

浑水膜孔灌多向交汇入渗湿润体特征数值研究

姜瑞瑞^{1,2}, 费良军^{1,2}, 康守旋^{1,2}

(1.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048;2.西安理工大学水利水电学院,西安 710048)

摘要: 为了研究浑水膜孔灌不同膜孔直径对多点源交汇入渗湿润体特征的影响,设置4种不同大小的膜孔直径,通过室内试验,在膜孔灌入渗方式下,测量不同膜孔直径多向交汇湿润体特征的变化过程。结果表明:膜孔直径越大,相同入渗时间内水平和垂直湿润锋运移距离越大;自由入渗剖面,水平和垂直湿润锋运移距离均与入渗时间符合幂函数模型,运移参数随膜孔直径的增大而增大,运移指数则减小;交汇剖面水平和垂直湿润锋运移距离与入渗时间符合对数函数模型;随着膜孔直径的增大,膜孔周围土壤含水率均接近土壤饱和含水率,其他相同位置土壤含水率增大,发生单向交汇和多向交汇的时间逐渐减小;浑水膜孔灌湿润体内灌水均匀系数均大于90%,灌水均匀度非常高。

关键词: 浑水膜孔灌;多向交汇入渗;湿润体;膜孔直径

中图分类号:S275.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)04-0190-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.024

Numerical Study on the Characteristics of Multi-point Interference Infiltration Wetted Body in Muddy Water Film Hole Irrigation

JIANG Ruirui^{1,2}, FEI Liangjun^{1,2}, KANG Shouxuan^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048;

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

Abstract: The objective of this study was to explore the effect of different film hole diameters on the characteristics of multi-point interference infiltration wetting body, a testing program of laboratory experiment with four different film hole diameters was designed, the changes in the characteristics of the wetting body with time under different film hole diameters were measured. The results showed that at the same time, the larger the film hole diameters, the greater the horizontal and vertical wetting front transport distance. The power function model was suitable for characterizing the relationship between the horizontal and vertical wetting front transport distance on the free infiltration surface and the time of infiltration. As the diameter of the film hole increased, the transport parameters gradually increased and the transport indexes gradually decreased. The relationship between the horizontal and vertical wetting front transport distance and the infiltration time were logarithmic function model on the intersection profile. As the diameter of the film hole increased, the soil moisture content around the film hole was close to the saturated, and the soil moisture content at the same location increased, and the time of unidirectional and multidirectional interference to occur gradually decreased. The irrigation uniformity coefficient in the wetting body of muddy water with film hole irrigation was greater than 90%, and the irrigation uniformity was very high.

Keywords: film hole infiltration of muddy water; multi-point interference infiltration; wetting body; film hole diameter

我国是一个南北水土资源分布很不平衡的国家,在西北干旱半干旱地区,降水稀少,可利用水资源少,土地资源多,所以提高水资源利用效率是对水资源供

需不协调解决的主要方法^[1-2]。覆膜种植是旱作区调节水分亏缺、增强保墒保肥能力、充分高效利用自然降水的重要手段^[3-5]。膜孔灌是结合覆膜种植,

收稿日期:2021-11-26

资助项目:国家自然科学基金项目(5177920,52079105);陕西水利科技项目(2021slkj-17)

第一作者:姜瑞瑞(1992—),女,博士研究生,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:sarajrui@163.com

通信作者:费良军(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉、农业水资源利用研究。E-mail:feiliangjun2008@163.com

在膜上开孔进行灌水的一种新型灌水技术^[6]。与传统的灌水技术相比,膜孔灌显著提高灌水效率,加大保水保肥作用^[7-8],因此深入研究膜孔灌溉技术对节水灌溉具有积极意义。

在进行田间灌溉时,土壤参数和灌水技术要素对湿润体的特性及水分分布起主要作用。对于浑水膜孔灌灌水技术而言,其湿润体特性主要受膜孔直径^[9]、膜孔间距^[10]、浑水含沙率等的影响,而膜孔直径对其水分入渗速率影响最为显著^[11]。膜孔直径是膜孔灌系统设计参数中的重要参数,膜孔直径的大小直接影响膜孔灌交汇区土壤水分的分布特性。膜孔直径过大,灌溉水量增多,蒸发损失水量较高,水肥运移范围广,水肥难以到达作物根系深处被作物吸收;膜孔过小,适应种植作物较少,种植机械成本较高。对于浑水膜孔灌多向交汇入渗的研究,国外尚未见到有关报道,国内有学者对其水分入渗特性、减渗特性进行了研究^[12]。李发文^[13]通过室内试验,对清水膜孔灌单向交汇和多向交汇入渗特性及其影响因素进行了研究,得出膜孔多向交汇入渗、单向交汇入渗、自由入渗能力逐渐减小,对一维垂直入渗与多向交汇入渗参数之间的关系进行了研究;呼唤等^[14]研究了膜孔灌多向交汇的入渗量随交汇界面面积变化规律,建立了减渗率与交汇界面面积的函数变化关系;李毅等^[15]研究了在滴灌条件下斥水和亲水 2 种土壤中的湿润锋变化规律,发生交汇前,湿润锋运移距离水平方向大于垂直方向,交汇界面上,垂直和水平湿润锋均符合对数关系;孙海燕等^[16]通过室内试验,测定了在滴灌交汇入渗过程中土壤水分运动规律,表明同等土层深度处,交汇界面处的含水率大于未交汇处的含水率,且水平和垂直湿润锋与入渗时间之间有良好的线性关系。

浑水灌溉^[17-18]是我国黄河流域引黄灌溉的主要特点,浑水推移前进,其中的泥沙一部分进入土壤,改变土壤结构;一部分在土壤表面沉积,降低水分入渗速率,使得与清水入渗相差较大。浑水膜孔灌和滴灌是不同的点源入渗,其入渗是含有一定面积的积水入渗,因此滴灌入渗的湿润体与膜孔灌交汇入渗湿润体变化规律不同,且膜孔直径对浑水膜孔灌入渗影响最为显著,所以有必要对浑水膜孔灌交汇土壤入渗湿润体变化规律进行研究。

1 材料与方法

1.1 供试土样

试验土样取自西安灞桥区,在自然风干后,碾碎过 2 mm 的土筛,通风保存备用。在试验前对土样物

理性质进行测试(美国制标准 USDA),粒径 0~0.002,0.002~0.02,0.02~2 mm 的颗粒含量分别为 4.66%,53.92%,41.42%,最终确定土壤质地为粉土。土壤风干土含水率为 2.15%,饱和含水率为 38.12%,饱和导水率 0.022 cm/min。试验在西安理工大学农水大厅实验中心展开。

试验浑水为人工配置,浑水中的泥沙取自陕西省泾惠渠灌区干渠中,自然风干过后,测量浑水平均质量含沙率为 4.78%,分析测定浑水泥沙粒度组成,测定结果见表 1。泥沙颗粒自然风干后过 1 mm 土筛,称重配置质量含沙率为 3%的浑水备用。

表 1 泾惠渠灌区浑水泥沙粒径基本组成特性

基本特性	取值	基本特性	取值
中位径(D_{50})	10.52 μm	面积平均径[3,2]	4.850 μm
跨度(SPAN)	3.804	比表面积(SSA)	0.458 m^2/g
体积平均径[4,3]	17.62 μm	遮光率	19.78%
长度平均径[2,1]	1.591 μm	残差	0.45%

1.2 试验装置

浑水膜孔灌试验装置见图 1。在传统的马氏瓶内加装电机和搅动叶片,防止泥沙在静置状态下沉淀,影响浑水入渗结果。试验由供水装置和土箱 2 部分组成,试验土箱采用透明有机玻璃制作,便于试验过程中记录湿润锋运移规律,规格为 10 cm×12 cm×35 cm(长×宽×高)。为了对各剖面湿润锋进行明确观测,取 1/4 湿润体进行研究,1/4 膜孔置于土箱一角,紧贴土壤表面,与进水孔相连。膜孔中进水深度为 3 cm,直径为 7 cm。土箱与供水装置通过输水管道连接,通过阀门控制进水。

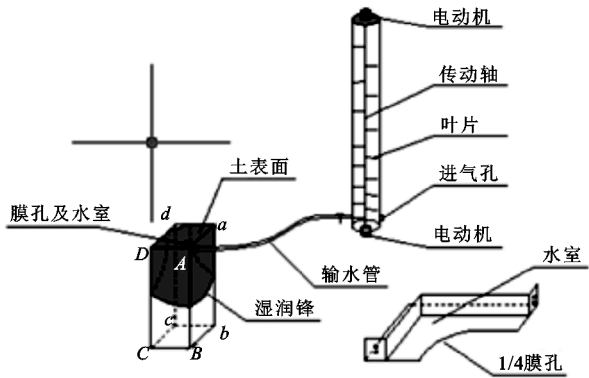


图 1 浑水膜孔灌多点多源入渗装置

1.3 试验过程

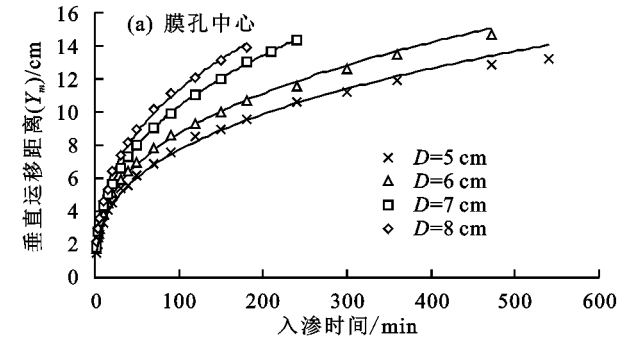
试验土壤容重为 1.35 g/cm³,将土样自然风干过筛后,按要求体积质量分层(5 cm)装入土箱中,填装高度共 25 cm。为了使各层土壤相接处紧密贴合,不出现大的孔隙,下层土壤填装之前,用刮刀刮毛下层土壤表面。在土箱上层用薄膜覆盖,装好的土箱静置 2 天,使土壤孔隙在重力作用下均匀分布。试验开始

后按先密后疏的时间原则,记录马氏瓶的读数,并在土箱上记录相应时间湿润锋运移的位置。试验结束后,测量土箱外标记不同时刻对应的湿润锋运移距离。记图 1 中 ABCD 面为自由入渗面,CcDd 面为先发生交汇的面单向交汇面,轴 CD 为单向交汇中心;abcd 面为后发生交汇的面多向交汇面,轴 ab 为多向交汇中心。

2 结果与分析

2.1 剖面 ABCD 湿润锋运移规律

图 2 为浑水膜孔灌多向交汇入渗 ABCD 面垂直和水平湿润锋运移曲线。从图 2 可以看出,入渗时间(t)增加,垂直和水平湿润锋运移过程均符合膜孔入渗的一般规律,入渗时间相同时,膜孔直径(D)越大,垂直入渗深度越深,垂直湿润锋运移距离(Y_m)越大;发生交汇前,水平湿润锋与膜孔中心的距离越远,水平湿润锋运移距离(X_z)越大。入渗时间为 150 min 时,膜孔直径大小分别为 5,6,7,8 cm 条件下的膜孔入渗,膜孔中心垂直湿润锋运移距离分别为 9.00,10.00,



12.03,13.10 cm,在入渗结束时,以 $D=5$ cm 为基础,运移距离分别增加 10.00%,25.19%,31.29%。说明膜孔直径越大,膜孔面积越大,膜孔间距一定条件下,水与进水口接触面积增大,水分进入土壤中的通道口增多,入渗率也越大,相同的入渗时间,入渗距离越远。

从图 2b 可以看出,在入渗时间为 0 时,水平湿润锋运移距离 $X_z \neq 0$,而是从 $D/2$ 的位置开始增大。土箱 ABCD—abcd 中,膜孔位于点 A 处,膜孔 A 为原点,AD 为水平湿润锋运移方向,水平湿润锋从膜孔半径处开始,随着入渗时间的延长,水平湿润锋运移距离增大,图 2b 中运移曲线斜率逐渐减小,说明运移速率逐渐减慢。入渗前期,土壤含水率为初始含水率,含水率较低,膜孔与土壤之间的水势梯度较高,湿润锋运移速率较快。入渗时间增大,湿润体体积增大,土壤含水率增加,土壤水势梯度较小,膜孔内水头一定,入渗速率减缓。直至发生单向交汇,水平湿润锋在 2 个膜孔中间相连, X_z 达到最大值,理想状态为膜孔间距的 1/2,本次试验 $X_{z\max}$ 为 12 cm,水分在垂直方向的入渗不受限制, Y_m 持续增大。

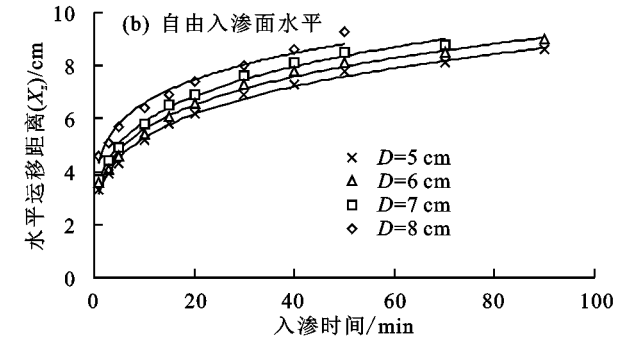


图 2 ABCD 面湿润锋运移距离曲线

表 2 为灌水 50 min 时 4 种膜孔直径条件下水平和垂直湿润锋的运移距离。从表 2 可以看出,膜孔直径对浑水膜孔灌入渗的水平和垂直湿润锋均有影响,但对水平运移的影响大于垂直运移的影响。

表 2 50 min 不同膜孔直径下湿润锋垂直和水平运移距离
单位:cm

膜孔直径	水平距离	垂直距离
5	6.2	7.8
6	7.0	8.1
7	7.9	8.5
8	9.0	9.3
平均增加	0.9	0.5

经分析,可以用幂函数关系表达 ABCD 面湿润锋运移距离与灌水时间的变化规律,其关系式为:

$$Y_m = mt^n, X_z = pt^q \tag{1}$$

式中: Y_m 和 X_z 为 ABCD 面垂直和水平湿润锋的运移距离(cm); m 和 p 为运移参数; n 和 q 为运移指数。

从表 3 可以看出,决定系数 R^2 均大于 0.9,说明

Y_m 与 t 之间呈极显著幂函数关系。运移参数 m 和 p 均随着膜孔直径(D)的增加而增加,而运移指数 n 和 q 均逐渐减小。水平和垂直运移参数 m 、 p 变化相对较大, p 大于 m ,而入渗指数 n 、 q 相对变化幅度较小,且两者数值大小相差较小。

表 3 垂直和水平运移距离与 D 拟合参数

D/cm	Y_m			X_z		
	m	n	R^2	p	q	R^2
5	1.4940	0.3536	0.9961	3.1390	0.2252	0.9926
6	1.7107	0.3434	0.9986	3.3737	0.2197	0.9883
7	1.8286	0.3363	0.9998	3.5648	0.2181	0.9937
8	2.0550	0.3210	0.9964	4.3300	0.1819	0.9783

将影响变量膜孔直径 D 与运移参数 m 、 n 、 p 、 q 分析得:

$$m = 0.8234(D/2)^{0.6531} \quad R^2 = 0.985 \ 9 \tag{2}$$

$$n = -0.0226(D/2) + 0.4127 \quad R^2 = 0.982 \ 7 \tag{3}$$

$$p = 1.0928D^{0.6386} \quad R^2 = 0.987 \ 3 \tag{4}$$

$q = -0.4401D^{-0.3970} \quad R^2 = 0.9661 \quad (5)$

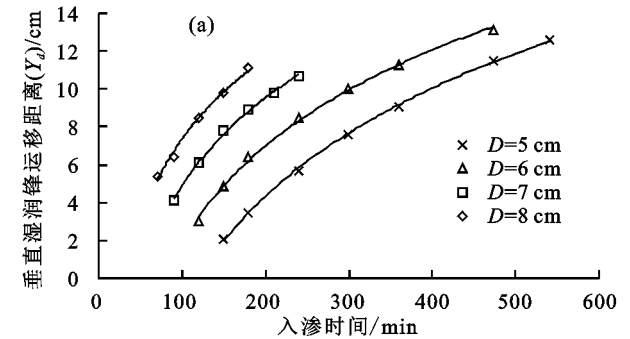
拟合结果决定系数 R^2 均大于 0.9, 将拟合结果分别带入 Y_m 和 X_z 表达式中。确定出 ABCD 面, 垂直和水平湿润锋运移距离与膜孔直径 D 和入渗时间 t 的经验模型:

$Y_z = 0.8234(D/2)^{0.6531} t^{-0.0226(D/2)+0.4127} \quad (6)$

$X_z = 1.0928D^{0.6386} t^{-0.4401D-0.3970} \quad (7)$

2.2 交汇剖面 CcDd 湿润锋运移规律

图 3 为膜孔灌浑水入渗湿润锋在土箱面 CcDd 上相连, 出现交汇面后湿润锋在交汇面上垂直和水平湿润锋运移曲线。由图 3 可知, 发生交汇后, 随着膜孔直径的增加, 交汇区剖面的宽度和湿润深度逐渐增加。膜孔直径减小, 交汇时间增加, 交汇面积减小。在湿润锋到达土层深度 8 cm 位置时, 膜孔直径 6 cm 比 8 cm 所用时间增加 118 min。水平运移 6 cm, 膜孔直径 6 cm 比 8 cm 所用时间增加 143 min。发生单向交汇



后, 同一膜孔直径的垂直湿润锋运移曲线曲率小于水平方向的, 说明交汇剖面上相同入渗时间水平湿润锋运移距离变化幅度大于垂直方向的。膜孔直径为 7 cm 时, 入渗时间由 140~180 min, 垂直方向湿润锋由 7.15 cm 运移至 8.84 cm, 平均每分钟运移 0.04 cm。水平方向湿润锋由 3.70 cm 运移至 6.40 cm 位置处, 平均每分钟运移 0.07 cm。因为水分到达交汇面上时, 交汇剖面水平方向的土壤为未湿润土壤, 含水率低, 基质势大, 运移速度快。单向交汇中心与自由面接触, 该处土壤含水率大, 基质势小, 同时水分入渗至交汇剖面量少, 重力势能小, 运移速率慢。

由图 3 可知, 发生交汇时 Y_d 和 X_d 的值均不为 0, 说明交汇剖面最先出现湿润锋的位置并不是土壤表层, 而是表层以下位置。这主要是因为膜孔入渗, 膜孔边界对水分水平入渗的阻挡, 水分先从膜孔向下运移, 短

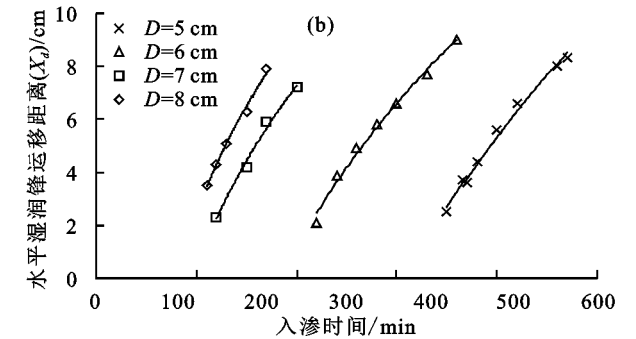


图 3 CcDd 面湿润锋运移距离曲线

对图 3a 和 3b 中数据分析可知, 单向交汇剖面上垂直和水平运移距离与入渗时间满足关系:

$Y_d = f \ln t + b, X_d = e \ln t + h \quad (8)$

式中: Y_d 为交汇剖面 CcDd 上垂直湿润锋运移距离 (cm); X_d 为交汇剖面 CcDd 上水平湿润锋运移距离 (cm); f, b, e, h 均为运移参数。

通过利用公式(8)对图 4 中数据拟合得表 4 中拟合参数, 拟合结果的决定系数均大于 0.9, 说明交汇剖面 ABCD 上 Y_d 和 X_d 均与入渗时间(t)满足对数函数关系, 且相关关系显著。

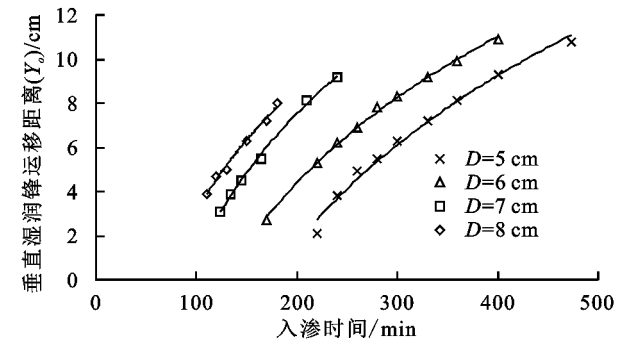


图 4 剖面 abcd 湿润锋运移规律

由表 4 可以看出, 运移参数 f 和 e 均随着膜孔直

径的增大而减小, b 和 h 则相反。经分析 f, b, e, h 与膜孔直径(D)的拟合关系为:

$f = 22.0150D^{-0.6123} \quad R^2 = 0.9992 \quad (9)$

$b = D(1 - 0.5613D^{0.4260})^{-1} \quad R^2 = 0.9999 \quad (10)$

$e = 211.2D^{-1.5050} \quad R^2 = 0.9460 \quad (11)$

$h = D(1 - 0.6709D^{0.2741})^{-1} \quad R^2 = 0.9642 \quad (12)$

表 4 交汇剖面湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数

D/cm	Y_d			X_d		
	f	b	R^2	e	h	R^2
5	8.2302	-39.263	0.9993	19.8090	-113.3600	0.9983
6	7.3177	-31.784	0.9979	13.3010	-69.2650	0.9980
7	6.7145	-26.029	0.9981	10.7610	-49.4734	0.9913
8	6.1554	-20.985	0.9923	9.8188	-43.1000	0.9941

将公式(9)~公式(12)带入公式(8)的 Y_d 和 X_d 表达式中, 将得到 Y_d 和 X_d 与膜孔直径(D)和入渗时间(t)的拟合关系:

$Y_d = (22.0150D^{-0.6123}) \ln t + D(1 - 0.5613D^{0.4260})^{-1} \quad (13)$

$X_d = (211.2D^{-1.5050}) \ln t + D(1 - 0.6709D^{0.2741})^{-1} \quad (14)$

2.3 剖面 abcd 湿润锋运移规律

图 4 为浑水膜孔灌湿润体剖面 abcd 上垂直湿润

锋运移曲线。由图 4 可知,膜孔直径越大,湿润锋在剖面发生相连所需时间越小,交汇时间越小;多向交汇剖面湿润锋出现位置和单向交汇剖面上相似,均在土壤表层以下位置,大概在 2 cm 土层深度处。分析不同膜孔直径条件下,abcd 剖面垂直湿润锋运移距离(Y_o)与时间(t)的关系(表 5)和单向交汇剖面垂直湿润锋运移规律相同,即:

$$Y_o=s\ln t+z$$

(15)

拟合结果的决定系数 $R^2>0.9$,运移参数(s)随着 D 的增大而减小, z 逐渐增大。经分析 s 、 z 与 D 的数值关系可知:

$$s=28.9340D^{-0.6070}$$

$$R^2=0.946\ 0$$

(16)

$$z=D(1-0.7102D^{0.2618})^{-1}$$

$$R^2=0.964\ 2$$

(17)

将公式(16)和公式(17)带入公式(15)的 Y_o 表达式中得 Y_o 与 D 的关系式:

$$Y_o=28.9340D^{-0.6070}\ln t+D(1-0.7102D^{0.2618})^{-1}$$

(18)

表 5 abcd 剖面湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数

D/cm	s	z	R^2
5	10.9090	-56.1120	0.9888
6	9.5497	-46.2090	0.9983
7	9.2770	-41.6100	0.9980
8	7.7548	-32.4690	0.9863

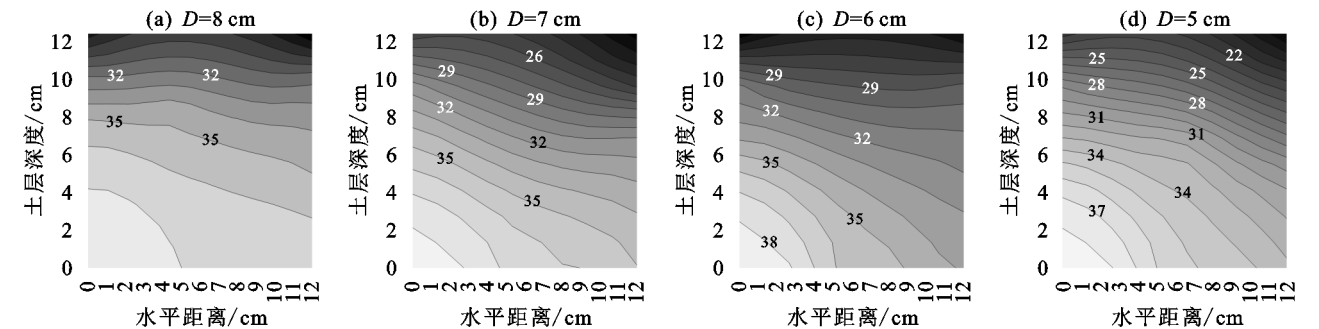


图 5 剖面 ABCD 含水率分布规律

为对交汇中心 CD 和 ab 含水率进行进一步说明,分析了交汇中心 CD 的含水率分布规律(图 6)。交汇剖面上 CD 和 ab 位置处的含水率先增大后减小,增大位置大约在土层深度 2.5 cm 的位置,该变化规律和湿润锋运移规律相同。因为膜孔入渗水分先扩散至膜孔下方,再向水平方向扩散和土壤表层扩散,所以交汇剖面含水率最大的位置不在土壤表面。以膜孔直径 6 cm 为例,土壤埋深 0,2.5,5,7.5 cm 的含水率分别为 33.04%,33.24%,31.14%,27.98%。土壤埋深 5 cm 处, CD 位置膜孔直径 5,6,7,8 cm 的含水率分别为 30.46%,31.10%,32.83%,35.01%,以膜孔直径 5 cm 为基础,含水率分别增加 2.10%,7.78%,14.94%。

灌水均匀度是评价灌水质量的重要指标,可采用克里斯琴^[20]均匀系数评价膜孔灌浑水入渗的均匀度:

2.4 含水率分布规律

浑水膜孔灌多向交汇入渗,在入渗前期,含水率曲线和湿润体形状相同,近似为一水平方向为长轴的椭球体,随着入渗的进行,湿润范围扩散,水分不断向远离膜孔的位置扩散。到达交汇时间后,湿润区交汇,除膜孔下方土壤含水率分布曲线近似于 1/4 椭圆形外,湿润体下方含水率相等的等值线将会相连,形成类似于马鞍状的分布形状,与滴灌交汇入渗含水率分布规律相同^[19]。入渗结束时,除膜孔处土壤含水率还保留近似 1/4 椭球体外,湿润区下方土壤含水率均呈带状分布(图 5)。从试验数据看,随着膜孔直径的增大,含水率等直线由密变疏,含水率变化梯度逐渐减小。膜孔直径越大,水分入渗量越大,同一位置土壤含水率越大。入渗结束时,靠近膜孔中心位置,不同膜孔直径的土壤含水率值几乎相同,均在 38%,接近土壤饱和含水率,说明多向交汇膜孔中心处土壤含水率最大。 AB 、 CD 、 ab 位置同一深度处 $\theta_{AB}>\theta_{CD}>\theta_{ab}$ 。同一膜孔直径的含水率等值线图呈现出由膜孔向土层深度从疏到密的分布规律,入渗结果符合点源入渗规律,即离膜孔越远,土壤含水率越小。上层土壤含水率高,土壤水吸力小等值线分布间距较大,含水率变化梯度小。

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

式中: C_u 为灌水均匀系数; θ_i 为取样点含水率(%); $\bar{\theta}$ 为深度取样点平均含水率。

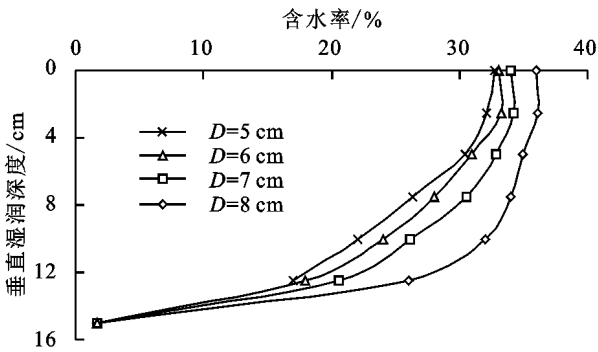


图 6 交汇中心 CD 含水率分布规律

经沿膜孔灌湿润体相同湿润半径采样计算,浑水膜孔灌灌水均匀度非常高,AB、CD、ab 同一深度处的灌水均匀度均达到 90%以上(表 6)。根据《节水灌溉技术规范》^[21]判断,膜孔灌灌水均匀度远大于 70%,所以其属于高均匀度节水灌溉技术。浑水膜孔灌灌水均匀度高,可以减少深层渗漏和颧间蒸发,从而减少水分的损耗,达到节水高产的目的。

表 6 abcd 剖面湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数

埋深/cm	θ_{AB}		θ_{CD}		θ_{ab}	
	含水率/%	C_u	含水率/%	C_u	含水率/%	C_u
2.50	37.63	0.98	36.53	0.97	36.32	0.99
5.00	36.37	0.96	36.45	0.98	35.30	0.98
7.50	35.43	0.98	33.15	0.98	34.47	0.96
10.00	32.55	0.98	31.26	0.99	32.07	0.98
12.50	27.56	0.96	25.32	0.97	9.53	0.94

3 结 论

(1)浑水膜孔灌多向交汇入渗条件下,膜孔直径对湿润锋运移距离影响显著;膜孔直径越大,水平和垂直湿润锋运移距离越大;自由入渗剖面 and 交汇剖面,膜孔直径对水平运移距离的影响均大于垂直方向的。

(2)建立了多向交汇各入渗面湿润锋运移距离与入渗时间和膜孔直径的函数关系模型,相关性均较好,用其模拟浑水膜孔灌多向交汇湿润锋运移规律是可行的。

(3)多向交汇入渗湿润体内,含水率最大的位置在膜孔中心位置;同一土层深度处,膜孔中心、单向交汇中心、多向交汇中心含水率逐渐减小;膜孔灌为高均匀度节水灌溉技术。

参考文献:

[1] 张振龙,孙慧,苏洋,等.中国西北干旱地区水资源利用效率及其影响因素[J].生态与农村环境学报,2017,33(11):961-967.

[2] 韩琦,姜纪沂,李瑛,等.西北干旱半干旱区水资源承载力研究现状与发展趋势[J].节水灌溉,2017(6):59-62,67.

[3] 任新茂,孙东宝,王庆锁.覆膜和种植密度对旱作春玉米产量和蒸散量的影响[J].农业机械学报,2017,48(1):206-211.

[4] Zhang P, Wei T, Han Q F, et al. Effects of different film mulching methods on soil water productivity and maize yield in a semiarid area of China[J].Agricultural Water Management,2020,241:e106382.

[5] Xie Z K, Wang Y J, Li F M. Effect of plastic mulching on soil water use and spring wheat yield in arid region of Northwest China[J].Agricultural Water Management,2005,75(1):71-83.

[6] 徐首先,魏玉强,聂新山,等.膜孔灌溉理论与实用技术初步研究[J].水土保持研究,1996,3(3):23-30.

[7] 李方红,李援农,王增红,等.膜孔灌溉技术研究的现状及展望[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(4):127-131.

[8] 刘洪祥,徐首先.节水高产优质高效的灌水技术:膜孔灌[J].灌溉排水,1997(3):63-64.

[9] 刘利华,费良军,陈琳,等.膜孔直径对浑水膜孔灌土壤水氮运移特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):126-131.

[10] 马孝义,范严伟,王术礼,等.膜孔灌平均入渗水深简化计算模型建立与验证[J].农业机械学报,2009,40(8):67-73.

[11] 姜瑞瑞,费良军,傅渝亮,等.多因素浑水膜孔灌入渗特性分析[J].排灌机械工程学报,2020,38(4):415-420.

[12] 费良军,朱兴华,吴军虎.膜孔灌多向交汇入渗减渗特性和数学模型研究[J].水利学报,2006,37(1):104-108.

[13] 李发文.膜孔灌溉交汇入渗特性及其影响因素研究[D].西安:西安理工大学,2002.

[14] 呼唤,程东娟,高然,等.膜孔灌多向交汇入渗交汇界面面积特性和数学模型研究[J].节水灌溉,20124(4):26-29.

[15] 李毅,关冰艺.滴灌两点源交汇入渗的斥水土壤水分运动规律[J].排灌机械工程学报,2013,31(1):81-86.

[16] 孙海燕,王全九.滴灌湿润体交汇情况下土壤水分运移特征的研究[J].水土保持学报,2007,21(2):115-118.

[17] 卞艳丽,曹惠提,张会敏,等.不同泥沙级配浑水灌溉入渗量及减渗作用分析[J].人民黄河,201537(3):145-148.

[18] 王全九,王文焰,邵明安,等.浑水入渗机制及模拟模型研究[J].农业工程学报,1999,15(1):141-144.

[19] 张林,吴普特,范兴科.多点点源滴灌条件下土壤水分运动的数值模拟[J].农业工程学报,2010,29(9):40-45.

[20] 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.

[21] 中华人民共和国水利部.节水灌溉工程技术规范:GB/T 50363—2006[S].北京:中国计划出版社,2006.