

压力水头与土壤容重对微润灌溉水分入渗的影响

张国祥, 申丽霞, 郭云梅

(太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为探究微润灌溉条件下水分在不同压力水头、不同容重土壤中的入渗情况, 通过室内土箱模拟试验, 分别设置 $h = 2.0, 1.5, 1.0\text{ m}$ 的压力水头, 土壤容重 γ 分别为 $1.20, 1.30, 1.40\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 测定累计入渗量、湿润锋及土壤含水率 3 个指标。结果发现, 水分累计入渗量与压力水头为正相关关系, 与土壤容重为负相关关系; 微润管在空气和地埋出流情况下的流量与压力水头均为线性增函数关系, 相同压力下, 微润管的空气出流量明显大于地埋流量, 微润灌溉系统更适宜采用地下埋管方式; 湿润锋是以微润管为中心的近似圆形, 水平运移距离与垂直向下运移距离均大于垂直向上运移距离, 重力对微润灌溉条件下水分运移有一定的作用, 但该作用随着土壤容重的增加逐渐减小; 湿润锋运移距离与时间的关系近似为幂函数关系, 入渗指数约为 0.5; 土壤容重越大, 水分在土壤中的入渗速率越小, 土壤对水分的蓄持能力越弱; 经计算, 微润灌溉的灌水均匀性符合要求。

关键词: 微润灌溉; 压力水头; 土壤容重; 水分入渗

中图分类号: S274 文献标志码: A

Effect of pressure heads and soil bulk density on water infiltration under moistube irrigation

ZHANG Guo-xiang, SHEN Li-xia, GUO Yun-mei

(College of Water Conservancy and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: In order to investigate the relationship between water's infiltration and different pressure heads and bulk density under moistube irrigation, treatment of three pressure heads ($2.0, 1.5, 1.0\text{ m}$) and three bulk density ($1.20, 1.30, 1.40\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) were conducted by soil culture experiments. Three indicators, accumulative infiltration, wetting front and soil water content were measured. The result revealed that the accumulative infiltration of water was positively related with pressure heads, but negatively with soil bulk density. The discharge of moistube was linearly related with pressure heads under air and burying. The wetting front was an approximate circle with a moistube centre. The horizontal movement distance and the vertical upward movement distance were larger than the vertical downward movement, and gravity had certain effect on water movement under moistube irrigation. However, the effect was weaker and weaker with the increasing soil bulk density.

Keywords: moistube irrigation; pressure heads; soil bulk density; water infiltration

作为一项全新的节水灌溉技术,微润灌溉是充分利用半透膜的特殊性能,借助一定的压力水头,以连续出流方式为作物根区适时、适量地提供水分,使周围土壤始终保持湿润状态,从而达到灌溉目的。微润灌溉的设备投资低,结构简单,不消耗动力,节省运行费用,可以有效地降低农产品的生产成本^[1]。与滴灌、微喷灌及喷灌等其他高效节水灌溉措施相比,可调节水头控制土壤水势,满足作物不同生长阶段土壤水分需求,实现对作物水、肥、气、热的精准控

制,具有更节水、节能、增产等优点^[2]。微润灌灌水器的出流量主要受压力、土壤容重及质地影响。由于微润灌溉只依靠低压作为驱动力实现灌溉,而不需要消耗其他能量,故压力水头对微润管出流及水分在土壤中的入渗过程具有重要影响。随着压力水头的增加,入渗界面处压力势也随之增大,有利于增大土壤入渗作用,因而,相同入渗时间内湿润锋水平和垂向运移距离随着压力水头的增大而增大^[3]。容重作为重要的土壤参数之一,它

收稿日期: 2016-04-20
基金项目: 国家自然科学基金(31271645); 山西省农业科技攻关项目(20140311007-4)
作者简介: 张国祥(1991—), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 研究方向为节水灌溉技术。E-mail: 1101960669@qq.com。
通信作者: 申丽霞(1968—), 女, 山西长子人, 教授, 主要从事水肥资源高效利用研究。E-mail: shenlixia919@sohu.com。

反映了土壤坚实度和孔隙度的大小,对土壤的透气性、入渗性能、持水能力、溶质迁移特征以及土壤的抗侵蚀能力都有非常大的影响^[4]。研究表明,导水率与土壤粘性呈正比,湿润锋运移距离随着土壤容积密度增大而减小^[5];而同一质地的土壤,其水分入渗率会随容重的增大而减小,因为随土壤容重的增加,土壤团粒结构丧失、土壤孔隙减小、土壤变得紧密坚实导致入渗能力降低^[6]。

目前国内外学者对不同灌溉方式下土壤水分运动规律进行的研究,主要集中在土壤水分运移的数值模拟和入渗模型的解析方面^[7-10]。而关于微润灌溉的研究,则集中于对水分入渗影响因素的分析及入渗模型的建立上,而关于微润管地理与空气出流两种方式的流量对比试验,以及压力与土壤容重对灌溉参数影响的研究尚不充分。故本试验通过室内土箱模拟试验,探究压力与土壤容重对微润灌水分入渗的影响,得出相应的技术参数,以期微润灌溉技术的进一步推广提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自山西省太原市尖草坪区芮城村。将土自然风干、碾压后均匀混合,并过 2 mm 孔径筛。用 MS2000 型激光分析粒度仪测定,不同粒径级 $0.02 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$, $0.002 \text{ mm} < d \leq 0.02 \text{ mm}$, $d \leq 0.002 \text{ mm}$ 分别占 36.634%、43.008%、20.358%,依据国际制土壤质地划分标准,所试土壤类型为粘壤土。初始含水率(质量含水率,下同)为 2.26%,饱和含水率为 30.39%,田间持水量 21.3%。

1.2 试验装置

试验装置主要由活动支架、马氏瓶、水室、输水管、微润管、土箱及阀门组成。活动支架为高度可调节的铁支架,高约 2 m,上部水平。马氏瓶与水室由有机玻璃管制成,内径均为 100 mm,两者通过一根带有阀门的硬管连接,马氏瓶上标有刻度,试验时通过读取刻度变化计算耗水量;水室中装有定的水,其液面与微润管之间的高差即为所需压力水头,马氏瓶内部通过一根细玻璃管与大气连通,玻璃管下端与水室中液面齐平,用以维持水室中水位恒定。作为该技术的核心部件,微润管是具有双层结构的软管状给水器,内层为厚度 0.06 mm 的特制半透膜,其表面采用化学溶解方式,形成均匀而密集的微孔,孔密度约为 $10 \text{ 万个} \cdot \text{cm}^{-2}$ ^[11]。本次试验所用输水管为 $\phi 16$ 黑色 PE 管,微润管长度均为 1 m,内径为 16 mm,壁厚 1 mm,均由深圳市微润灌溉技术有限公

司提供。土箱由有机玻璃板制成,尺寸为 $100 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),在其两个侧面中心位置各开一个直径为 18 mm 的圆孔。

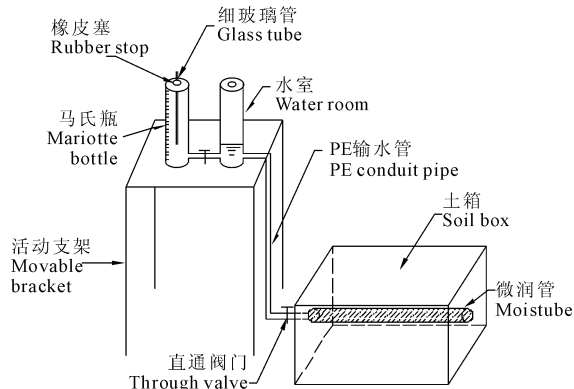


图 1 试验装置图

Fig.1 Schematic of experimental equipment

1.3 试验方法

试验在室内环境下进行。

微润管空气出流试验:将微润管水平置于空气中,一端通过输水管与水室连接,将水室水位调至特定高度(与微润管垂直距离分别为 2、1.75、1.5、1.25、1.0、0.75、0.5、0.25 m),打开所有阀门,赶出管内全部空气后,将微润管另一端用堵头堵死,记录马氏瓶当前刻度,每隔 2 h 记录一次刻度,共观测 24 h。

微润管地理试验:为排除其他影响入渗的因素的干扰,本试验采用控制其他因素不变,研究某一因素对入渗影响的方法。试验设置了不同土壤容重 γ ($1.20、1.30、1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)和不同压力水头 h ($2.0、1.5、1.0 \text{ m}$)2 个因素,共 5 组试验。试验前根据所需容重称取一定量土样,按每层 5 cm 厚度振捣,层间打毛,以确保土壤充分接触。装土厚度为 20 cm 时铺设微润管,使其穿过两个对称圆孔,一端与输水管相连。待土箱装满后,土体表面用塑料膜覆盖,防止外界水滴入及水分蒸发。打开所有阀门,将水室中水位调至所需高度(与微润管的垂直距离分别为 2.0、1.5、1.0 m)并赶出管内全部空气后,用堵头将微润管另一端封闭,同时开始记录马氏瓶刻度。前 12 h 内每隔 2 h 记录 1 次马氏瓶刻度,此后每隔 12 h 记录 1 次马氏瓶刻度,并用笔在土箱穿管侧面上描绘湿润锋位置。入渗 192 h 后关闭直通阀门,记下马氏瓶刻度,根据内径计算耗水量。将不同时刻的湿润锋用 Auto CAD 描绘至计算机中,以湿润体横剖面左右方向的 1/2(水平向右)为研究对象,记湿润体水平向右运移距离为 X ,垂直向上运移距离为 Y^+ ,垂直向下运移距离为 Y^- 。用内径为 1 cm 的土

钻在湿润体横剖面垂直向上、垂直向下、水平向右三个方向,从湿润锋到微润管处垂直横剖面等间距各取 5 个土样,取土深度为 10 cm。共测定三个横剖面,取平均值,用烘干法计算上述土壤含水率。

为保证实验结果的可靠性,上述每组试验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 压力对微润管空气出流及地埋出流的影响

2.1.1 压力对微润管空气出流的影响 通过微润管的空气出流试验,可以直观地观察其出流的过程,为探究微润灌灌水器的水力性能及地表铺设管带方式提供理论参考。

将微润管在不同压力下的流量进行拟合,发现二者之间的关系为:

$$q = 110.16h + 30.2$$

式中, q 为流量($\text{mL} \cdot \text{h}^{-1}$); h 为压力水头(m)。

可见在空气出流条件下,微润管流量与压力为线性关系,而区别于其他微管灌水器的幂函数关系^[12]。

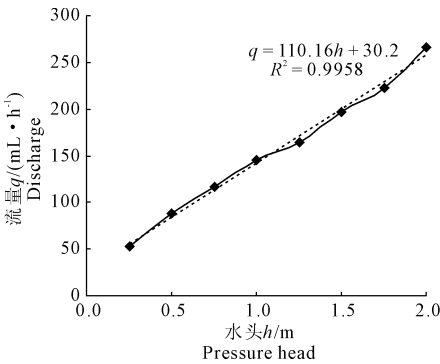


图 2 微润管流量与压力水头关系

Fig.2 Relationship between pressure heads and discharge of moistube

2.1.2 压力对微润管地埋出流的影响 在土壤容重为 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 水平下,各压力水头的水分累计入渗量如图 3 所示。可以看出,累计入渗量随时间的变化关系近似为线性关系,分别对其进行拟合发现,压力水头 h 分别为 2.0、1.5、1.0 m 的趋势线斜率分别为 61.984、45.483、32.501,对应的相关系数分别为 0.9934、0.9952、0.9989,均为显著相关。说明入渗量与时间的变化关系为线性增函数,在该容重下三种压力水头的入渗率分别为 61.984 、 45.483 、 $32.501 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。压力越大,水分入渗速率越快。压力水头与流量之间关系如图 4 所示,近似为线性增函数。

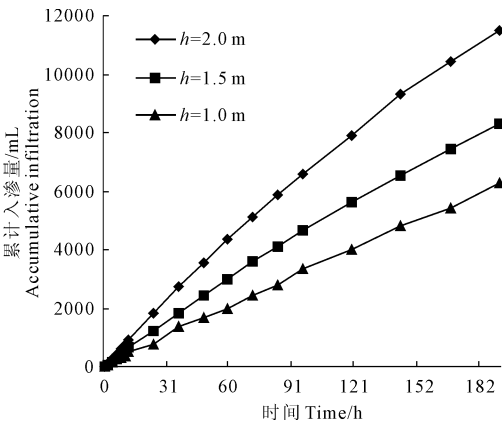


图 3 不同压力水头下累计入渗量随时间变化
Fig.3 Change of accumulative infiltration with time under different pressure heads

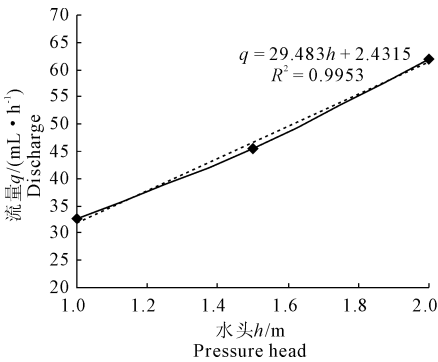


图 4 地埋微润管流量与压力水头的关系

Fig.4 Relationship between pressure heads and discharge of buried moistube

水分入渗速率随压力的增大而增大是因为随着入渗水头的增加,入渗界面压力势增大,有增大导水率的作用,增大了入渗速率;另一方面,入渗水头的增加又使得入渗界面土壤骨架变形而不断地密实,导水率减小,使入渗速率有减小的趋势。入渗速率正是在两种作用彼此消长之下,随压力水头的变化呈现出相对平稳与显著性变化的交替变化趋势^[13]。此外供水压力越大,饱和区水流压力势就越大,达到稳定入渗阶段时总的土水势梯度越大,入渗率越大,反映到累计入渗曲线上,则表现为曲线斜率随压力水头的增大而增大^[14]。实际生产中宜根据不同作物种类、不同土壤质地选择合适的压力水头,以更大发挥微润灌溉技术的节水效益。

本试验在探究压力水头对微润管出流影响的同时,更加侧重于分析在空气和地埋条件下微润管出流的异同。通过对比发现,相同压力下,微润管在空气中的流量要明显大于地埋流量,且压力越大这种差异越明显。这可能是因为地埋情况下,微润管被土壤包裹,渗出膜外的水分在有限的基质势下,并不

能及时地扩散出去,减小了膜内外的水势梯度,从而抑制了水分的出流。可见相比于地表,微润灌溉系统更宜采用地下埋管方式,以更大程度提高灌溉水的利用效率。

2.2 土壤容重对累计出流量的影响

图 5 为 2 m 压力水头下,各容重等级的土壤水分累计入渗量随时间的变化关系。可以看出,入渗量随时间的变化关系近似为线性关系,分别对其进行拟合发现,容重 γ 分别为 1.20、1.30、1.40 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的趋势线斜率分别为 78.994、61.984、40.443,对应的相关系数分别为 0.9949、0.9898、0.9914,均为高度相关。说明入渗量与时间的变化关系为线性增函数,微润管在各种容重的土壤中均为均匀出流,且在该水头下三种容重水平的入渗率分别为 78.994、61.984、40.443 $\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。土壤容重越大,水分入渗越慢,这与以往的研究结果一致。

出现以上规律的原因在于,土壤孔隙是土壤水分运动的空间,孔隙度的大小直接影响着土壤的导水特性。大孔隙是水分流动的主要通道,水分的移动能力、运动状态受土壤较大尺度孔隙含量及分布状况的直接影响。土壤的孔隙度是土壤容重的函数,因此土壤容重就成为影响土壤导水特性的重要因素^[15-16]。容重越大,土壤被压实地越紧密,内部的孔隙率,尤其是大孔隙率越小,水分在土壤中的运动通道越小,入渗受阻,故入渗率减小。

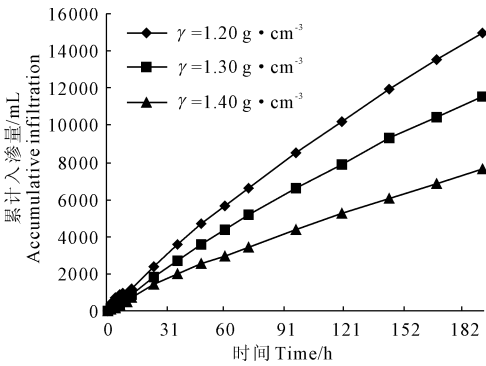


图 5 不同土壤容重下累计入渗量随时间变化
Fig.5 Change of accumulative infiltration with time under different soil bulk density

2.3 土壤容重对湿润锋形状的影响

与传统滴灌表现出来的上小下大型不同,微润灌的湿润锋是以微润管为中心的近似圆形,如图 6 为容重 $\gamma = 1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时湿润锋随时间的变化图,说明湿润体是以微润管为中心的近似圆柱体。从图中可以看出,随着灌水时间的延长,湿润体横剖面的半径在不断增大,但相同时间内湿润半径增大的幅

度在不断减小,即湿润锋的扩展速度在减缓。灌水结束时,水平运移距离与垂直向下运移距离相差较小,但均大于垂直向上运移距离,且土壤容重分别为 1.20、1.30、1.40 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的垂直向下运移距离比垂直向上运移距离分别大 8.28%、6.00%、3.10%。

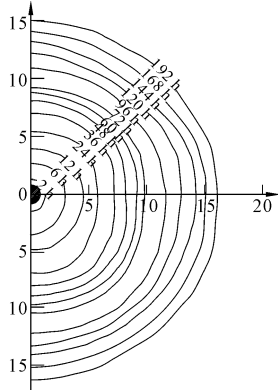


图 6 不同时刻的湿润锋/cm
Fig.6 Wetting front of different time

湿润锋形状为近似圆形,说明微润灌溉过程为典型的非饱和土壤入渗过程,土壤基质势在水分入渗时起到决定性作用。灌水结束时湿润锋的运移仍未停止,此结论区别于谢香文等^[17]的试验结果,即在灌水 10 d 后,湿润锋基本停止发展,这可能是因为水源中杂质堵塞微润管微孔所致。不同方向运移距离出现差异,且该差异随容重的增大而减小,则是因为除土壤基质势外,重力对水分在土壤中的运移过程也有一定的作用,湿润锋的运移过程在二者彼此消长中进行。随着土壤容重的增加,基质势在水分入渗过程中所起的作用相对越来越大,相反重力的作用相对越来越小,故各方向运移距离之间的差异呈减小趋势。

2.4 土壤容重对湿润锋运移距离及速率的影响

通过图 7 不难看出,随时间推移,湿润锋运移距离均呈增大趋势。随着土壤容重的增大,湿润体的范围逐渐减小,同一时刻各方向的湿润锋运移距离在逐渐减小,说明土壤容重越大,湿润锋运移速率越慢,这是因为土壤水分入渗过程中大孔隙及传导孔隙是水分流动的主要通道^[18],而土壤容重是反映土壤紧密程度的一个重要指标,它直接影响着土壤的孔隙状况^[19]。随着土壤容重的增大,土壤团粒结构变得紧密,内部空隙减小,阻碍了水分在空隙中的入渗,故湿润锋的运移速率减慢。而根据宋自影等^[20]的研究,土壤容重越大,水分入渗的速度越慢,进而导致土壤内部的压力值变化也比较慢,即压力差越小,推动湿润锋运移的驱动力减小,也使得运移速率

降低。此结论与薛万来等^[3]的研究结果一致。

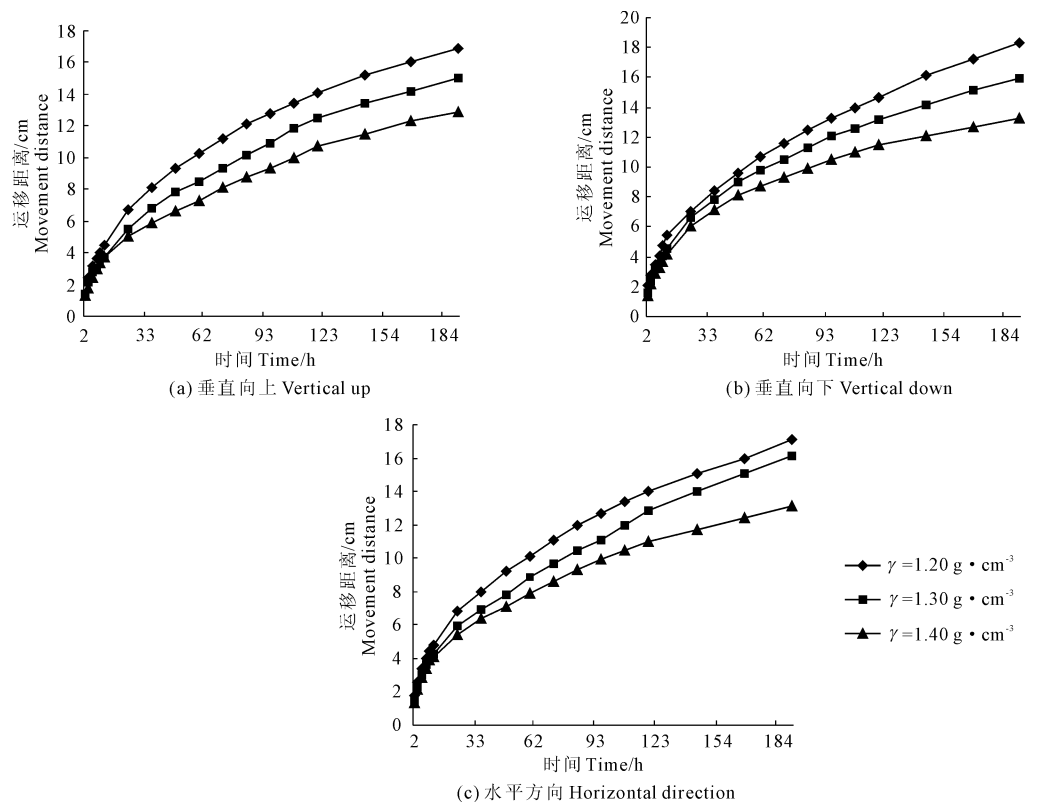


图 7 不同方向湿润锋运移距离随时间变化

Fig.7 Change of wetting front's movement distance of different direction with time

各土壤容重下的不同方向湿润锋运移距离与时间 t 的关系均近似为幂函数关系,即 X 与 t 、 Y^+ 与 t 符合 $X = at^b$ 、 $Y^+ = at^b$,其中 a 为入渗系数,表征的是湿润锋在首个单位时间末的运移距离, b 为入渗指数。对各曲线进行拟合,发现二者高度相关,拟合

结果见表 1。各方向的入渗系数 a 均随着容重的增大而减小,而入渗指数 b 则无明显变化,且基本稳定在 0.5 左右。这为微润灌溉系统的参数设计提供了理论依据。

表 1 湿润锋运移距离与时间的拟合结果

Table 1 Fitting result of wetting front movement distance with time

土壤容重/(g·cm ⁻³) Soil bulk density	Y ⁺			Y ⁻			X		
	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
1.20	1.1591	0.5062	0.9823	1.5364	0.4734	0.9982	1.3985	0.4828	0.9975
1.30	1.0874	0.4953	0.9967	1.2800	0.4912	0.9949	1.1693	0.4996	0.9933
1.40	1.0182	0.4845	0.9941	1.1925	0.4768	0.9897	1.1555	0.4715	0.9879

对以上拟合结果进行求导,即得到水分在不同容重土壤中的运移速率与时间的变化关系,如图 8 为垂直向下方向的湿润锋运移速率与时间的变化关系图。可以看出,运移速率与时间 t 仍为幂函数关系,但为减函数,说明湿润锋的运移速率均随时间逐渐减小。这是因为在入渗初期,湿润半径较小,湿润锋处土壤含水率较高,湿润锋两侧水势梯度较大,水吸力大,湿润锋推进速率较快;随着灌水时间的推

移,湿润半径越来越大,湿润锋处的土壤含水率却越来越小,其两侧水势梯度相应减小,水吸力小,故湿润锋推进速率减慢。

湿润锋推进速率在灌水约 10 h 前变化明显,灌水约 40 h 后运移速率均下降到 $0.1 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下。三个容重水平的运移速率有: $1.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} > 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} > 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,但总体相差不大,初始推进速率依次为 0.7273 、 0.6287 、 $0.5686 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

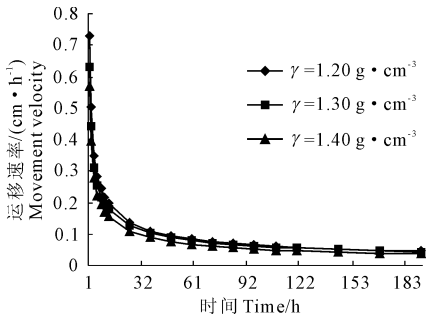
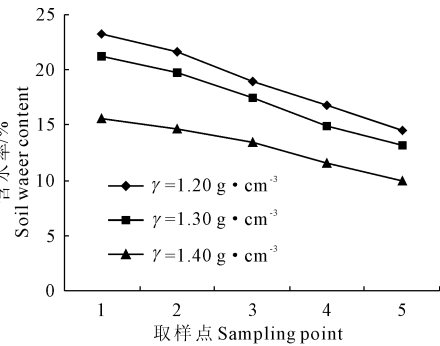


图 8 湿润锋运移速率随时间变化

Fig.8 Change of wetting front's movement velocity with time

2.5 容重对土壤水分分布的影响

各方向土壤含水率的分布情况大致相同,如图 9 为三个容重水平的土样在灌水结束时垂直向下方向的土壤含水率分布图。可以看出,从微润管附近到湿润锋,土壤含水率均随运移距离的增大呈线性下降趋势,且保持在 9%~24%之间,说明土壤含水率与运移距离之间有着良好的线性负相关关系。土壤容重越大,同一取样点的含水率越小。这也说明,随着土壤容重的增大,水分在土壤中的入渗越来越困难,同时土壤对水分的蓄持能力越来越弱,这与李卓、吴普特等^[21]的研究结果一致。



注:1~5 依次为从微润管附近到湿润锋处等间距的 5 个取样点。
Note: 1~5 are the five equidistant sampling points from nearby moistube to wetting front one by one.

图 9 不同容重土壤含水率分布

Fig.9 Distribution of water content under different soil bulk density

作为衡量灌水质量的重要指标,灌水均匀性常用于评价灌溉系统的优劣,一般采用克里斯琴森(Christiansen)均匀系数来评价土壤水分的灌水均匀性,即:

$$C_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_i - \bar{\theta}|}{n\bar{\theta}}$$

其中, C_u 为灌水均匀系数; θ_i 为单个取样点的土壤含水率; $\bar{\theta}$ 为平均土壤含水率; n 为取样点个数。

三种容重条件下灌水均匀系数的计算结果如表 2。

表 2 土壤含水率及灌水均匀系数

Table 2 Soil water content and irrigation homogeneity

土壤容重 /(g·cm ⁻³) Soil bulk density	土壤含水率/% Soil water content			均匀系数 C_u Homogeneity
	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Average	
1.20	23.90	14.54	18.61	0.862
1.30	21.83	12.50	17.11	0.845
1.40	16.34	9.06	12.80	0.851

根据现行《节水灌溉技术规范》^[22]中的规定, C_u 须满足 $C_u > 70\%$, 从上表可知,微润灌溉系统符合灌水均匀性要求。

除灌水均匀度外,还可利用配水均匀度 D_u 来评价灌溉水在田间的实际均匀状态。灌水均匀度是设计时拟定的值,而配水均匀度才是灌溉系统的后验值,且配水均匀度更加重视最不利灌水处土壤水分分布状况的评价,对作物生长的影响更大,对农业生产活动的意义也更明显^[23]。其计算公式为:

$$D_u = 100\% \times \frac{\bar{\theta}'}{\bar{\theta}}$$

式中, $\bar{\theta}'$ 为各取样点含水率值中占取样数目 1/4 的低值平均数; $\bar{\theta}$ 为平均土壤含水率。

经计算,土壤容重为 1.20、1.30、1.40 g·cm⁻³ 的配水均匀度分别为 80.5%、77.6%、77.9%。

3 讨论与结论

自微润灌溉技术提出以来,不少专家、学者对其进行了不同方面的试验研究,本文通过室内试验,探究微润灌溉条件下水分在不同压力下的入渗情况,测定累计入渗量、湿润锋和土壤含水率在不同土壤容重条件下的异同,得出以下主要结论:

1) 微润管在空气出流情况下的流量 q 与压力水头 h 为线性增函数,且二者之间关系为 $q = 110.16h + 30.2$,这与朱燕翔^[24]、祁世磊^[25]等的结论基本一致,但不同于窦超银等^[26]的结论,即微润管的流量与压力水头为幂函数关系,且二者关系为 $q = 130.4H^{0.84}$,此结论尚需进一步的试验验证。微润管在地理条件下的流量与压力水头呈线性正相关关系,相同水头下,其在空气中的流量要明显大于地理流量。以往研究认为,流态指数反映了灌水器内水流的流态,较小的流态指数有利于提高灌溉系统的灌水均匀度和降低系统造价。综合以上两种结果,微润灌灌水器的流态指数要略大于其他灌水器,但这并未影响微润灌溉技术优良的节水性能。

2) 不同土壤容重条件下,水分累积入渗量与时间的变化关系为线性增函数,且土壤容重越大,水分

入渗越慢。湿润锋水平运移距离与垂直向下运移距离相差较小,但均大于垂直向上运移距离,重力对水分在土壤中的运移过程有一定的作用,但随着土壤容重的增加,该作用逐渐减小;土壤容重越大,湿润锋运移越慢,各土壤容重下的不同方向湿润锋运移距离与时间 t 的关系均近似为幂函数关系,入渗指数约为 0.5;灌水约 10 h 前湿润锋运移速率下降较快,约 40 h 后运移速率下降到 $0.1\text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下。从微润管附近到湿润锋,土壤含水率均随湿润半径呈线性下降趋势;土壤容重越大,同一取样点的含水率越小;微润灌溉系统的灌水均匀性符合相关规定。

参 考 文 献:

[1] 何玉琴,成自勇,张 芮,等.不同微润灌溉处理对玉米生长和产量的影响[J]. 华南农业大学学报,2012,33(4):566-569.

[2] 邱照宁,江培福,肖 娟,等.微润管空气出流及制造偏差试验研究[J]. 节水灌溉,2015,(3):12-14.

[3] 薛万来,牛文全,罗春艳,等.微润灌溉土壤湿润体运移模型研究[J]. 水土保持学报,2014,28(4):49-54.

[4] 吕 刚,吴祥云.土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报,2008,24(7):494-499.

[5] 牛文全,张 俊,张琳琳,等.埋深与压力对微润灌湿润体水分运移的影响[J]. 农业机械学报,2013,44(12):128-134.

[6] 李 卓,吴普特,冯 浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报,2009,25(6):40-45.

[7] Bhatnagar P R, Chauhan H S. Soil water movement under single surface trickle source[J]. Agricultural Water Management, 2008,95(7):799-808.

[8] Gardenas A I, Hopmans J W, Hanson B R, et al. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2005,74(3):219-242.

[9] Maziar M. Kandelous, Jiří Řimůnek J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS – 2D[J]. Agricultural Water Management, 2010,97(7):1070-1076.

[10] Neelam Patel. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion[J]. Transactions of the CSAE, 2008,95(12):1335-1349.

[11] 张 俊,牛文全,张琳琳,等.微润灌溉线源入渗湿润体特性试验研究[J]. 中国水土保持科学,2012,10(6):32-38.

[12] 张 琛,朱德兰,李岚斌,等.星形微管灌水器水力性能试验研究[J]. 节水灌溉,2010,(8):11-17.

[13] 马娟娟,孙西欢,李占斌.入渗水头对土壤入渗参数的影响[J]. 灌溉排水学报,2004,23(5):53-55.

[14] 李海燕.供水压力对地下点源水分入渗过程的影响研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2007,5(4):301-304.

[15] 吕殿青,邵明安,潘 云.容重变化与土壤水分特征的依赖关系研究[J]. 水土保持学报,2009,23(3):209-216.

[16] 吴继强,张建丰,高 瑞.大孔隙对土壤水分入渗特性影响的物理模拟试验[J]. 农业工程学报,2009,25(10):13-18.

[17] 谢香文,祁世磊,刘国宏,等.地理微润管入渗试验研究[J]. 新疆农业科学,2014,51(12):2201-2205.

[18] 傅 斌,王玉宽,朱 波,等.紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(7):39-43.

[19] 赵勇钢,赵世伟,曹丽花,等.半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(6):14-20.

[20] 宋自影,王 飞.水分入渗对土壤内部综合压力影响的试验研究[J]. 农机化研究,2012,(7):191-195.

[21] 李 卓,吴普特,冯 浩,等.容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报,2010,47(4):611-620.

[22] 李英能,黄修桥,沈秀英,等.SL207-98.节水灌溉工程技术规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,1998.

[23] 宰松梅,仵 峰,温 季,等.大田地下滴灌土壤水分分布均匀度评价方法[J]. 农业工程学报,2009,25(12):51-57.

[24] 朱燕翔,王新坤,程 岩,等.半透膜微润管水力性能试验的研究[J]. 中国农村水利水电,2015,(5):23-30.

[25] 祁世磊,谢香文,邱秀云,等.低压微润带出流与入渗试验研究[J]. 灌溉排水学报,2013,32(2):90-92.

[26] 窦超银,李春龙,李光永,等.吸力式微润灌水器水力特性试验研究[J]. 灌溉排水学报,2012,31(4):83-86.

(上接第 27 页)

[12] 杨海君,谭周进,肖启明,等.假单胞菌的生物防治作用研究[J]. 中国生态农业学报,2004,12(3):158-161.

[13] 王 婧,逢焕成,李玉义,等.微生物菌肥对盐渍土壤微生物区系和食葵产量的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(11):2186-2191.

[14] 熊明彪,何建平,宋光煜.根分泌物对根际微生物生态分布的影响[J]. 土壤通报,2002,33(2):145-148.

[15] Richard D Bardgett, Roger D Lovell, Phil J Hobbs, et al. Seasonal changes in soil microbial communities along a fertility gradient of temperate grasslands[J]. Biology and Biochemistry, 1999,31(7):1021-1030.

[16] 王曙光,侯彦林.尿素肥斑扩散对土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态学报,2004,24(10):2269-2274.

[17] 林学政,陈靠山,何培青,等.种植盐地碱蓬改良滨海盐渍土对土壤微生物区系的影响[J]. 生态学报,2006,26(3):801-807.

[18] 李琼芳.不同连作年限麦冬根际微生物区系动态研究[J]. 土壤通报,2006,37(3):563-565.

[19] Pilar Flores, Micaela Carvajal, Antonio Cerdá, et al. Salinity and ammonium/nitrate interactions on tomato plant development, nutrition, and metabolites[J]. Journal of Plant Nutrition, 2001,24(10):1561-1573.

[20] Badr A. Albassam. Effect of nitrate nutrition on growth and nitrogen assimilation of pearl millet exposed to sodium chloride stress[J]. Journal of Plant Nutrition, 2001,24(9):1325-1335.

[21] 黄国勤,王兴祥,钱海燕,等.施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J]. 生态环境,2004,13(4):656-660.