

# 不同初始含水率下风沙土地下渗灌水分运移特性研究

马宏秀<sup>1</sup>, 孙权<sup>1\*</sup>, 鲁海涛<sup>1</sup>, 马文礼<sup>2</sup>, 蒋鹏<sup>1</sup>, 张晓娟<sup>1</sup>, 蔡焱红<sup>2</sup>, 贾登成<sup>3</sup>  
(1.宁夏大学农学院, 银川 750021; 2.宁夏农垦农林牧技术推广服务中心, 银川 750011; 3.宁夏农垦国营简泉农场, 宁夏石嘴山 753299)

**摘要:**【目的】探究风沙土埋设新型地下渗灌系统后土体水分运移规律, 明确地下渗灌管适宜的埋设间距和埋土深度。【方法】运用室外土箱模拟试验, 监测了不同初始含水率(5.1%、11.5%、16.8%)湿润体承压后土壤水分入渗趋势和再分布规律, 并运用数学模型对入渗过程进行了拟合。【结果】地下渗灌下湿润体形状近似以渗灌管为中心的椭圆状, 同一时段初始含水率越大, 湿润锋运移速率越快, 累计入渗量和入渗速率越小, 累积入渗量和入渗时间呈幂函数关系, 而入渗指数则随初始含水率的增大而增大; 与Kostiakov模型( $R^2$ 为0.783)、Philip模型( $R^2$ 为0.785)和通用经验模型( $R^2$ 为0.923)相比, Horton模型( $R^2$ 为0.943)对不同初始含水率下风沙土入渗过程拟合效果较好, 该模型更适用于描述地下渗灌风沙土的水分入渗过程; 初始含水率为5.1%、11.5%、16.8%条件下, 渗灌管适宜埋深应分别小于10、20、30 cm, 管间距应分别小于30、60、90 cm, 【结论】综上所述可知, 风沙土湿度越大, 渗灌管埋深越深, 管间距可相应增大。

**关键词:** 风沙土; 地下渗灌; 入渗特性; 初始含水率

中图分类号: S275.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023039

OSID:



马宏秀, 孙权, 鲁海涛, 等. 不同初始含水率下风沙土地下渗灌水分运移特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(7): 52-59.

MA Hongxiu, SUN Quan, LU Haitao, et al. Impact of Initial Soil Water Content on Infiltration of Irrigation Water in Aeolian Sandy Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(7): 52-59.

## 0 引言

【研究意义】西北地区虽然光热资源丰富, 农业生产潜力巨大, 但因缺水且缺乏养分, 仅在有水灌溉的区域零星分布着绿洲农业区。地下渗灌是一种地下微灌形式, 是指在低液条件下, 使灌溉水(含可溶性养分)通过埋设在每株作物根系范围内的渗水管道, 其管壁上分布有均匀的微孔, 水分由内向外呈汗状渗出, 以滴渗方式湿润作物根系层周围土壤, 即直接向每株作物根系适时适量地供水、供养的一种节水增产的灌溉技术方法<sup>[1]</sup>。该技术比地表滴灌更进一步减少了水分蒸发与肥料运移的损失, 达到良好的节水、节肥效果, 从而对干旱半干旱地区水肥资源的高效利用更具有现实意义。

【研究进展】土壤入渗是土壤水分的形成、转化与消耗的动态变化过程<sup>[2]</sup>, 涉及土壤水分再分布、蒸发以及离子迁移等多方面<sup>[3]</sup>。土壤水分入渗受土壤体积分质量、孔隙度等影响较大<sup>[4-5]</sup>, 其中, 土壤初始含水率作为重要的土壤物理性质, 主要通过土壤湿润体

内平均土水势梯度来影响土壤水分入渗过程<sup>[6]</sup>。康金林等<sup>[7]</sup>通过室内模拟土柱试验研究指出, 均质红壤入渗能力与土壤初始含水率负相关, 湿润锋运移速率随初始含水率的增大而增大。曾辰等<sup>[8]</sup>通过研究初始含水率对砂黄土和壤土的线源入渗特征的影响表明, 2种类型土壤的累积入渗量与初始含水率为二次函数关系。介飞龙等<sup>[9]</sup>基于HYDRUS模型研究不同初始含水率对膜孔灌湿润体的影响, 结果表明该模型优于Kostiakov等传统入渗模型。然而, 不同条件下初始含水率对土壤水分入渗过程影响不同, 地下渗灌是一种利用土壤吸水作用发挥效能的被动供水方式且可以根据土壤初始含水率调节出水流量, 因此, 初始含水率对地下渗灌入渗特性有较大的影响<sup>[10]</sup>。【切入点】受地下渗灌管管材特质与承压特性的限制, 地下渗灌技术尚在初始应用阶段, 目前对不同初始含水率条件下地下渗灌入渗机制的研究较少。【拟解决的关键问题】为此, 以西北主要土壤类型风沙土为对象, 基于新型地下渗灌技术分析不同初始含水率条件下土壤水分入渗特征, 以期对地下渗灌技术推广提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

试验土壤风沙土于2022年8月取自宁夏银川市金凤区良田镇植物园二村, 取土深度为0~30 cm, 将

收稿日期: 2023-02-08 修回日期: 2023-03-17 网络出版日期: 2023-05-09  
基金项目: 宁夏重点研发计划与宁夏农垦自主研发计划项目(NXNK2022-Z03)  
作者简介: 马宏秀(1994-), 女, 博士研究生, 主要从事旱区土壤养分与水肥高效利用研究。E-mail: 1607932182@qq.com  
通信作者: 孙权(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区土壤养分与水肥高效利用研究。E-mail: sqnxu@sina.com  
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

取得不同土层深度土壤自然风干后，清除杂质，均匀混合，过 2 mm 筛备用。土壤基本物理性质见表 1。

表 1 供试土壤物理性质

砂粒量/% (0.02~2.0 mm)	粉粒量/% (0.002~0.02 mm)	黏粒量/% (<0.002 mm)	土壤		
			体积质量/ (g cm <sup>-3</sup> )	田间持水率/%	饱和含水率/%
88.76	8.38	2.86	1.47	20.1	30.2

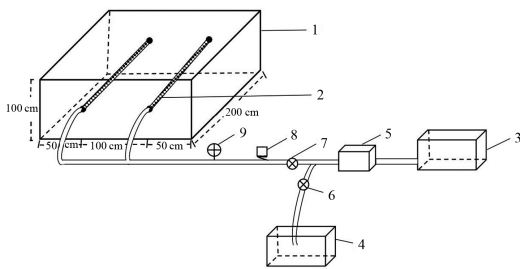
注 田间持水率和饱和含水率均为体积含水率。

试验前按设计含水率（质量含水率）加水，混合均匀后用塑料布覆盖静置 24 h，次日开展入渗试验，待土壤水分分布均匀后，按照设计土壤体积质量 1.47 g/cm<sup>3</sup>，每 5 cm 为 1 层分层装入试验土箱。

### 1.2 试验材料和装置

试验所用渗灌管由南京德水节能科技有限公司提供，其主要参数为：内径 13 mm，壁厚 1.5 mm，外表面布满微孔，工作运行压力 0.06 MPa，稳定压力下额定流量为 6 L/(h·m)。

试验装置由土箱和供水装置组成（图 1），试验土箱为 1 cm 厚有机玻璃制成，箱体规格为 200 cm×200 cm×100 cm（长×宽×高），其底部均匀分布有直径 0.2 cm 的小孔便于通气。供水装置主要由供水箱、回水箱、水泵、压力表、流量计等组成。土层总高度 100 cm，渗灌管埋深 50 cm。为了真实模拟田间应用情况，箱内安插 2 条间距为 100 cm 的渗灌管，渗灌管长度与土箱长度均为 200 cm，进口端连接供水系统，出口端封闭。供水箱和回水箱的箱体上标有刻度，用于测定和校核供水流量。水泵内设置电位调速器，以便调节供水压力。



注 1.土箱；2.地下渗灌管；3.供水箱；4.回水箱；  
5.水泵；6、7.阀门；8.压力表；9.流量计。

图 1 试验装置图

Fig.1 Diagram of the test device

### 1.3 试验设计

根据前人<sup>[11]</sup>关于沙土含水率分布情况的研究，试验设置 3 个不同初始含水率水平（土壤自然风干时的含水率），分别为 5.1%、11.5%、16.8%，为排除土壤水分蒸发的影响，表层用塑料膜覆盖，每组试验设置 4 次重复，选取平均值进行数据分析。

试验开始后，记录不同时刻湿润锋的轮廓和灌水流量。在最初入渗 0.5 h 内，分别在 2、5、10、15、

30 min 用卷尺测量出湿润体各向湿润锋运移距离，0.5 h 之后每隔 30 min 观测 1 次；采用 L99-TWS-3 型土壤水分记录仪测定土壤水分，将传感器预先埋设在水平距管 10、20、30、40、50 cm 处，埋设深度在 10、20、30、40、60、70、80、90、100 cm 处，长期连续监测，测定前用烘干法测定含水率校正仪器。本试验设置单次灌水量为 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>，即连续渗灌 10 h 后，停止供水。

### 1.4 入渗模型拟合与评价指标

本研究选取 Kostikov、Philip、Horton 和通用经验型共 4 种模型分别对入渗过程进行模拟，并对各模型拟合结果进行评价。

Kostikov 模型：

$$F(t)=At^B, \quad (1)$$

式中： $F(t)$ 为入渗速率（cm/min）； $A$ 和 $B$ 为模型参数； $t$ 为入渗时间。

Philip 模型：

$$F(t)=S+Vt^{-0.5}, \quad (2)$$

式中： $S$ 为稳定入渗率（cm/min）； $V$ 为模型参数。

Horton 模型：

$$F(t)=F_i+(F_0-F_i)a^{-bt}, \quad (3)$$

式中： $F_0$ 为初始入渗率（cm/min）； $F_i$ 为稳定入渗率（cm/min）； $b$ 为模型参数。

通用经验模型：

$$F(t)=m+nt^k, \quad (4)$$

式中： $m$ 、 $n$ 、 $k$ 为经验参数。

### 1.5 累积入渗量拟合

选择幂函数对累积入渗量变化进行拟合：

$$Z=Kt^a, \quad (5)$$

式中： $Z$ 为累积入渗量； $K$ 为入渗系数； $a$ 为入渗指数。

### 1.6 克里斯琴森均匀系数

灌溉均匀度计算式为：

$$CU = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |\bar{\theta} - \theta_i|}{N\bar{\theta}}\right) 100\%, \quad (6)$$

式中： $CU$ 为灌溉均匀度（cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>）； $\bar{\theta}$ 为湿润体平均含水率（cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>）； $\theta_i$ 为第  $i$  节点处土壤含水率（cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>）； $N$ 为湿润体选取节点数。

### 1.7 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2016、Sigmaplot 12.5 软件处理数据及制图，运用 SPSS 18 中的 LSD 法进行方差分析，数据处理显著水平为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 初始含水率对湿润锋运移的影响

#### 2.1.1 湿润体形状变化特征

为了方便观测，以湿润体 1/2 横剖面为研究对象。

图 2 为不同初始含水率对应的湿润锋动态变化过程， $X$  为水平距离， $Y$  为土层深度，坐标原点  $(0, 0)$  为渗灌管所在位置，湿润锋以渗灌管位置为中心向外缓慢运移。选取不同灌溉时间湿润体水平移动半径  $R$ ，垂直向下移动距离  $D$ ，垂直向上移动距离  $L$  描述湿润体的形状和大小。由图 2 可知，随着初始含水率的增大，湿润体横剖面形状越来越接近椭圆形，初始含水率对地下渗灌下湿润体形状具有较大影响。当

初始含水率为 5.1% 时， $R:L:D$  从 1:0.8:1.2 逐渐变为 1:0.8:1.25；初始含水率为 11.5% 时， $R:L:D$  从 1:0.63:1.25 逐渐变为 1:0.64:1.22；初始含水率为 16.8% 时， $R:L:D$  从 1:0.69:1.48 逐渐变为 1:0.67:1.43。随着灌水时间的延长，不同方向的湿润锋运移速率无显著差异，但随着初始含水率的增加，湿润锋垂直向上的扩散速率相对降低，而垂直向下的扩散速率相对增大。

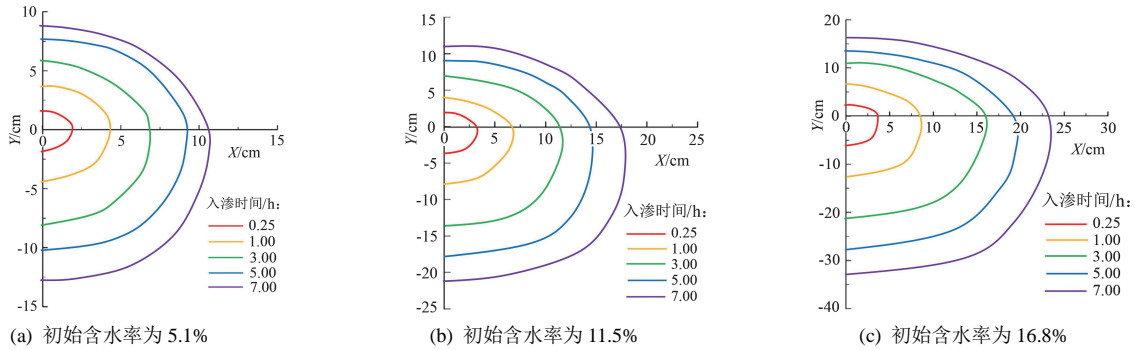


图 2 湿润体动态分布

Fig.2 Dynamic distribution of moisturites

### 2.1.2 湿润锋运移速率

图 3 为初始含水率对湿润锋运移速率的影响。由图 3 可知，不同初始含水率下湿润锋运移速率均呈下降趋势，随着灌水时间的增加，湿润锋运移速率逐渐趋于稳定。湿润锋在不同方向的推进速率均随初始含水率的增大而增大，原因是在初始含水率较高的条件下，土壤较快达到饱和状态，下渗率趋于稳定，然后

在毛管水和重力水的作用下渗透移动，湿润锋运移速率相对较快<sup>[12]</sup>。初始含水率 5.1%、11.5%、16.8% 的垂直向上的平均扩散速率为 1.45、1.86、2.54 cm/h，垂直向下的平均扩散速率为 2.28、3.57、5.40 cm/h，水平方向的平均扩散速率为 1.75、2.96、3.90 cm/h，说明初始含水率对垂直向下的运移过程影响最大，对水平方向的运移过程影响程度最小。

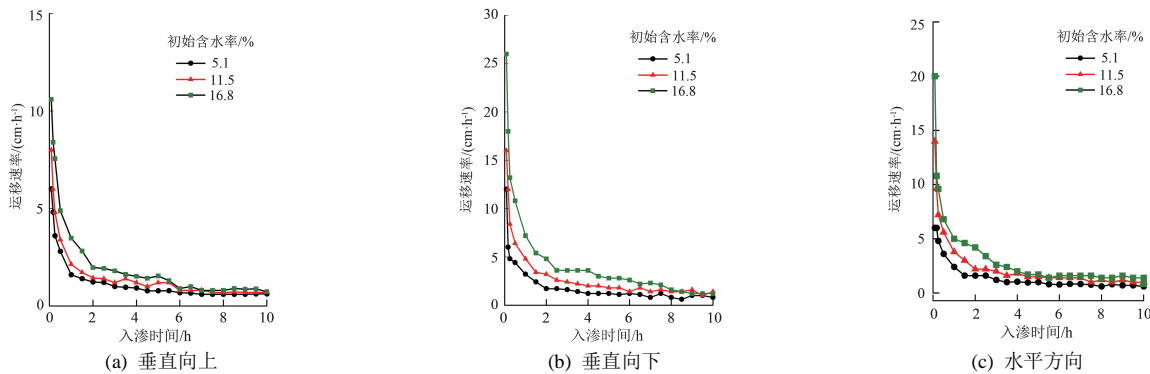


图 3 初始含水率对湿润锋运移速率的影响

Fig.3 Effect of initial water content on wetting front migration rate

### 2.2 初始含水率对累计入渗量和入渗率的影响

由图 4 可知，在前 15 min，各处理累计入渗量无明显差异，随着时间推移，同一时刻下初始含水率越大，累计入渗量越小，变化趋势越平缓。为了进一步定量分析初始含水率对地下渗灌入渗性能的影响，利用式 (5) 对不同初始含水率累计入渗量和入渗时间进行拟合，结果见表 2。由表 2 可得，累计入渗量和入渗时间符合幂函数关系，随着初始含水率的增加，入渗系数  $K$  呈减小趋势，而入渗指数  $a$  逐渐增大，相关系数均能达到 0.99 以上。

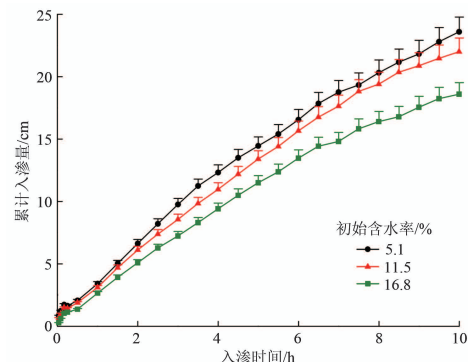


图 4 初始含水率对累计入渗量的影响

Fig.4 Effect of initial water content on cumulative infiltration

表 2 累计入渗量与入渗时间拟合结果

拟合参数	初始含水率/%		
	5.1	11.5	16.8
$K$	4.954	4.406	3.278
$a$	0.641	0.669	0.753
$R^2$	0.993	0.993	0.997

由图 5 可知,不同初始含水率的平均入渗率随着入渗时间的延长均呈下降趋势,30 min 后均趋于平缓,达到稳定入渗阶段。初始含水率越高,入渗速率越小,入渗曲线较为平缓,到达稳定入渗速率的时间越短。原因是随着初始含水率的增加,入渗初期的土壤水吸力减小,平均入渗速率变化不大<sup>[13]</sup>。

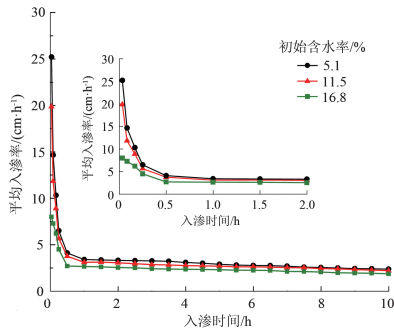


图 5 初始含水率对平均入渗率的影响

Fig.5 Effect of initial water content on average infiltration rate

### 2.3 风沙土入渗过程模型拟合

表 3 为不同初始含水率的入渗模型拟合结果。由表 3 可以看出,不同入渗模型对土壤入渗过程的拟合结果有所差异。Kostiakov 模型回归结果  $R^2$  为 0.561~0.911,平均值为 0.783,该模型在高初始含水率条件下的入渗精确度较低;采用 Philip 模型回归结果  $R^2$  为 0.533~0.992,平均值为 0.785, $S$  值为 0~0.013,对稳定入渗速率的拟合精度不够,且在高初始含水率条件下拟合效果较差;Horton 模型回归结果  $R^2$  为 0.917~0.956,平均值为 0.943,对不同处理入渗过程的模拟效果均较好;通用经验模型中  $R^2$  为

0.897~0.944,平均值为 0.923,参数  $m$ 、 $n$  分别表征稳定入渗率和初始入渗率,参数  $k$  代表入渗速率随时间减小的程度,可以看出,随着初始含水率的增大, $m$  呈增加趋势,而  $n$  呈减小趋势,与实测值不符。综上可知,4 种模型中对土壤入渗过程拟合适用性较好的是 Horton 模型,其次为 Kostiakov 模型、Philip 模型和通用经验模型。

表 3 不同初始含水率的入渗模型拟合结果

Table 3 Fitting results of infiltration models with different water content				
模型	参数	初始含水率/%		
		5.1	11.5	16.8
Kostiakov 模型	$A$	0.568	0.418	0.137
	$B$	0.583	0.535	0.325
	$R^2$	0.911	0.876	0.561
Philip 模型	$S$	0.000	0.000	0.013
	$V$	0.498	0.395	0.147
	$R^2$	0.929	0.891	0.533
Horton 模型	$F_i$	0.055	0.051	0.042
	$F_0-F_i$	0.365	0.280	0.091
	$b$	1.099	1.088	0.904
	$R^2$	0.955	0.956	0.917
通用经验模型	$m$	0.009	0.010	0.015
	$n$	0.591	0.438	0.164
	$k$	0.652	0.618	0.358
	$R^2$	0.928	0.897	0.944

### 2.4 初始含水率对湿润体水分再分布的影响

#### 2.4.1 对湿润体垂直方向水分再分布的影响

灌溉结束后,不同方向的湿润锋在渗透压和重力势等作用下会继续扩散和运动<sup>[14]</sup>。如图 6 所示,坐标 (0, 50) 点为渗灌管所在位置,初始含水率 5.1%、11.5%、16.8% 处理土壤含水率均随土层深度的增加呈先增大后减小,最后趋于稳定的趋势。在表层土壤中湿度较小,说明地下渗灌减少了土壤水分的地表蒸发,将水分储存在深层土壤,提高了水分利用效率<sup>[15]</sup>。但同时也需要注意初始含水率过高时深层土壤中平均含水率的变化,以免发生渗漏。

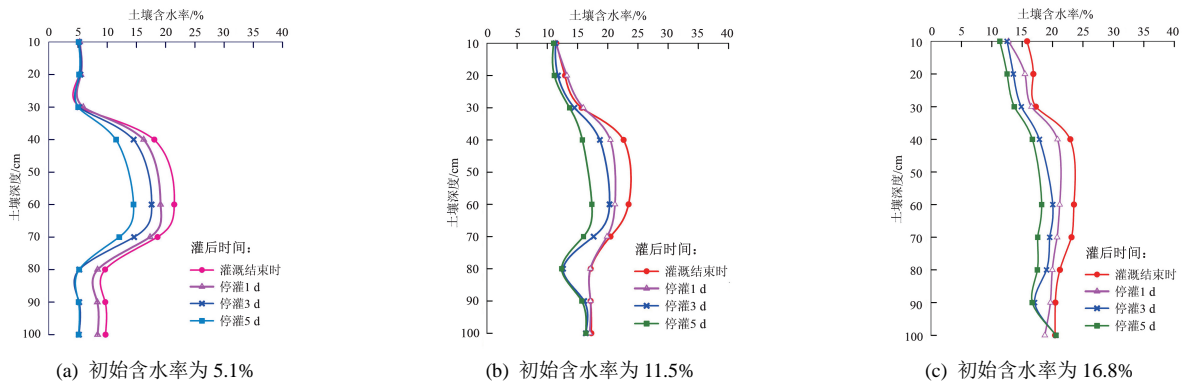


图 6 初始含水率对湿润体垂直方向水分再分布的影响

Fig.6 Effect of initial water content on vertical water redistribution of humidified bodies

灌溉结束时土壤水分主要集中在 40~70 cm 处(渗灌管中心位置附近),停灌 1 d 后土壤含水率

集中范围扩大为 30~80 cm,停灌 3 d 和停灌 5 d 后土壤含水率明显下降,远低于田间持水率,但总体变化

趋势与停灌 1 d 相似。以土层深度 30~80 cm 为研究对象, 利用式 (6) 计算湿润土体均匀度  $CU$ , 初始含水率为 5.1% 时, 灌溉结束时、停灌 1 d、停灌 3 d 和停灌 5 d 湿润体内水分分布均匀度  $CU$  分别为 61.00%、62.59%、56.45%、62.35%; 初始含水率为 11.5% 时, 灌溉结束时、停灌 1 d、停灌 3 d 和停灌 5 d 湿润体内水分分布均匀度  $CU$  分别为 86.06%、89.88%、84.69%、89.27%; 初始含水率为 16.8% 时, 灌溉结束时、停灌 1 d、停灌 3 d 和停灌 5 d 湿润体内水分分布均匀度  $CU$  分别为 91.21%、93.54%、91.65%、92.77%。故停灌 1 d 后湿润体内垂直方向含水率分布相对均匀, 湿润体特征可作为田间指导灌水的主要依据。

#### 2.4.2 对湿润体水平方向水分再分布的影响

图 7 为初始含水率对湿润体水平方向水分再分布的影响。由图 7 可知, 随着水平距离的增加, 土壤停灌时与停灌结束后的含水率均呈先减小后趋于稳定的趋势。不同初始含水率条件下, 湿润体水平方向水分主要集中在距管 0~25 cm 处, 在初始含水率为 5.1% 的水平方向 25~35 cm 处, 再分布后的土壤含水

率大于灌溉结束时, 初始含水率为 11.5%、16.8% 处理的土壤含水率随着停灌时间的延长整体呈减小趋势。这主要是由于风沙土质地粗、孔径大, 当土壤含水率低于土壤有效水阶段时, 湿润锋仍将不断运动, 促进了水分的水平运移。

以水平距管 0~25 cm 为研究对象, 用式 (6) 计算不同初始含水率条件下湿润体水平方向水分分布均匀度可得, 初始含水率为 5.1% 时, 灌溉结束时、停灌 1 d、停灌 3 d 和停灌 5 d 湿润体内水分分布均匀度分别为 62.85%、71.88%、69.32%、70.21%; 初始含水率为 11.5% 时, 灌溉结束时、停灌 1 d、停灌 3 d 和停灌 5 d 湿润体内水分分布均匀度分别为 94.82%、96.48%、95.39%、94.94%; 初始含水率为 16.8% 时, 灌溉结束时、停灌 1 d、停灌 3 d 和停灌 5 d 湿润体内水分分布均匀度分别为 96.38%、97.31%、97.22%、95.96%。故湿润体内水平方向土壤含水率分布同样在停灌 1 d 后相对均匀, 湿润体特征可作为田间指导灌水的主要依据。

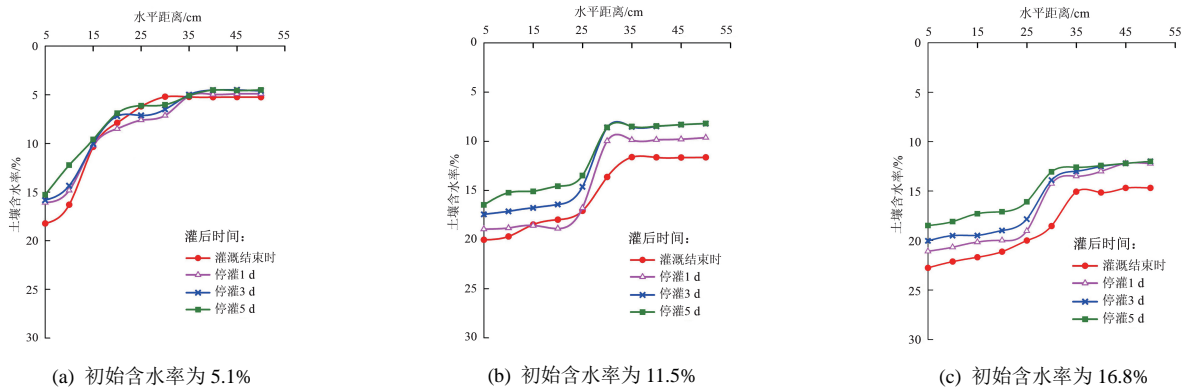


图 7 初始含水率对湿润体水平方向水分再分布的影响

Fig.7 Effect of initial water content on water redistribution in the horizontal direction of wet body

综上所述, 停灌 1 d 后湿润体内垂直方向和水平方向含水率分布相对均匀, 为了进一步探究不同初始含水率对地下渗灌埋深和间距的影响, 对比此阶段含水率数值与土壤有效含水率 (田间持水率的 65%), 可知, 随着初始含水率的增大, 渗灌管适宜埋深与间距也在增大。其中, 风沙土在初始含水率为 5.1% 时, 渗灌管适宜埋深应小于 10 cm, 管间距应小于 30 cm; 初始含水率为 11.5% 时, 渗灌管适宜埋深应小于 20 cm, 管间距应小于 60 cm; 在初始含水率为 16.8% 时, 渗灌管适宜埋深应小于 30 cm, 管间距应小于 90 cm, 以保障作物正常生长。

### 3 讨论

本研究发现, 风沙土地下渗灌下湿润体形状近似渗灌管为中心的椭圆形, 初始含水率对湿润体形状的影响较大。这与张俊等<sup>[16]</sup>研究结果不同, 这可能是由

于地下渗灌与微润灌不同, 地下渗灌属于管道式线源灌溉, 管壁渗水孔较多, 当初始含水率大于土壤入渗能力时, 容易产生积水, 使得重力势及渗灌管侧面与土壤作用力变大, 湿润锋在不同方向的推进速率随初始含水率增大而增大, 且向下运移速率大于向上和水平方向, 因此形成左右截距相同、上下截距不同的椭圆形。本研究发现随着初始含水率的增大, 地下渗灌累计入渗量和入渗速率变小。康金林等<sup>[17]</sup>研究不同初始含水率条件下对均质红壤水分入渗规律影响也得到相同结论, 主要原因是其他条件一致时, 初始含水率越高, 入渗初期的土壤水吸力越弱, 加上水分的持续输入, 土壤含水率逐渐增大, 土壤孔隙度减小, 相同时间内的入渗率和累积入渗量也就越低。

本研究采用 4 种入渗模型对风沙土入渗过程进行拟合, 并表明 Kostiakov 模型回归结果  $R^2$  均值为 0.783, 对风沙土高初始含水率条件下的拟合效果

较差。Philip 模型对均质土壤垂直入渗的适宜性较好<sup>[18-19]</sup>, 而本试验采用 Philip 模型进行拟合, 发现对稳定入渗速率和高初始含水率条件下的拟合精度不够。曾辰等<sup>[8]</sup>认为 Philip 入渗模型能够较好地描述不同初始含水率条件下砂黄土和壤土的入渗过程。而其试验结果与本研究不同的原因是二者灌溉装置与土壤质地不同, 地下渗灌原理与其他种类灌水器差异较大。Horton 模型回归结果  $R^2$  均值在 4 个模型中最高, 对不同初始含水率下风沙土水分入渗均有较好的适用性。通用经验模型中初始含水率与稳定入渗率成正比, 与初始入渗率成反比, 这与实测数据不一致。综合分析评价, Horton 模型更适用于拟合地下渗灌风沙土水分入渗特征。

根据灌水结束后湿润体水分分布情况表明土壤水分主要集中在垂直方向 40~70 cm 范围, 水平方向 0~25 cm 范围, 即土壤水分变化率范围集中在渗灌管位置附近, 继而向四周逐步扩散, 距离渗灌管出水孔位置越远, 水势梯度增大, 土壤含水率不断减小<sup>[20]</sup>。灌水均匀度是评价灌水质量的重要指标, 也是灌溉系统设计的关键参数<sup>[21]</sup>。本研究发现在湿润体垂直方向和水平方向, 不同处理均在停灌 1 d 后含水率分布相对均匀, 这与刘显等<sup>[22]</sup>研究结果一致, 再分布 1 d 后湿润体特征可作为田间指导灌水的主要依据。但再分布后水分主要集中在 30~80 cm 处, 需注意初始含水率过高造成水分深层渗漏和蒸发损失<sup>[23]</sup>。杨明达<sup>[24]</sup>通过 HYDRUS-2D 模型模拟及田间试验表明, 风沙土条件下滴灌带埋深 30 cm, 间距 60 cm 是冬小麦-夏玉米的最佳布设参数。焦炳忠<sup>[25]</sup>研究认为, 砂质土条件下地下渗灌灌水器埋深大于 30 cm 后, 会存在渗漏现象。本研究中不同初始含水率对地下渗灌管埋深和间距有较大的影响, 通过对水分再分布后土壤含水率数值的分析可以得出, 初始含水率为 5.1%、11.5%、16.8% 时, 渗灌管适宜埋深应分别小于 10、20、30 cm, 管间距应分别小于 30、60、90 cm。在实际应用中, 地下渗灌管布设参数的选择还需要根据土壤质地、作物需水规律等实际情况综合考虑。

本文采用土箱模拟试验对不同初始含水率下风沙土入渗特性进行研究, 阐明了风沙土入渗过程, 但未对不同质地土壤及作物进行系统研究, 后续还需要继续探讨影响地下渗灌土壤水分入渗的其他因素, 为干旱半干旱地区地下渗灌技术的实际应用与推广提供理论依据。

## 4 结论

1) 地下渗灌下湿润体形状近似椭圆形, 并随着初始含水率的增大, 形状特征越明显。湿润锋在不同

方向的推进速率与初始含水率正相关。

2) 同一时刻下初始含水率越大, 累计入渗量和入渗速率越小, 累积入渗量和入渗时间符合幂函数关系, 入渗系数与初始含水率负相关, 入渗指数与初始含水率正相关。

3) 与 Kostikov 模型、Philip 模型和通用经验模型相比, Horton 模型对不同初始含水率下风沙土入渗过程拟合效果较好。

4) 不同初始含水率对风沙土地下渗灌管埋深和间距有较大的影响, 初始含水率为 5.1%、11.5%、16.8% 时, 渗灌管适宜埋深应分别小于 10、20、30 cm, 渗灌管间距应分别小于 30、60、90 cm, 即风沙土湿度越大, 渗灌管埋深越深, 渗灌管间距可相应增大。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

## 参考文献:

- [1] DUKES M D, SCHOLBERG J M. Soil moisture controlled subsurface drip irrigation on sandy soils[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(1): 89-101.
- [2] CAO J H, CHEN P P, GAO X D, et al. Effects of plastic film residue and emitter flow rate on soil water infiltration and redistribution under different initial moisture content and dry bulk density[J]. Science of the Total Environment, 2022, 807: 151-381.
- [3] 孙燕, 王春宏, 王全九, 等. 生化黄腐酸对盐碱土盐运移特征及盐基离子组成的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 228-235. SUN Yan, WANG Chunhong, WANG Quanjiu, et al. Effects of biochemical fulvic acid application on water and salt transport characteristics and basic ion composition of saline-alkaline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 228-235.
- [4] HIRMAS D R, GIMÉNEZ D, NEMES A, et al. Climate-induced changes in continental-scale soil macroporosity may intensify water cycle[J]. Nature, 2018, 561(7 721): 100-103.
- [5] 贾昂元, 张勇勇, 赵文智, 等. 干旱区绿洲农田土壤大孔隙与水分入渗特征[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 486-497. JIA Angyuan, ZHANG Yongyong, ZHAO Wenzhi, et al. Characteristics of soil macropores and water infiltration in oasis croplands in an arid region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 486-497.
- [6] 李奕然, 马英, 宋献方, 等. 华北山区典型人工林土壤水势动态和水分运移规律[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5 622-5 631. LI Yiran, MA Ying, SONG Xianfang, et al. Soil water potential dynamics and water utilization of typical planted forests in the mountain area of North China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5 622-5 631.
- [7] 康金林, 杨洁, 刘窑军, 等. 初始含水率及容重影响下红壤水分入渗规律[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 122-126. KANG Jinlin, YANG Jie, LIU Yaojun, et al. Impacts of soil initial water content and bulk density on infiltration law of red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 122-126.
- [8] 曾辰, 王全九, 樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 24-30. ZENG Chen, WANG Quanjiu, FAN Jun. Effect of initial water content on vertical line-source infiltration characteristics of soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 24-30.
- [9] 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. 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, 2020, 36(14): 174-181.
- [10] YAO Jiawei, QI Yongqing, LI Huaihui, et al. Water saving potential and mechanisms of subsurface drip irrigation: A review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1 076-1 084.
- [11] 董荣泽, 于明英, 邱照宁, 等. 沙土上升毛管水运动特性研究[J]. 节水灌溉, 2018(4): 19-25.  
DONG Rongze, YU Mingying, QIU Zhaoning, et al. A study on capillary water movement characteristics in sandy soil[J]. Water Saving Irrigation, 2018(4): 19-25.
- [12] 王策, 张展羽, 陈晓安, 等. 基于水量平衡原理的裂隙优先流双域渗透模型及其应用[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 314-326, 348.  
WANG Ce, ZHANG Zhanyu, CHEN Xiaohan, et al. Dual-permeability model for crack preferential flow based on principle of water volume balance and its application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 314-326, 348.
- [13] 张锦华, 李明思, 韩寒, 等. 非饱和土壤中孔隙流的影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 70-77, 103.  
ZHANG Jinhua, LI Mingsi, HAN Han, et al. Factors affecting macropore flow in unsaturated soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 70-77, 103.
- [14] 王炳尧, 韦伟, 刘立超, 等. 直插式地下滴灌土壤湿润体特征值变化规律及灌溉效果分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(4): 1-10.  
WANG Bingyao, WEI Wei, LIU Lichao, et al. Water movement and its potential for uptake by roots under plug-in subsurface drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(4): 1-10.
- [15] 孙振源, 焦炳忠, 李兴强. 渗灌水肥耦合对同心圆枣生长发育的影响[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(2): 22-29.  
SUN Zhenyuan, JIAO Bingzhong, LI Xingqiang. Effects of water and nitrogen coupling on growth and development of Zizphus jujuba 'Tongxinyuanzao' under infiltration irrigation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(2): 22-29.
- [16] 张俊, 牛文全, 张琳琳, 等. 初始含水率对微润灌溉线源入渗特征的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(1): 72-79.  
ZHANG Jun, NIU Wenquan, ZHANG Linlin, et al. Effects of soil initial water content on line-source infiltration characteristic in moistube irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(1): 72-79.
- [17] 康金林, 杨洁, 刘窑军, 等. 初始含水率及容重影响下红壤水分入渗规律[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 122-126.  
KANG Jinlin, YANG Jie, LIU Yaojun, et al. Impacts of soil initial water content and bulk density on infiltration law of red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 122-126.
- [18] 王幼奇, 包维斌, 赵云鹏, 等. 生物炭添加对淡灰钙土水分入渗过程的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 60-65.  
WANG Youqi, BAO Weibin, ZHAO Yunpeng, et al. Amending soil by biochar reduces the ability of the soil to infiltrate water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12): 60-65.
- [19] RAHMATI M, LATORRE B, MORET-FERNÁNDEZ D, et al. On infiltration and infiltration characteristic times[J]. Water Resources Research, 2022, 58(5): e2021WR031600.
- [20] 焦炳忠, 孙兆军, 韩磊, 等. 渗灌管理深与灌溉量对枣树产量和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 94-105.  
JIAO Bingzhong, SUN Zhaojun, HAN Lei, et al. Effects of depth and irrigation amount of subsurface infiltration irrigation pipes on water use efficiency and yield of jujube[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 94-105.
- [21] 范雷雷, 史海滨, 李瑞平, 等. 河套灌区畦灌灌水方案优化与敏感性分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 280-290.  
FAN Leilei, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Optimization and sensitivity analysis of border irrigation performance in Hetao irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 280-290.
- [22] 刘显, 费良军. 灌水器流量对涌泉根灌土壤水氮运移的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(10): 903-911.  
LIU Xian, FEI Liangjun. Transport characteristics of water and nitrogen under bubbled-root irrigation with emitter discharge[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(10): 903-911.
- [23] 冯壮壮, 史海滨, 苗庆丰, 等. 基于 HYDRUS-1D 模型的河套灌区典型夹砂层耕地水分利用分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 90-99.  
FENG Zhuangzhuang, SHI Haibin, MIAO Qingfeng, et al. Water use analysis of cultivated land with typical sand layers in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia using HYDRUS-1D model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(18): 90-99.
- [24] 杨明达. 冬小麦-夏玉米地下滴灌节水增产机理及适宜模式研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021.  
YANG Mingda. Study on water-saving and yield-increasing mechanism and appropriate model of winter wheat and summer maize under subsurface drip irrigation[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.
- [25] 焦炳忠. 地下渗灌入渗特性及对旱区枣树节水增产效应的研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.  
JIAO Bingzhong. Study on infiltration characteristics of underground infiltration irrigation and its effect on saving water and increasing production of jujube trees[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020.

## Impact of Initial Soil Water Content on Infiltration of Irrigation Water in Aeolian Sandy Soil

MA Hongxiu<sup>1</sup>, SUN Quan<sup>1\*</sup>, LU Haitao<sup>1</sup>, MA Wenli<sup>2</sup>, JIANG Peng<sup>1</sup>,  
ZHANG Xiaojuan<sup>1</sup>, CAI Zhanhong<sup>2</sup>, JIA Dengcheng<sup>3</sup>

(1. Agricultural College of Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Agriculture, Forestry and Animal Husbandry Technology Extension Service Center, Ningxia Agricultural Reclamation Group, Yinchuan 750011, China; 3. State-owned Jianquan Farm, Ningxia Agricultural Reclamation Group, Shizuishan 753299, China)

**Abstract:** 【Objective】 The movement of irrigation water in soil is an important parameter in irrigation design. It is affected by many factors. This paper investigates the impact of initial soil water on infiltration of subsurface irrigation water in an aeolian sandy soil. 【Method】 The outdoor experiment was conducted in tanks repacked with the sandy soil, with the initial soil water content controlled at 5.1%, 11.5%, 16.8%. The movement of the wet zone in each treatment was monitored visually. Infiltration processed was simulated by different analytical models. 【Result】

The wet zone in all treatments was approximately elliptical, with the center located at the perfusion pipe. Increasing initial soil water content accelerated the movement of the wetting front but reduced the cumulative infiltration amount and infiltration rate. The cumulative infiltration amount increased with infiltration time in a power-law function, and the infiltration index increased with the initial water content. Comparison with measured data revealed that the  $R^2$  of the Kostiakov model, Philip model, empirical model and Horton model was 0.783, 0.785, 0.923 and 0.943, respectively. When the initial water content was 5.1%, 11.5% and 16.8%, the burial depth of the irrigation pipe should not exceed 10, 20 and 30 cm, respectively, and the associated pipe spacing not exceed 30, 60 and 90 cm, respectively. **【Conclusion】** Increasing initial soil water content in aeolian sandy soil allows the irrigation pipes to be buried deeper and spaced widely. These findings are helpful for designing subsurface irrigation in aeolian sandy soil which is common in northwestern China.

**Key words:** aeolian sand; underground infiltration; infiltration characteristics; initial water content

责任编辑: 白芳芳

(上接第 17 页)

## Using Exogenous Endophytic Fungi to Improve Seed Germination and Seedling Development of Oat under Water Stress

LI Xiaoting, LI Lijun\*, ZHANG Yongping\*, GUO Yunfei, HAN Xue

(College of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

**Abstract: 【Objective】** Seed germination and its subsequent seedling development underpin the ultimate yield, but they are prone to water stress. This paper studies the feasibility and effectiveness of using exogenous endophytic fungi to boost germination of oat (*Avena sativa* L.) seed and its seedling development under drought conditions.

**【Method】** Oat seeds were treated with tap water (WW); water stress in the petri dishes was created by adding 12% of PEG-6000 to the water. The Czapek medium was used as the control (CK). The seeds were inoculated by endophytic fungi O-2 (*Fusarium equiseti*) and O-66 (*Alternaria pomicola*), respectively. In each treatment, we measured seed germination and the subsequent seedling growth, morphology, and physiological traits of the roots.

**【Result】** Successful colonization of the exogenous endophytic fungi O-2 and O-66 was identified in the oat roots. Drought stress significantly inhibited seed germination, but inoculation with endophytic fungi O-2 and O-66 increased the germination rate. Notably, inoculation with fungus O-66 significantly increased the germination rate and seedling development by 44.68% and 41.18%, respectively, compared to CK. The endophytic fungi also promoted radicle and germ elongation, which were 1.15 to 1.36 times and 1.18 to 1.42 times that of CK, respectively. In hydroponic culture, all endophytic fungi enhanced plant height, dry matter accumulation, and root index of the oat seedlings. O-66 inoculation resulted in a 23.67% increase in plant height and a 39.58% increase in canopy dry weight. Additionally, inoculation also increased root dry weight, total root length, projected root area, total root surface area, total root volume and root tips significantly by 33.72%, 20.40%, 35.47%, 31.84%, 36.94% and 59.24%, compared to CK. Inoculation with endophytic fungi increased root activity, and elevated SOD, POD, and CAT enzymes by 25.97% to 30.48%, 14.26% to 20.47% and 37.46% to 45.72%, respectively. Compared to CK, inoculation reduced the content of MDA (malondialdehyde), a marker of oxidative stress, by 9.27% to 10.33%.

**【Conclusion】** Inoculating the oat seeds by exogenous endophytic fungi can effectively alleviate drought stress to their germination and the subsequent seedling development, especially when inoculated with the fungus O-66. These results provide valuable insight into the use of endophytic fungi to mitigate drought stress to seed germination and improve crop growth.

**Key words:** drought stress; endophytic fungi; seed germination; seedlings; root morphology; physiological property

责任编辑: 白芳芳