

# 土壤初始含水率对浑水膜孔灌自由入渗特性影响

金世杰, 费良军, 傅渝亮, 王锦辉, 钟 韵, 陈 琳

(西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

**摘要:** 为揭示土壤初始含水率对浑水膜孔灌单点源自由入渗的影响, 通过开展不同初始含水率的室内浑水膜孔灌试验, 研究了土壤初始含水率对浑水膜孔灌自由入渗特性、减渗特性以及土壤含水率分布的影响, 并建立了基于土壤初始含水率和累积入渗时间的浑水膜孔灌自由入渗模型和减渗模型。研究表明: 当浑水的含沙率和膜孔的直径一定时, 随土壤初始含水率的增大, 相同时间内的单位膜孔面积累积入渗量呈逐渐减小的趋势, 初始含水率为 4.96%, 7.43%, 10.07% 和 12.40% 的分别较风干条件下的减少了 19%, 33%, 45% 和 56%, 减渗效果明显。通过对含水率分布特征研究发现, 在靠近和远离膜孔的部位含水率变化梯度较大, 平均含水率梯度达到了 2%/cm, 而中间部位含水率变化较小, 平均含水率变化梯度仅为 0.65%/cm。

**关键词:** 初始含水率; 浑水膜孔灌; 入渗量; 减渗量

**中图分类号:** S275.8; S152.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2016)05-0235-05

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.39

## Effect of Initial Soil Moisture Content on Single-line Interference Infiltration Characteristics of Muddy Water Film Hole Irrigation

JIN Shijie, FEI Liangjun, FU Yuliang, WANG Jinhui, ZHONG Yun, CHEN Lin

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

**Abstract:** In order to reveal the effects of initial soil moisture content on the soil water infiltration property under single point of freedom muddy water film hole irrigation, the test was carried out under different initial soil moisture content. The test studied on the influence of initial soil moisture content on the infiltration characteristics, reduced infiltration characteristics and distribution of soil moisture content of single point of freedom muddy water film hole irrigation, and built film hole irrigation free irrigation model with cumulative time and permeability reducing model. The test results indicated that the infiltration capacity of per unit film hole area had decreasing trend in the same time as the increasing of the initial moisture content of the soil and the initial moisture content of 4.96%, 7.43%, 10.07% and 12.40% decreased by 19%, 33%, 45% and 56%, respectively compared with the dry conditions test. While the permeability reducing affection had increasing trend under the fixed sand percentage of muddy water and the film hole diameter. Near and far away the film hole, the gradient of water content changed in a large and it's about 2%/cm. Less change of the gradient of water content was in the middle part and it's about 0.65%/cm.

**Keywords:** initial soil content; muddy water film hole irrigation; infiltration amount; reducing quantity

膜孔灌溉技术是 20 世纪 80 年代我国引进并研究发展的一种地面灌溉技术, 黄河流域水资源紧缺, 往往需要利用浑水进行灌溉, 而浑水膜孔灌又是该流域节水灌溉的主要形式。浑水膜孔灌是充分供水下的点源入渗, 针对浑水膜孔灌的研究目前已取得了一些研究成果<sup>[1-5]</sup>; 费良军、王锦辉、钟韵等分别从泥沙粒度组成、膜孔直径、土壤容重、膜孔间距等方面进行了试验研究。在生产实践中, 由于种植作物和灌溉制度的不同, 往往需要在不同的土壤初始含水率条件下进行灌

溉, 因此在浑水膜孔灌研究中开展不同含水率下的浑水膜孔灌研究是十分必要的。研究发现土壤初始含水率是影响浑水入渗的关键因素, 是影响水分入渗、传导和改变土壤入渗速率的重要因子, 土壤初始含水量会影响土壤溶液和胶体颗粒上吸附的离子数量, 进而影响土壤的入渗特征<sup>[6]</sup>; 土壤初始含水率会对土壤基质势及湿润锋处的基质势梯度产生影响, 从而影响土壤水分的入渗<sup>[6-9]</sup>, 土壤初始含水率对水分的入渗又因土壤干密度而不同<sup>[9]</sup>。在对降雨条件下随着初始含水

收稿日期: 2016-05-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(51479161, 51279157); 国家农业公益项目(201203003-1)

第一作者: 金世杰(1990—), 男, 河南栾川人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: shijie011824@sina.com

通信作者: 费良军(1963—), 男, 陕西蓝田人, 博士, 教授, 主要从事节水灌溉、农业水资源利用与水环境研究。E-mail: feiliangjun2008@163.com

率的增加地表导水率<sup>[10]</sup>和黏黄土水分入渗能力<sup>[11]</sup>均有减小的迹象,在微咸水入渗中也出现同样情况<sup>[12]</sup>。此外,在对涌泉根灌<sup>[13]</sup>、微润灌溉<sup>[14]</sup>、地下滴灌线源入渗<sup>[15]</sup>和深层坑渗灌<sup>[16]</sup>的研究中发现,土壤初始含水率对湿润锋的运移、水分入渗均有较大影响。

土壤初始含水率是影响水分入渗的关键因素,但对不同土壤含水率条件下浑水膜孔灌点源入渗特性研究还较少。本文对不同初始含水率下的浑水膜孔灌土壤水分入渗特性进行了分析研究,以期为浑水膜孔灌理论的发展和应用奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

为了研究不同初始含水率条件下浑水膜孔灌点源入渗特性,对西安理工大学研制的膜孔灌点源入渗试验装置系统加以改进,改进的试验装置如图 1 所示,将供水装置中的马氏瓶增加搅拌系统,从而使入渗的浑水维持在恒定的含沙率。浑水膜孔灌自由入渗土箱由 10 mm 厚的有机玻璃制成,土箱长×宽×高为 24 cm×20 cm×30 cm,为便于观测入渗过程中湿润锋的运移,采用 1/4 的膜孔(如图 1)进行模拟,将膜孔置于土箱的一角,为模拟膜孔灌时的充分供水,要使水室保持一定的水头,入渗点源水室采用 5 mm 厚有机玻璃制成,水室高为 2 cm,结合马氏瓶调整水室的水头。改造的马氏瓶增加了自动搅拌系统,不停地旋转带动浑水不停的运动,从而使泥沙始终处于悬浮状态,经测定该装置稳定性较高,实验前后含沙率差异性较小基本维持在 5% 内,马氏瓶内径为 9 cm,传动轴直径为 1.4 cm,高 90 cm,经计算叶片面积仅为马氏瓶体积的 2%,可忽略。

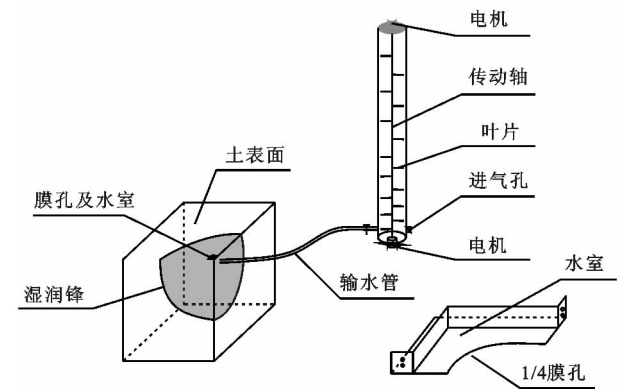


图 1 浑水膜孔灌自由入渗试验装置示意图

### 1.2 试验方法

供试土样为西安粉砂土,风干碾压过 2 mm 筛,初始含水率为 2.25% (本文的土壤含水率均为质量含水率),饱和含水率为 36.12%,物理性粘粒含量为 25.06%,饱和导水率  $K_s$  为 0.022 cm/min,供试土样颗粒组成使用 Mastersizer—2000 激光粒度分析仪进行测

定,粒径在 0~0.001 mm,0.001~0.01 mm,0.01~0.1 mm 和 0.1~2 mm 的体积含量分别为 0.7%,24.36%,72.08% 和 2.86%。为研究不同土壤含水率的浑水膜孔灌自由入渗特点,试验所配置的土壤含水率分别为 2.25%,4.96%,7.43%,10.07% 和 12.40%,供试土样干容重为 1.40 g/cm<sup>3</sup>,分层称重装入土箱压实。试验自配浑水的质量含沙率均为 5%,采用风干碾碎后过 1 mm 土筛的泥土配置而成,经测定粒径在 0~0.001 mm,0.001~0.01 mm,0.01~0.1 mm 和 0.1~2 mm 的体积含量分别为 0.73%,24.38%,72.14% 和 2.75%,采用膜孔直径为 5 cm 的膜孔进行浑水膜孔自由入渗室内试验,室内温度在 25 ℃ 左右。将膜孔置于土箱装置的一角,入渗开始后按照先密后疏的时间间隔读取马氏瓶中的水位变化,并观察记录相应时刻湿润锋的坐标位置和湿润体的形状。

## 2 结果与分析

### 2.1 单位膜孔面积累积入渗量分析

由实测资料计算单位膜孔面积累积入渗量,从图 2 可以看出,随着土壤初始含水率的增大,相同时间内单位膜孔面积累积入渗量呈递减趋势,并且不同含水率条件下变化幅度有明显区别,这说明初始含水率对浑水膜孔灌土壤水分的入渗具有明显影响。入渗初期累计入渗量增加较快,而后期累计入渗量增加基本趋于直线。

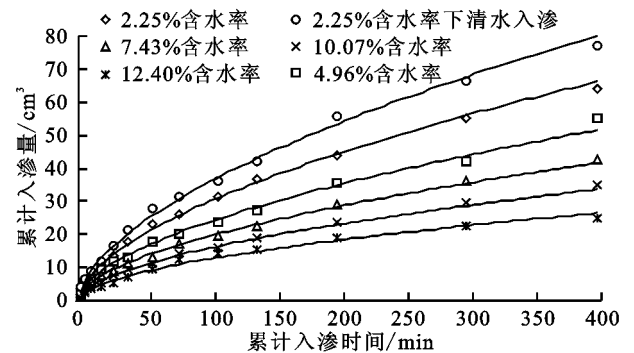


图 2 不同含水率下的单点单位膜孔面积累积入渗量

根据土壤水分特征曲线变化规律,在其他条件一定时,含水率越高土壤基质势越大,相应的水势梯度就会减小,促使水分运动的作用力减小,从而使得水分的入渗能力减小,因此随着含水率的增加,相同时间内的累积入渗量也会较小。当土壤初始含水率从 2.25% 增加到 12.4% 时土壤基质势逐渐增大,对水分的吸收能力下降,因此会出现累积入渗量逐渐减小的现象。同时,由于浑水入渗的特殊性,在入渗的过程中会伴随泥沙的沉积,覆盖在土层表面,添堵入渗空隙,从而导致累积入渗量减小。

通过拟合发现,在不同初始含水率条件下浑水膜孔灌单位膜孔面积累积入渗量具有较好的幂函数关

系,如图 2 所示,且  $R^2$  均在 0.98 以上。根据 kostia-  
kov 公式建立浑水膜孔灌单点源累积入渗模型:

$$I(t)=Kt^\alpha \tag{1}$$

式中: $I(t)$  为浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积  
入渗量(cm); $K$  为入渗系数(cm/min); $\alpha$  为入渗指  
数; $t$  为入渗时间(min)。不同含水率条件下  $K$  和  $\alpha$   
的拟合结果如表 1 所示。

表 1 不同质量含水率条件下的累积入渗量拟合参数

含水率/%	$K$	$\alpha$	$R^2$
2.25	1.971	0.5775	0.9874
5.0	1.804	0.561	0.9919
7.4	1.622	0.5505	0.9961
10.0	1.334	0.5444	0.9938
12.5	1.121	0.5395	0.9894

入渗系数  $K$  和入渗指数  $\alpha$  均随土壤初始含水量的  
的增加而减小,且  $K$  值的变化幅度较大,达到了  
43.12%,而  $\alpha$  变化幅度较小,仅为 6.58%,可见初始  
含水率对入渗指数具有较大影响。为方便建立模型,  
取  $\alpha$  的平均值 0.554 6 作为入渗指数,运用 Minitab  
软件进行回归分析。不同初始含水率下的入渗模型  
可表示为:

$$I(t)=Kt^{0.5546} \tag{2}$$

式中各符号意义同上。其中入渗系数  $K$  及  $R^2$  见表  
2,回归分析后  $R^2$  均大于 0.99,模型可靠性较高,入  
渗指数  $\alpha$  取平均值 0.554 6 时拟合结果较好。

表 2 不同质量含水率条件下的入渗系数

含水率/%	$K$	$R^2$
2.25	2.3661	0.9989
4.96	1.8738	0.9982
7.43	1.5234	0.9984
10.07	1.2521	0.9985
12.4	0.9825	0.9946

由表 2 可知,随土壤初始含水率的增加单位膜孔  
面积累积入渗量入渗系数逐渐减小,建立入渗系数和  
初始含水率的函数关系:

$$K(\theta)=2.8695e^{-0.085\theta} \tag{3}$$

式中: $K(\theta)$  为入渗系数(cm/min); $\theta$  为土壤初始含水  
率(%)。

结合公式(2)和公式(3),浑水膜孔灌单位膜孔面  
积累积入渗量与含水率、累积入渗时间  $t$  的函数模型  
可表示为:

$$I(t)=2.8695e^{-0.085\theta}t^{0.5546} \tag{4}$$

式中: $\theta$  为土壤初始含水率(%); $t$  为累积入渗时间  
(min)。

根据此模型只需通过测量灌溉时土壤的初始含水  
率  $\theta$ ,便可计算出浑水膜孔灌不同含水率条件下任意时  
刻的累计入渗量,从而合理制定灌溉制度,控制灌溉水  
流的入畦流量,达到节水、快速、高效灌溉的目的。总

的来说,土壤累计入渗量随这土壤初始含水率的增加  
而减小,初始含水率为 4.96%,7.43%,10.07% 和  
12.40%时,较风干条件下分别减少了 19%,33%,45%  
和 56%,减渗效果明显,与刘目兴在林地和草地上研究  
得出的结果累计入渗量随着含水率的增加而降低的结  
果不同<sup>[17]</sup>。

2.2 单位膜孔面积减渗效果分析

一般将泥沙粒径可分为 3 个类型<sup>[18]</sup>:直径  $d>2$  mm  
的砾类,运动规律属于紊流区;直径  $d$  为 2~0.1 mm 的  
沙类,运动规律属于介流区;直径  $d<0.1$  mm 的泥类,运  
动规律属于层流区。考虑实际灌溉中浑水泥沙的粒径  
特点,本次试验所用用来配置浑水的泥沙事先均风干碾  
压,并且过 1.0 mm 筛。所以本次试验中泥沙运动规律  
属于介流区和层流区。静水中,当粒径处于层流区时该  
流区的自然泥沙沉速用公式(5)计算<sup>[18]</sup>:

$$\omega=0.674\frac{d^2}{v} \tag{5}$$

当粒径处于层流区时该流区的自然泥沙沉速用  
公式(6)计算<sup>[18]</sup>:

$$(\lg \frac{\omega}{\sqrt[3]{v}}+3.386)^2+(\lg \frac{d}{\sqrt[3]{v^2}}-5.374)^2=39 \tag{6}$$

式中: $\omega$  为沉速(m/s); $d$  为粒径(m); $v$  为水的动力粘  
滞性率( $m^2/s$ )。

根据公式(5)和公式(6)得出,试验温度 25 ℃ 下  
不同直径泥沙颗粒在相应流区的自然泥沙沉速,如表  
3 所示。

表 3 不同粒径颗粒静水沉速及其在水室中的沉降时间表

粒径 $d$ / mm	沉速/ (mm·s <sup>-1</sup> )	沉降 时间/s	粒径 $d$ / mm	沉速/ (mm·s <sup>-1</sup> )	沉降 时间/s
0.001	0.00075	16678	0.1	6.74	2
0.003	0.00675	1853	0.2	19.2	0.7
0.005	0.01875	667	0.3	32.6	0.4
0.007	0.0367	341	0.4	46	0.3
0.009	0.0607	206	0.5	59.3	0.2
0.009	0.0607	206	0.6	72.1	0.2
0.01	0.075	167	0.7	84.85	0.1
0.03	0.675	19	0.8	97.85	0.1
0.05	1.88	7	0.9	110	0.1
0.07	3.79	3	1	121	0.1
0.09	5.87	2	—	—	—

试验膜孔水室高为 25 mm,取 12.5 mm 高度为  
平均计算水深,则不同粒径的沉降时间如表 3 所示。  
粒径大的平均沉速较大,首先沉淀在土层表面,颗粒  
小沉降慢不断地覆盖大颗粒表面或填充在大颗粒中  
间,这样就在土层表面形成一层级配良好的反滤层,  
从而阻碍水分入渗。不同粒径的沉降时间(除较小微  
粒)相对于入渗时间来说是短暂的,因此可以认为浑  
水沉降层度是随着水分的入渗而同步增加的,因此其  
阻渗作用是随着入渗量的增加而增加的,但其阻渗作

用主要产生在入渗前期(200 min 内),入渗后期阻渗作用基本趋于稳定,如图 3 所示。随着土壤初始含水量的增加,土壤胶体颗粒的分散和膨胀,影响土壤中盐分离子与土壤胶体颗粒之间的作用,导致土壤孔隙特点的变化,土壤孔隙阻塞,透水能力减小<sup>[6]</sup>。在对土箱进行装土时发现,初始含水率高的土壤由于所含水分较大,粘性颗粒较容易粘合在一起,在进行压实过程中大的土壤颗粒遭到破坏,从而使土壤内部的空隙结构遭到破坏,使水分入渗的通道被阻塞或变小。在 5 种不同含水率条件下,含水率越高内部结构破坏的越严重,水分入渗途径被阻挡,水分入渗越困难,累计入渗量越小。在以上 2 种因素的共同作用下,出现了累计入渗量随土壤初始含水量增大而减小的现象。

由于浑水特有的性质,在利用浑水进行灌溉时,随着灌溉时间的持续会在水土界面产生一定的淤积层,从而对土壤水分的入渗产生影响。在此作用下,沉积层作用于不同初始含水率的土壤,从而产生不一样的减渗效果。以初始含水率为 2.25% 的单位膜孔面积累积入渗量为基础,分别计算出相应含水率下的减渗量,从图 3 可以看出,随着土壤初始含水率的增大减渗效果逐渐增大,并且入渗后期不同含水率条件下的减渗量基本上呈线性增加,即入渗后期减渗率基本维持在某一恒定值。

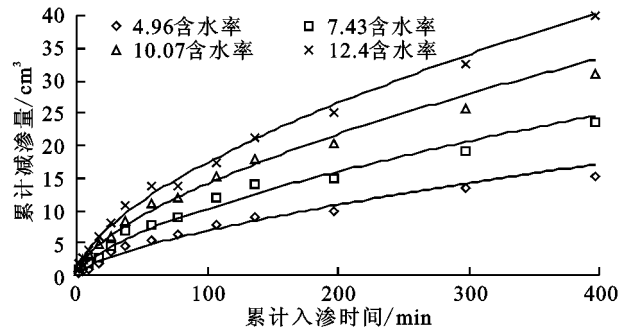


图 3 不同含水率下的单点单位膜孔面积累积减渗量曲线

单位膜孔面积累积减渗量基本呈幂函数型增加,采用幂函数进行拟合,相关系数均大于 0.97,若以  $I_{re}(t)$  表示单位膜孔面积累积减渗量,则累积减渗量函数关系式表示为:

$$I_{re}(t)=K^*t^{\alpha^*} \tag{7}$$

式中: $t$  为累计入渗时间(min); $K^*$  为减渗系数; $\alpha^*$  为减渗指数。

表 4 不同含水率条件下的累积减渗量拟合参数

含水率/%	$K^*$	$\alpha^*$	$R^2$
4.96	0.3211	0.6642	0.972
7.43	0.5581	0.6329	0.985
10.07	0.8037	0.6220	0.997
12.40	1.0427	0.6108	0.994

由表 4 可见,随着含水率的增加, $K^*$  的增加幅度较达到了 224.7%,而  $\alpha^*$  的变化较小,仅减小了

8.04%,为简化计算  $\alpha^*$  取 0.632 5,则不同初始含水率下的减渗模型可表示为:

$$I_{re}(t)=K^*t^{0.6325} \tag{7}$$

式中各符号意义同上。其中入渗系数  $K^*$  和  $R^2$  见表 5,经回归分析  $R^2$  均大于 0.98,模型可靠性较高,入渗指数  $\alpha^*$  取平均值 0.632 5 时拟合结果较好。

表 5 不同含水率条件下的入渗系数

含水率/%	$K^*$	$R^2$
4.96	0.3684	0.987
7.43	0.5501	0.987
10.07	0.7312	0.993
12.4	0.9124	0.995

建立减渗系数和初始含水率的函数关系:

$$K^*(\theta)=0.0726\theta+0.0078 \tag{9}$$

式中: $K^*(\theta)$  为入渗系数(cm/min); $\theta$  为土壤初始含水率(%)。

由此可得出,浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积减渗量与土壤初始含水率、累计入渗时间  $t$  的函数模型为:

$$I_{re}(t)=(0.0726\theta+0.0078)t^{0.6325} \tag{10}$$

根据此模型,灌前只需测量当前土壤的初始含水率,便可计算出当前所处含水率条件下浑水膜孔灌单位膜孔面积任意时刻的累积减渗量,为充分分配灌溉水资源,制定合理的灌溉制度提供参考。

2.2 含水率特性分析

图 4 a、图 4b、图 4c、图 4d、图 4e 分别是初始含水率为 2.25%,5%,7.4%,10%,12.5% 且入渗时间为 397 min 的含水率剖面等值线图,以膜孔为原点,以水平和垂直向上分别坐标轴为正方向(取 1/2 面进行研究),通过比较发现靠近膜孔和远离膜孔的地方含水率等值线图相对比较密集,含水率变化较大,均匀度较差,而中间部分含水率等值线较稀疏,含水率变化较小,均匀度好。含水率随着离膜孔距离的增大而逐渐减小,膜孔附近的土壤含水率基本达到饱和含水率。越靠近湿润锋的位置含水率变化越剧烈,含水率梯度越大,相应的土壤势力梯度越大。土壤含水率的分布之所以会出现这种情况,是与水分在土壤中的传导密切相关的:对于膜孔附近的土壤来说,在很短时间内土壤含水率基本上接近饱和,这一部分的土壤水分最主要是在膜孔水室微小水头的作用下向下入渗,该部分土壤的水分运动可视为饱和土壤水分运动;对于湿润锋附近的土壤,湿润锋前后的含水率有较大的差别,此处土壤水分主要是在土壤基质势的作用下运动;而对于中间的区域,一方面不受水头的影响,另一方面由于含水率较高,使得基质势作用相对较微弱,仅在重力的作用下进行运动,因此,膜孔附近和湿润锋附近的土壤含水率梯度较大,平均含水率梯度达到

了2%/cm,而中间部分含水量较小,平均含水率变化梯度仅为0.65%/cm,因此才会出现图4所示的现象。此外,实验发现浑水膜孔灌时土壤初始含水率对湿润锋的运移的影响规律并不十分明显。

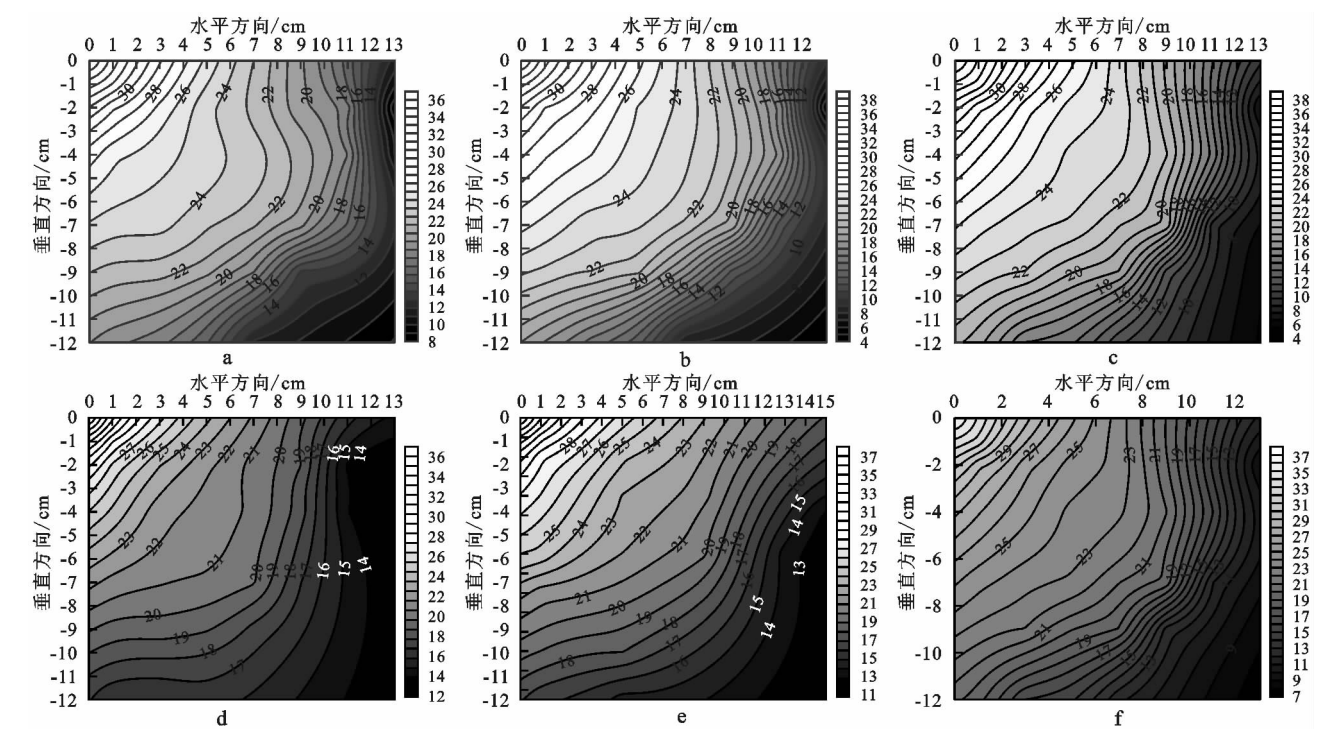


图4 不同初始含水率下土壤含水率等值线图

### 2.3 模型验证

为检验以上模型和结论的可靠性,配置8.75%含水率的土壤进行试验,按照同样的方法进行试验,共选取10个实测点进行对照,设显著性水平 $\alpha$ 为0.05,则临界相关系数为0.6319,对得出的试验数据和模拟数据进行分析,单位膜孔面积累计入渗量和单位膜孔面积累计减渗量实测值和模拟值较好地分布在 $Y=X$ 两侧,且 $r$ 分别为0.952和0.964,模型相关性较好。入渗结束后,通过测定土壤水分发现,土壤含水率分布同样呈现出靠近和远离膜孔的地方含水率等值线图相对较密集的现象,含水率变化较大,水分均匀度较差,而中间部分含水率等值线较稀疏,含水率变化较小,均匀度好,如图4f所示。通过模型验证说明本文建立的单位膜孔面积累积入渗量模型和单位膜孔面积减渗量模型的相关性较高,浑水膜孔灌条件下含水率分布规律具有较好的可靠性。

### 3 结论

(1)通过对不同含水率条件下浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累计入渗量分析发现,当浑水含沙率一定时,随着土壤初始含水率的增加,单位膜孔面积累计入渗量具有减小的趋势,单位孔面积累积入渗量与入渗时间符合kostiakov入渗模型;随着土壤初始含水率的增大入渗系数和入渗指数均有减小的趋势,且入渗系数变化较大,而入渗指数则变化较不明显。建立了浑水膜孔灌单位膜孔面积累积入渗量 $I$ 与含水率、

累积入渗时间 $t$ 的函数模型,经检验相关性较高。

(2)对不同含水率条件下浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累计减渗量分析发现,随着土壤初始含水率的增加,单位膜孔面积累计减渗量具有增加的趋势。建立了浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积减渗量与土壤初始含水率、累计入渗时间 $t$ 的函数模型,通过验证发现该模型相关性较高。

(3)对入渗结束后的含水率分布等值线图分析发现,在膜孔水室压力水头和土壤基质势的作用下靠近和远离膜孔(湿润锋处)部位的含水率等值线较密集,而中间部位含水率分布较均匀,初始含水率对湿润锋的运移规律影响并不明显。

(4)本文是以西安粉土为研究对象,对于其他类型的土壤可能会因为土壤性质的不同而发生变化,因此对其他不同的土壤应加以修正应用。

#### 参考文献:

- [1] 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):1-17.
- [2] 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.
- [3] 王锦辉,费良军,聂卫波.浑水灌溉入渗特性研究进展与展望[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):265-270.
- [4] 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.