

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.021

# 埋深与压力对微润灌湿润体水分运移的影响\*

牛文全<sup>1</sup> 张俊<sup>2</sup> 张琳琳<sup>3</sup> 薛万来<sup>3</sup> 张乐涛<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 陕西省土地工程建设集团, 西安 710075;

3. 中科院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为探明微润灌土壤湿润体特性, 设置5个不同埋深, 6个不同压力水头, 通过室内土箱试验研究了微润灌土壤水分运动规律。结果表明: 压力水头是决定微润灌流量的重要因素; 微润带埋深显著影响土壤湿润体的形状, 湿润锋水平运移距离与宽深比 $\gamma$ 均随埋深的增大而减小, 垂直运移距离随埋深的增大而略微增大; 土壤累计入渗量与埋深呈负相关关系; 累计入渗量随灌水时间的变化过程符合Kostiakov入渗模型, 建立了不同埋深累计入渗量预测模型, 并用实测值进行了验证, 实测值与预测值具有较高的相关性; 土壤湿润均匀系数与埋深呈正相关, 粘壤土微润灌最适埋深为15~20 cm。

**关键词:** 微润灌溉 压力水头 埋深 湿润锋 土壤水分

**中图分类号:** S274.2; S275.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0128-07

## Effects of Buried Depth and Pressure Head on Water Movement of Wetted Soil during Moistube-irrigation

Niu Wenquan<sup>1</sup> Zhang Jun<sup>2</sup> Zhang Linlin<sup>3</sup> Xue Wanlai<sup>3</sup> Zhang Letao<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Shaanxi Land Construction Group, Xi'an 710075, China

3. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China )

**Abstract:** In order to research the characteristics of wetted soil under moistube-irrigation, five different buried depths and six different pressure heads were designed to investigate soil water movement through indoor soil box experiments. The results revealed that the pressure was the key factor to decide the moistube-irrigation flow, and the buried depths of moistube-belt had significant effect on the shape of wetted soil. The horizontal migration distance and ratio of width to depth of  $\gamma$  decreased with the increase of buried depths and vertical migration distance slightly increased with the increase of buried depths. There was a negative correlation between cumulative infiltration and buried depths and changing process of infiltration with irrigation time was accorded with Kostiakov infiltration model. The simulation model of cumulative infiltration under different buried depths was established and tested with measured values. The results showed that the experimental equation of infiltration had a high correlation coefficient between the measured value and the calculated value. There was a positive correlation between soil moisture uniformity and buried depth, and the suitable buried depths of clay loam of moistube-irrigation were between 15 and 20 cm.

**Key words:** Moistube-irrigation Pressure head Buried depth Wetting front Soil moisture

### 引言

微润灌是一种高效灌溉技术, 其利用半透膜作

为灌溉输水管, 通过地理方式将灌溉用水缓慢释放到作物根区土壤中, 供作物吸收利用<sup>[1-2]</sup>。与地面滴灌技术相比, 微润灌具有节水效果明显、改善作物

收稿日期: 2013-02-26 修回日期: 2013-05-02

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100507)和高等学校学科创新引智计划资助项目(B12007)

作者简介: 牛文全, 教授, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用与节水灌溉理论研究, E-mail: nwq@vip.sina.com

根区土壤环境、运行成本低、抗堵塞性能强等优点,适宜旱区作物的用水需求<sup>[3-4]</sup>。近年来,微润灌技术在沙漠地带、草坪以及花卉等诸多领域中得以广泛应用。然而,作为灌水新技术,微润灌尚缺乏完整的灌溉制度及灌溉参数。

土壤参数、水力参数及灌水器布设方式是灌溉条件下土壤水分运移特征的影响因素<sup>[5-6]</sup>,相关参数的研究可为灌溉制度的确定提供参考依据。其中,土壤物理性质(质地、容积密度、初始含水率等)对湿润体特性有重要影响,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<sup>[7-8]</sup>;初始含水率是土水势的决定因素,以往研究主要从土壤水分传输速度和水土势梯度角度出发,证实了初始含水率对土壤入渗特征具有显著影响<sup>[9-10]</sup>。然而,灌水器埋深直接影响作物根系对土壤水分、养分的吸收,是土壤湿润体与作物根系有效匹配、实现灌溉系统优化运行的关键因素<sup>[11-12]</sup>。但相关研究多见于滴灌领域,Lamm、Camp 等认为毛管埋深需与土壤条件、作物根系深度、耕作要求相适应<sup>[13-14]</sup>;马孝义等研究表明埋深与滴灌灌水均匀性关系密切<sup>[15]</sup>;李道西等通过砂壤土模拟试验认为地下滴灌的最适埋深为 20 cm<sup>[16]</sup>。此外,压力是控制灌水量的重要水力参数,在地下滴灌领域中亦有大量研究<sup>[17-18]</sup>。

微润灌作为线源续灌入渗方式,目前其灌溉参数的相关研究较少,基于灌溉机理的不同,埋深与压力对微润灌和滴灌条件下土壤水分分布的影响可能有所差异。因此,本文以室内土箱试验为依据,试图阐明埋深与压力对微润灌土壤水分分布的影响,以为微润灌设计提供理论支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤

试验于 2012 年 3~9 月在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院进行,该区地理位置为东经 108°,北纬 34°,属典型的温带大陆性半湿润气候区。试验土壤取自陕西省杨凌区渭河三级阶地,土壤类型为壤土,取土深度为从表层至 40 cm,将取得不同深度的土壤风干、碾压、均匀混合,过 2 mm 筛后制成室内试验土样。按国际制土壤分类方法,供试土壤为粘壤土,土壤颗粒组成采用 MS2000 型激光分析粒度仪(英国马尔文公司)测定,其中粒径范围  $0.02 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$ 、 $0.002 \text{ mm} < d \leq 0.02 \text{ mm}$  和  $d \leq 0.002 \text{ mm}$  分别占 32.064%、56.088% 和 11.848%,土壤容积密度为  $1.35 \text{ g/cm}^3$ ,田间持水量为  $0.236 \text{ g/g}$ ,饱和含水率为 39%。

### 1.2 试验装置

试验装置(图 1)由土槽和供水装置两部分组成,土槽采用 10 mm 有机玻璃制作,规格(长×高×宽)为 120 cm×50 cm×50 cm,土槽两侧有直径为 25 mm 的对称小孔(离土箱上边沿 250 mm,侧边沿 15 mm)。为便于观测湿润锋形状及变化过程,根据线源入渗湿润体对称性,选取湿润体的 1/2 作为观测对象,正面观测湿润体总剖面水分分布变化,侧面观测湿润锋横截面轮廓的变化。微润带为双层结构,内层为特制半透膜(厚度 0.06 mm),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 万个/cm<sup>2</sup>;外层为无纺布保护层,增加微润带强度,以防止在铺设过程中造成微润带的划伤,微润带直径为 25 mm(图 2)。利用马氏瓶进行自动连续供水,马氏瓶横截面积为 25 cm<sup>2</sup>,试验中通过调节马氏瓶活动支架高度控制供水压力。在土层表面覆膜以抑制土壤水分的蒸发。

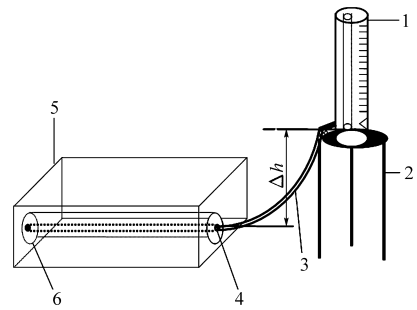


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental equipment

1. 马氏瓶 2. 活动支架 3. 橡胶软管 4. 微润带 5. 玻璃土槽
6. 湿润体

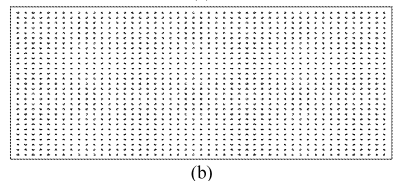
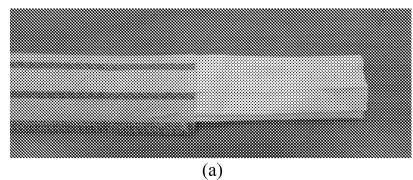


图 2 微润带示意图

Fig. 2 Moistube enviro-grower

- (a) 微润带 (b) 半透膜微孔示意图

### 1.3 试验方法及测定指标

埋深设置 5 个水平,分别为 0、5、10、15、20 cm,压力水头均为 1.8 m,试验装土控制容积密度均为  $1.35 \text{ g/cm}^3$ ,土壤自然风干,含水率为 2.9%。装箱时分层装土,层厚 5 cm,层间打毛,便于充分接触。试验中,记录不同时刻湿润锋纵横轮廓线和马氏瓶

水位线。微润带充水埋土后,立即开始用秒表记录灌水时间,1 h内每隔0.5 h测定1次湿润锋和马氏瓶水位刻度,2~6 h内每隔1 h记录1次,6~12 h内每隔2 h记录1次,随后记录时间间隔逐渐增大,夜间间隔较长。马氏瓶水位低于10 cm时添水至60 cm刻度线处。受土槽几何尺寸影响,当湿润锋垂直深度达到20 cm时,停止供水,计算总灌水量和总灌水时间。试验结束后,立即用1 cm土钻取样,取样点距管带水平距离为5 cm处,取样深度间隔为5 cm,从表层直至湿润体底部,取多个横剖面,用干燥法测定土壤含水率。

压力水头设置6个水平,分别为0.4、0.8、1.2、1.6、2.0、2.4 m,试验时间为1 d,微润带充水直接放置于土壤中,管带埋深为15 cm,每隔4 h测定1次马氏瓶的水位刻度。

采用克里斯琴森均匀系数计算微润灌水均匀度,计算式为

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

式中  $C_u$ ——灌水均匀系数

$\bar{\theta}$ ——平均土壤含水率, %

$\theta_i$ ——第  $i$  个取样点的土壤含水率, %

$n$ ——取样点个数

本试验各处理均重复3次,试验数据取其平均值,采用SPSS对数据进行分析,Excel作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 压力对出流量的影响

根据试验数据计算不同压力下同一灌水时间的平均单位流量  $Q$ ,得到压力水头与流量关系曲线,如图3所示。

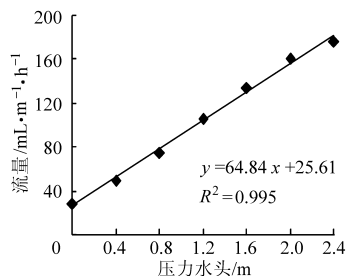


图3 微润灌溉压力水头与流量的关系曲线

Fig.3 Effect of pressure heads on discharge of miostube-irrigation

从图3可以看出:在0~2.4 m压力水头范围内,微润带流量微小,室内均质土壤初始条件相同条件下,压力水头的变化成为流量的关键控制因素,微润带流量随压力水头的增加呈线性增加趋势,压力

水头对微润灌流量影响显著,表明微润灌与其他有压灌溉技术一样,压力水头是流量的主要驱动力<sup>[19]</sup>,并根据马氏瓶刻度实测值得出均质粘壤土压力水头-流量关系为

$$Q = 64.84H + 25.61 \quad (R^2 = 0.995) \quad (2)$$

式中  $Q$ ——微润带流量, mL/(m·h)

$H$ ——压力水头, m

压力水头对土壤水分入渗的影响主要表现为随着压力水头的增大入渗界面的压力势增大,入渗速率也随之增大;随着压力水头的增大,土壤入渗界面承受的压力增大,导致入渗界面土壤结构发生变化,该区域饱和导水率发生变化,从而影响灌溉系统中水流量的不同<sup>[20]</sup>。因此,根据粘壤土微润灌压力水头与流量关系,湿润体体积可通过压力调节进行调整,若作物根系较小时,可选用较小的工作压力,形成较小的湿润体,实现节水目的;随着作物生长,可以调节压力水位,提升流量,使作物根系总是处于湿润体范围内。

由以上的分析可知,压力水头是决定微润灌流量的关键性控制参数。微润灌工作压力较小,流量与压力呈显著线性关系,压力水头和土壤压力势是微润灌流量的驱动因子。首先,压力水头通过影响入渗界面处的饱和导水率和势梯度而改变土壤入渗系数,从而改变入渗界面处的水分运动通量<sup>[21]</sup>;其次,不同压力水头作用会引起土壤表层孔隙度和表层土壤容积密度的变化,土壤结构改变土壤的压力势,半透膜内外水势梯度变化直接驱动微润带流量;微润灌半透膜的特殊结构决定了出流量与周围土壤含水率具有动态响应特性,土壤压力势对流量大小有影响作用。上述微润灌流量参数论证表明压力水头和土壤压力势是流量的控制因素,这与郭向红等<sup>[22]</sup>蓄水坑灌法的研究结果基本一致,主要由于两种灌溉条件下的入渗界面特征基本相同。因此,在农业生产实践中可根据压力水头的调节而实现微润灌流量的调整。

### 2.2 埋深对累计入渗量的影响

图4为不同埋深条件下土壤累计入渗量在灌水60 h内随时间的变化过程。

由图4可知,埋深对微润灌土壤累计入渗量和入渗率具有明显的作用。相同灌溉时间内,地埋微润带的累计入渗量远高于地面铺设微润带,但累计入渗量随埋深的增大而减小。灌水30 h后,埋深为5 cm的微润灌累计入渗量比埋深10 cm的大5.8%,埋深10 cm的比15 cm的大21%,埋深15 cm的累计入渗量比埋深20 cm的大19.4%。不同埋深流量分别为86.4、198.2、185.9、153.7、119.6 mL/(m·h)。

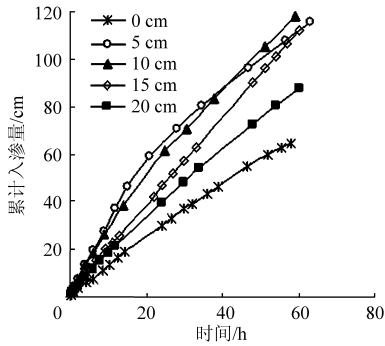


图 4 不同埋深下累计入渗量与灌水时间的关系曲线  
Fig. 4 Cumulative infiltration curves vs time with different burying depths

地表铺设微润灌累计入渗量明显小于埋深方式。充分表明土壤压力势对微润带流量也有非常大的影响,土壤压力势提高了微润带的流量,使埋入土壤的微润带流量大于放置于空气中的微润带流量;但随着埋深的增大,土壤压力势不会发生显著变化,而土壤压力对微润带的固持力增大,从而增大了微润带出流阻力,流量减小、则累计入渗量减小。

此外,图 4 还反映出不同埋深下累计入渗量曲线存在交汇现象,分别发生于埋深 5 cm 与 10 cm 的 43 h 处以及埋深 5 cm 与 15 cm 的 60 h 处。这主要是由微润带上方区域达到表层湿润的时间不同造成的,浅埋深湿润锋在土表湿润后,微润灌根据土壤含水率而调节出流量,累计入渗量有所下降;埋深较大时,达到表层湿润的时间较长,因此累计入渗量变化呈交汇趋势。

表 1 影响因素回归分析

Tab. 1 Regression analysis of factors

自变量	回归参数	均方差	标准化系数	t 值检验	单因子显著性	F 值检验	回归方程显著性	决定系数 R <sup>2</sup>
ln <i>t</i>	0.847	0.516	0.986	71.572	<0.001	2 605.273 1	<0.001	0.994
ln <i>d</i>	-0.324	1.46	-0.133	-9.64	<0.001			

式(4)可作为不同埋深不同时刻累计入渗量预测模型,根据灌溉系统中设计的埋深 *d*,代入 *t* 值即可得到入渗量的预测值为了分析量。将所计算的预测值和实测值用直线方程进行拟合,如图 6 所示。由此可以看出,对应数据点均落于 1:1 线附近,因此该模型对不同埋深累计入渗量预测具有较高的精度,可用此经验公式计算粘壤土微润灌参数。

### 2.3 埋深对湿润体形状及湿润锋运移的影响

不同埋深下灌水 6、12、24 和 48 h 时,湿润锋水平和垂直运移距离,如图 7 所示。

从图 7 可以看出,微润灌土壤湿润锋垂直运移距离和水平运移距离随时间变化不同。灌水 6 h 后,埋深 0 cm 和 5 cm 的湿润锋水平运移距离大于垂直运移距离,埋深大于 5 cm 的垂直运移距离大于

不同埋深条件下累计入渗量与时间变化关系呈显著相关性(图 5),且拟合关系符合 Kostiakov 入渗模型,入渗指数  $\alpha$  约为 0.847,随管带埋深变化幅度不大,其变幅绝对值小于 8.75%;入渗系数  $k$  约为 2.95。

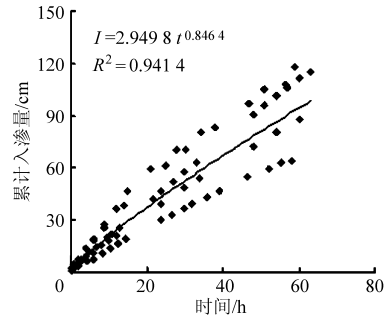


图 5 累计入渗量与时间的关系

Fig. 5 Relationship between cumulative infiltration and time

采用 SPSS 多元逐步回归分析法建立回归方程为

$$\ln I = 0.847 \ln t - 0.324 \ln d + 2.002 \quad (n = 61, R^2 = 0.994, \text{sig 小于 } 0.001) \quad (3)$$

对式(3)进行化简,得

$$I = 7.40 t^{0.847} d^{-0.324} \quad (4)$$

式中  $I$ ——累计入渗量,cm

$t$ ——灌水时间,h  $d$ ——埋深,cm

对式(3)回归分析(表 1)表明:累计入渗量  $I$  受到埋深  $d$  和时间  $t$  的共同作用, $t$  为正影响作用, $d$  为负影响作用, $I$  受  $t$  的影响比  $d$  显著,并且  $t$  和  $d$  间不存在多重线性关系。

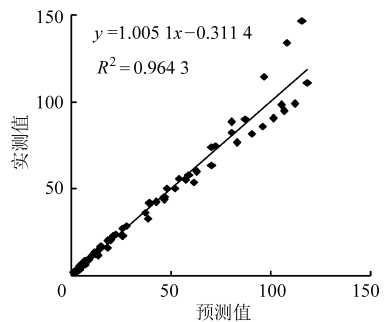


图 6 实测值和预测值的比较

Fig. 6 Comparison of calculated value and measured value

水平运移距离。12 h 后,低埋深 ( $d \leq 5$  cm) 垂直运移距离和水平运移距离差值缩小,高埋深 ( $d \geq 10$  cm) 垂直与水平距离差值增大。随着时间的延长,垂向扩

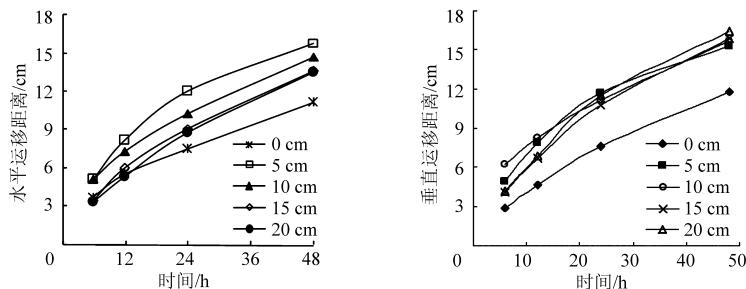


图7 不同埋深条件下湿润锋运移距离与灌水时间的关系曲线

Fig. 7 Changes of wetting front under different burying depth

散速率逐渐变大,灌水48 h后,垂直运移距离均大于水平运移距离。湿润锋宽深比 $\gamma$ (水平运移距离和垂直运移距离之比)可作为湿润体形状的判别依据, $\gamma$ 随埋深的增大而逐渐减小,当 $d=5$  cm时, $\gamma$ 约为1,即水平和垂直运移距离基本相等,湿润体剖面呈圆形;当 $d\geq 10$  cm时, $\gamma$ 逐渐变小,即水平距离小于垂直距离,湿润体呈椭圆形。

在同一控制灌水时间内,随埋深的增加,湿润体水平运移距离逐渐减小,垂直运移距离略微增大,埋深为5 cm时,地表最早出现湿润锋,然而随埋深的增大,表层出现湿润锋的时间逐渐推迟(埋深5、10 cm出现的时间为6.1、19.5 h),埋深增大时表层不出现湿润锋(20 cm埋深在试验结束未出现表层湿润)。

总体而言,微润带地理方式下湿润体体积明显大于地表铺设湿润体体积;埋深对湿润锋垂直运移距离影响较小,随着灌水时间的延长,不同埋深的湿润锋垂直运移距离趋于一致;埋深对湿润锋水平距离影响较垂直距离大,随之埋深增大,水平运移距离较小,主要是由于埋深越大,微润带流量越小的原因。本研究中水平距离随埋深变化规律与任杰等<sup>[23]</sup>和庄千燕等<sup>[24]</sup>研究的埋深对地下滴灌结论一致,主要由于埋深变大引起土壤承载力增大,土壤孔隙度减小、基质势能减小所致。而重力势的增大致使垂直运移距离逐增,而微润带半透膜对土壤含水率的响应与之同时起效,因此垂直运距随埋深变化不大。

#### 2.4 埋深对湿润体水分分布及均匀性的影响

埋深对湿润体不同土层深度水分分布产生一定影响<sup>[25]</sup>。在灌水60 h后,不同管带埋深下粘壤土含水率的垂直分布(0~30 cm)规律如图8所示,图中以土壤表层为零界面。

从图8可知,微润灌不同埋深下土壤含水率垂直分布存在明显差异,在微润带附近含水率出现最大值,向湿润体四周逐渐降低,其中埋深0、5 cm的含水率在土层30 cm深处均和供试土壤含水率接近。以微润带为中心点,水平两侧相同距离土壤含

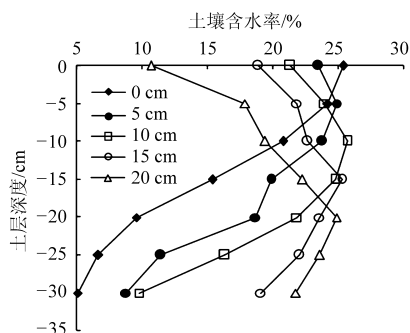


图8 不同埋深下土壤含水率的垂直分布

Fig. 8 Vertical distribution of soil moisture under different burying depths

水率基本对称(图中只出现一侧),距管带相同距离,下方含水率高于上方。土壤湿润圈随埋深同步下移,随埋深增大,表土湿润范围减小。可控灌溉时间48 h内,埋深为0、5、10 cm时表层达到湿润时间分别为0、6.1、19.5 h,并且土壤含水率达15%以上,易造成土壤表层水分无效蒸发,当埋深为15 cm时,湿润锋顶部出现在地表以下2 cm处,这足以说明管带埋深主要影响土壤水分在垂直方向上的湿润程度。

经计算,埋深0、5、10、15和20 cm湿润体平均含水率分别为16.0%、19.3%、21.5%、22.8%和20.1%。其中平均含水率最大值出现在埋深15 cm,埋深10 m次之。一般情况下,土壤湿润均匀系数基本与埋深呈正相关,而在15 cm时出现了最大值。在试验控制灌水时间60 h内,埋深15 cm均匀系数最高,0 cm最低。

通过以上分析可知,不同埋深土壤含水率垂直分布存在明显差异,并且湿润圈位置也不同,这与李淑芹等<sup>[26]</sup>研究的垂直线源灌溉结论一致。湿润体内含水率分布范围为5.0%~25.1%,不同埋深平均含水率呈增长趋势,15 cm埋深时最大。类似地下灌溉,埋入过深会导致水分深层渗漏,过浅会增加地面蒸发,并且深层根系无法吸收水分,虽然由于微润灌流量小,不存在深层渗漏问题,但是埋深影响湿润体的形状与位置,进而影响作物根系的分布和水分吸收,因此,适宜的埋深对微润灌也是非常关键的

因素。埋深在 5 ~ 15 cm 湿润体大小和位置最适合作物根系生长,然而当埋深小于 10 cm 时,土表 48 h 之内出现湿润,地表无效蒸发增大,水分利用效率降低,当埋深为 15 cm 时,湿润锋最大值出现在表层以下 3 cm 处,可有效防止地表无效蒸发,另外,当埋深为 15 cm 和 20 cm 时,微润带横断面湿润面的水分分布均匀度最大。

综上所述,微润灌最适埋深为应为 15 ~ 20 cm 之间,该结果与陈鹏等<sup>[27]</sup>滴灌埋深结论基本一致,可为微润灌埋深的确定提供一定理论参考。

### 3 结论

(1) 微润带流量较小,与工作压力呈线性关系,

地埋微润带流量显著大于铺设地表微润带,土壤土水势也是影响微润灌流量的重要因素。

(2) 湿润锋水平运移距离与宽深比  $\gamma$  均随埋深的增大而减小,垂直运移距离受埋深的影响较小。随着埋深的增大,土壤湿润体下移,湿润体内含水率分布均匀度提高,综合考虑地表蒸发和作物根系吸水情况,粘壤土微润灌最适埋深为 15 ~ 20 cm 之间。

(3) Kostiakov 模型能很好地表达不同埋深累计入渗量随时间变化过程,入渗系数随着埋深的增大而减小,入渗指数接近常数。

### 参 考 文 献

- 1 杨文君,田磊,杜太生,等. 半透膜节水灌溉技术的研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(6):60~63.  
Yang Wenjun, Tian Lei, Du Taisheng, et al. Research prospect of the water-saving irrigation by semi-permeable film[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2008,19(6):60~63. (in Chinese)
- 2 Petty J, Huckins J, Martin D, et al. Use of semipermeable membrane devices (SPMDS) to determine bioavailable organochlorine pesticide residues in streams receiving irrigation drainwater[J]. Chemosphere,1995,30(10):1891~1903.
- 3 Koumanov K S, Hopmans J W, Schwankl L W. Spatial and temporal distribution of root water uptake of an almond tree under microsprinkler irrigation[J]. Irrigation Science, 2006,24(4):267~278.
- 4 Gölçü M, Pancar Y Y. Sekmen energy saving in a deep well pump with splitter blade[J]. Energy Conversion and Management, 2006,47(5):638~651.
- 5 费良军,谭奇林,王文焰,等. 充分供水条件下点源入渗特性及其影响因素[J]. 水土保持学报,1999,5(2):70~74.  
Fei Liangjun, Tan Qilin, Wang Wenyan, et al. Infiltration character and influential factor of point source under adequate water supply[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation,1999,5(2):70~74. (in Chinese)
- 6 Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth[J]. Soil and Tillage Research, 2002,66(2):197~205.
- 7 张俊,牛文全,张琳琳,等. 微润灌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.  
Zhang Jun, Niu Wenquan, Zhang Linlin, et al. Experimental study on characters of wetted soil in moisture irrigation[J]. Science of Soil and Water Conservation,2012,10(6):32~38. (in Chinese)
- 8 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.  
Li Zhuo, Wu Pute, Feng Hao, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(6):40~45. (in Chinese)
- 9 牛文全,樊晓康,Zhou Xiaobo,等. 初始含水率对涌泉根灌土壤渗透特征的影响[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(4):491~496.  
Niu Wenquan, Fan Xiaokang, Zhou Xiaobo, et al. Effect of initial water content on soil infiltration characteristic during bubble irrigation [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(4):491~496. (in Chinese)
- 10 刘目兴,聂艳,于婧. 不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J]. 生态学报,2012,32(3):871~878.  
Liu Muxing, Nie Yan, Yu Jing. The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(3):871~878. (in Chinese)
- 11 张妙仙. 滴灌土壤湿润体与作物根系优化匹配研究[J]. 中国生态农业学报,2005,13(1):104~107.  
Zhang Miaoxian. Optimum matching between soil infiltration body and crop root system under trickle irrigation [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005,13(1):104~107. (in Chinese)
- 12 Patel N, Rajput T. Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato [J]. Agricultural Water Management, 2007,88(1):209~223.
- 13 Lamm F, Stone L, Manges H, et al. Optimum lateral spacing for subsurface drip-irrigated corn[J]. Transactions of the ASAE, 1997,40(4):1021~1027.
- 14 Camp C, Bauer P, Hunt P. Subsurface drip irrigation lateral spacing and management for cotton in the southeastern coastal plain [J]. Transactions of the ASAE, 1997,40(4):993~999.
- 15 马孝义,康绍忠,王凤翔,等. 果树地下滴灌灌水技术田间试验研究[J]. 西北农业大学学报,2000,28(1):57~61.
- 16 李道西,彭世彰. 地下滴灌灌水设计参数对土壤水分分布影响的计算机模拟[J]. 沈阳农业大学学报,2008,35(6):507~509.  
Li Daoxi, Peng Shizhang. Computer simulation on soil-water movement under the condition of different irrigation design parameters

- in subsurface drip irrigation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2008, 35(6):507~509. (in Chinese)
- 17 Hoogland J, Feddes R, Belmans C. Root water uptake model depending on soil water pressure head and maximum extraction rate [C]//ISHS Acta Horticultural 119: III International Symposium on Water Supply and Irrigation in the Open and under Protected Cultivation, 1981.
- 18 马娟娟, 孙西欢, 郭向红. 基于 Green-Ampt 模型的变水头积水入渗模型建立及其参数求解[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 61~67.  
Ma Juanjuan, Sun Xihuan, Guo Xianghong. Varying head infiltration model based on Green-Ampt model and solution to its key parameters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(1):61~67. (in Chinese)
- 19 马娟娟, 孙西欢, 李占斌. 单坑变水头入渗条件下均质土壤水分运动的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6):205~207.  
Ma Juanjuan, Sun Xihuan, Li Zhanbin. Numerical simulation of homogenous soil moisture movement under varying-head infiltration of single water storage pit[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6): 205~207. (in Chinese)
- 20 王锐, 孙西欢, 郭向红, 等. 不同入渗水头条件下土壤水分运动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9):45~49.  
Wang Rui, Sun Xihuan, Guo Xianghong, et al. Numerical simulation for soil water movement at different infiltration heads[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9):45~49. (in Chinese)
- 21 马娟娟, 孙西欢, 郭向红. 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.  
Ma Juanjuan, Sun Xihuan, Guo Xianghong. Effects on soil infiltration parameters of infiltration head[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(5):53~55. (in Chinese)
- 22 郭向红, 孙西欢, 马娟娟, 等. 不同入渗水头条件下的 Green-Ampt 模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3):64~68.  
Guo Xianghong, Sun Xihuan, Ma Juanjuan, et al. Green-Ampt model of different infiltration heads[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 64~68. (in Chinese)
- 23 任杰, 王振华, 温新明, 等. 毛管埋深对地下滴灌线源入渗土壤水分运移影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5):80~82.  
Ren Jie, Wang Zhenhua, Wen Xinming, et al. Effects of capillary depth on soil water transport under line source permeation of SDI [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(5):80~82. (in Chinese)
- 24 庄千燕, 苏德荣, 宋雪枫, 等. 滴头埋设深度对土壤水分运移及草坪草生长的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(3):435~440.  
Zhuang Qianyan, Su Derong, Song Xuefeng, et al. Effect of emitter depth of underground drip irrigation system on soil water transportation and turfgrass growth[J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(3):435~440. (in Chinese)
- 25 何华, 康绍忠, 曹红霞. 地下滴灌埋管深度对冬小麦根冠生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 31~33.
- 26 李淑芹, 王全九. 垂直线源入渗土壤水分分布特性模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3):51~57.  
Li Shuqin, Wang Quanjiu. Simulation of soil water distribution under vertical line source infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3):51~57. (in Chinese)
- 27 陈鹏, 苏德荣. 地下滴灌对草坪土壤水分及根系分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(6):48~50.  
Chen Peng, Su Derong. Effects of subsurface drip irrigation on soil moisture and underground root distribution of turfgrass[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(6):48~50. (in Chinese)

(上接第 163 页)

- 20 Fjellerup J, Gjernes E, Hansen L K. Pyrolysis and combustion of pulverized wheat straw in a pressurized entrained flow reactor [J]. Energy & Fuels, 1996, 10(3):649~651.
- 21 Collot A G, Zhou Y, Dugwell D R, et al. Co-pyrolysis and co-gasification of coal and biomass in bench-scale fixed-bed and fluidized bed reactors [J]. Fuel, 1999, 78(6):667~679.
- 22 Roy C, Lemieux R, de Caumia B, et al. Processing of wood chips in a semicontinuous multiple-hearth vacuum-pyrolysis reactor [M]//Soltes J, Milne T A. Pyrolysis oils from biomass: producing, analyzing, and upgrading, ASC symposium series 376. 1988:16~30.
- 23 Janse A M C, de Jong X A, Prins W, et al. Heat transfer coefficient the rotating cone reactor [J]. Powder Technology, 1999, 10(6):168~175.
- 24 He Fang, Yi Weiming, Yao Fusheng, et al. Simulation of biomass pyrolysis in down flow tube reactor [C] // International Conference on Energy and Environment, Shanghai, 2003:233~238.
- 25 Colomba Di Blasi. Influence of physical properties on biomass devolatilization characteristics[J]. Fuel, 1997, 76(10):957~964.
- 26 Janse A M C, Westerhout R W J, Prins W. Modelling of flash pyrolysis of a single wood particle [J]. Chemical Engineering and Processing, 2000, 39(3):239~252.
- 27 Rath J, Steiner G, Wolfinger M G. Tar cracking from fast pyrolysis of large beech wood particles [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2002, 62(1):83~92.
- 28 Stenseng M, Jensen A, Dam-Johansen K. Investigation of biomass pyrolysis by the rmogravimetric analysis and differential scanning calorimetry[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2001, 58(4):765~780.