi Lijun, et al. Numerical simulation of soil moisture infiltration under negative pressure irrigation based on HYDRUS-2D [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(4):113-119.
- [17] 范严伟,杨志伟,胡五龙.均质土微润灌溉湿润体模型构建及验证[J].农业工程学报,2020,36(13):83-91.
- Fan Yanwei, Yang Zhiwei, Hu Wulong. Establishment and validation of wetting pattern model of moistube irrigation in homogeneous soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(13):83-91.
- [18] Wang Chunying, Mao Xiaomin, Hatano R. Modeling ponded infiltration in fine textured soils with coarse interlayer [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014,78(3):745-753.
- [19] Xie Haowen, Wu Yawen, Wang Luping, et al. Comparing simulations of green roof hydrological processes by SWMM and HYDRUS-1D [J]. Water Supply, 2019,20(1):130-139.
- [20] Saito T, Yasuda H, Fujimaki H, et al. Numerical calculation of soil water movement in a water harvesting system with sand ditches using HYDRUS-2D [J]. Journal of Arid Land Studies, 2012,22(1):215-218.
- [21] 王社平,王子健,张志强,等.下凹式绿地中垂直土壤夹砂层的侧向防渗效果研究[J].中国给水排水,2021,37(9):116-121.
- Wang Sheping, Wang Zijian, Zhang Zhiqiang, et al. Lateral anti-seepage effect of vertical soil sand layer in sunken lawn [J]. China Water & Wastewater, 2021,37(9):116-121.
- [22] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums [J]. Physics, 1931,1(5):318-333.
- [23] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [J]. Water Resources Research, 1976,12(3):513-522.
- [24] 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.
- [25] Moriasi D N, Arnold J G, van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the Asabe, 2007,50(3):885-900.
- [26] Carsel R F, Parrish R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics [J]. Water Resources Research, 1988,24(5):755-769.
- [27] Young M H, Karagunduz A, Šimvnek J, et al. A modified upward infiltration method for characterizing soil hydraulic properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002,66(1):57-64.
- [28] 范严伟,黄宁,马孝义,等.应用 HYDRUS-1D 模拟砂质夹层土壤入渗特性[J].土壤,2016,48(1):193-200.
- Fan Yanwei, Huang Ning, Ma Xiaoyi, et al. Simulation of infiltration characteristics in soil with sand interlayer using HYDRUS-1D [J]. Soils, 2016,48(1):193-200.
- [29] Li Jiak, Zhao Ruisong, Li Yajiao, et al. Modeling the effects of parameter optimization on three bioretention tanks using the HYDRUS-1D model [J]. Journal of Environmental Management, 2018,217:38-46.