

不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗特性研究

费良军 王锦辉 金世杰

(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 根据室内浑水膜孔灌自由入渗试验资料,对比分析了浑水与清水膜孔灌自由入渗的区别,研究了不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗特性及浑水膜孔灌自由入渗与浑水垂直一维入渗之间的关系;建立了浑水膜孔灌自由入渗参数、湿润锋运移参数与不同膜孔直径的关系;提出了不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积入渗量模型、稳定入渗率模型、单位膜孔面积侧渗量模型和湿润锋运移模型。结果表明,浑水膜孔灌自由入渗随着膜孔直径的增大,单点膜孔累积入渗量逐渐增大,单位膜孔面积累积入渗量和单位膜孔面积侧渗量逐渐减小;不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积入渗量的入渗系数 K 和入渗指数 α 都随着膜孔直径的增大而减小,单位膜孔面积侧渗量的入渗系数 K_c 随着膜孔直径的增大而减小,侧渗量入渗指数 α_c 随着膜孔直径的增大而增大;在相同入渗时间内,随着膜孔直径的增大,垂直和水平湿润锋运移距离都逐渐增加。

关键词: 膜孔直径; 浑水膜孔灌; 自由入渗; 垂直一维入渗; 侧渗量

中图分类号: S274.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0172-07

Free Infiltration Characteristics of Muddy Water Film Hole Irrigation with Different Film Hole Diameters

Fei Liangjun Wang Jinhui Jin Shijie

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

Abstract: According to indoor free infiltration of muddy water film hole irrigation test data and free infiltration of clean water film hole irrigation as contrast, the free infiltration characteristics of muddy water film hole irrigation with different film hole diameters were investigated, the relationships between muddy water film hole irrigation infiltration and vertical one-dimensional muddy water infiltration was studied, the relationships between free infiltration of muddy water film hole infiltration parameters, wetting front movement parameters and different film hole diameters were established, and the cumulative infiltration volume model per unit film hole area of free infiltration of muddy water film hole irrigation with different film hole diameters, side infiltration volume model per unit film hole area, steady infiltration rate and wetting front movement model were put forward. The results showed that with the increase of film hole diameter of free infiltration for muddy water, the cumulative infiltration volume of single point of film hole was increased gradually, cumulative infiltration volume per unit film hole area and side infiltration volume per unit film hole area were decreased, the fitting parameters of K and α for cumulative infiltration volume per unit film hole area were decreased, and K_c of side infiltration volume per unit film hole area was decreased, while α_c was increased. Within the same infiltration time, vertical and horizontal wetting front movement distances were gradually increased with the increase of film hole diameter.

Key words: film hole diameter; muddy water film hole irrigation; free infiltration; vertical one-dimensional infiltration; side infiltration volume

收稿日期: 2015-06-30 修回日期: 2015-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479161, 51279157)和公益性行业科研专项(201203003)

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

引言

地膜覆盖栽培技术自 1978 年从日本引进以来发展迅速,并取得了巨大的经济效益和社会效益。目前全国已有地膜覆盖种植面积约 533 万 hm^2 ,居世界之首。膜孔灌是在农业地膜覆盖栽培基础上研究出的一种新型的覆膜灌溉技术,它具有节水、省肥、保墒、提高灌水质量和增产等特点,适用于干旱和半干旱地区旱作农田地面灌溉^[1]。根据农业地膜栽培和种植规格,膜孔入渗可以分为 3 种类型:①作物的行距和株距都较大的膜孔自由入渗。②作物的行距相对株距较大时,在膜孔入渗过程中,仅在行方向的膜孔间发生交汇干扰作用,称为膜孔单向交汇入渗。③作物的行距和株距均较小,在入渗过程中,膜孔受到周围膜孔入渗的干扰作用,称为膜孔多向交汇入渗^[2]。膜孔灌入渗为充分供水条件下的三维点源入渗,它不同于滴灌条件下的非充分供水点源入渗。目前,很少见到国外在清水膜孔灌溉理论与技术方面的研究报道^[3-6],国内在膜孔灌溉理论与技术方面基本都是针对清水和水氮耦合进行的研究^[7-9],很少见到国内外有关浑水膜孔灌方面的研究报道。浑水灌溉是我国黄河流域引黄灌区灌溉的主要特点,由于浑水中含沙,使得浑水的入渗过程与清水相比有很大差异^[10-12]。

本文在清水膜孔灌自由入渗研究成果的基础上,结合我国黄河流域灌区浑水灌溉的实际,开展室内不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗试验。该研究成果在扩展和充实地面灌溉理论方面具有重要的科学价值,同时也可作为浑水膜孔灌自由入渗更深入的研究奠定基础。

1 材料与试验方法

1.1 试验装置

为了分析浑水与清水膜孔灌自由入渗的区别,研究不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗特性及浑水膜孔灌自由入渗与浑水垂直一维入渗之间的关系,在室内进行相同条件下浑水垂直一维入渗试验,并利用改进的西安理工大学水资源研究所研制的点源自由入渗装置^[13]进行室内不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗和清水膜孔灌自由入渗试验。浑水和清水膜孔灌自由入渗试验土箱采用 10 mm 厚的有机玻璃制作,为使试验过程中不产生交汇,土箱尺寸(长×宽×高)为 24 cm×20 cm×30 cm,为便于观测湿润锋的运移过程,入渗源采用 1/4 膜孔面积的方形水室,并置于土箱的一角。入渗源水室采用 5 mm 厚有机玻璃制成,水室的高度为 2 cm。进行不

同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗和清水膜孔灌自由入渗试验时,利用改装的带有刻度的透明有机玻璃制成并加机械自动搅拌系统的马氏瓶(半径为 4.5 cm)自动供水。试验装置如图 1 所示。

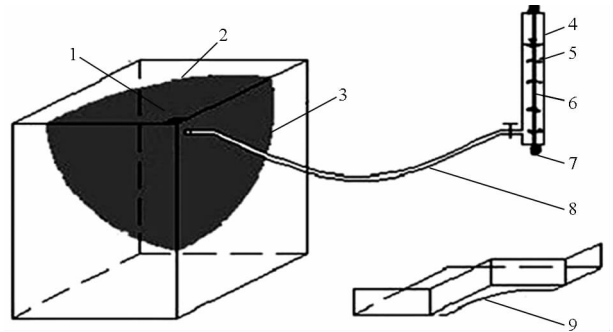


图 1 浑水膜孔灌自由入渗装置

Fig. 1 Device for free infiltration of muddy water film hole irrigation

1. 膜孔装置 2. 土面 3. 湿润锋 4. 马氏瓶 5. 叶片 6. 转轴
7. 电动机 8. 供水管 9. 1/4 膜孔

1.2 试验方法

试验土样为西安粉砂土,风干碾碎后过 2 mm 土筛,初始质量含水率 2.15%,饱和质量含水率 36.87%,土壤干容重 1.30 g/cm^3 ,物理性粘粒体积分数 25.06%,饱和导水率 0.017 2 cm/min 。土样按照干容重 1.5 g/cm^3 分层(5 cm)称量装入试验土箱。试验土壤粒径组成如表 1 所示,土壤粒径组成使用英国马尔文仪器有限责任公司生产的 Mastersizer-2000 型激光粒度分析仪测定。配置质量含沙率为 5%,采用膜孔直径分别为 4、5、6、8 cm 进行浑水膜孔灌自由入渗试验并在室内进行相同条件下膜孔直径为 5 cm 的清水膜孔灌自由入渗试验和含沙率为 5% 浑水垂直一维入渗试验。含沙率用风干碾碎后过 1 mm 土筛的泥土配置。在进行浑水膜孔灌自由入渗试验和清水膜孔灌自由入渗试验时,将 1/4 膜孔置于土箱装置的角上,按照先密后疏的时间间隔通过带有刻度改装的马氏瓶读取累积入渗量变化,透过土箱透明有机玻璃观测自由入渗湿润体形状和湿润锋的运移过程^[14]。

表 1 试验土壤粒径组成

Tab. 1 Particle size composition of test soil

粒径/mm	0~0.001	0.001~0.01	0.01~0.1	0.1~1
体积分数/%	0.70	24.36	72.08	2.86

2 结果与分析

2.1 入渗量变化规律

2.1.1 单点膜孔累积入渗量

图 2 为膜孔直径为 5 cm 的清水膜孔灌自由入渗和浑水膜孔灌自由入渗单点膜孔累积入渗量曲

线。可以看出,清水和浑水膜孔灌自由入渗单点膜孔累积入渗量均随着入渗时间的延长而不断增大,且浑水膜孔灌自由入渗单点膜孔累积入渗量小于相同条件下的清水膜孔灌自由入渗单点膜孔累积入渗量。这是因为在浑水膜孔灌自由入渗过程中,浑水中泥沙在土壤表面沉积,形成一个沉积层,与清水膜孔灌自由入渗对比,该沉积层改变了膜孔入渗的上边界条件,且起到阻渗作用。

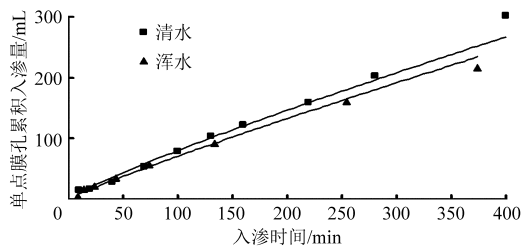


图2 清水和浑水单点膜孔累积入渗量曲线

Fig.2 Cumulative infiltration volume curves of single point of film hole for clean and muddy water

图3为不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单点膜孔累积入渗量曲线。浑水垂直一维入渗可以看作是膜孔直径趋近于无穷大时的入渗。可以看出,在其他条件一定的情况下,浑水垂直一维入渗和不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单点膜孔累积入渗量均随着入渗时间的延长而增大,随着膜孔直径的增大而增大,并且单点膜孔累积入渗量都小于相同入渗时间的浑水垂直一维入渗量。这是因为在浑水膜孔自由入渗中,膜孔作为水分进入土壤的入渗界面,膜孔直径越大,膜孔面积也越大,意味着水分入渗到土壤的通道也就越多,因而单点膜孔面积上的累积入渗水量也随之增加。

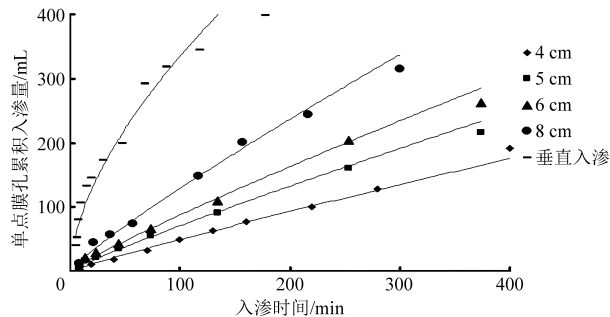


图3 不同膜孔直径的单点膜孔累积入渗量曲线

Fig.3 Cumulative infiltration volume curves of single point of film hole with different film hole diameters

2.1.2 单位膜孔面积累积入渗量

图4为不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积入渗量曲线。可以看出,在其他条件一定的情况下,浑水垂直一维入渗和不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗在单位膜孔面积上的累积入渗量均随着入渗时间的延长而增大,并且随着膜

孔直径的增大,单位膜孔面积累积入渗量逐渐减小。不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积入渗量均大于相同入渗时间的浑水垂直一维入渗量。

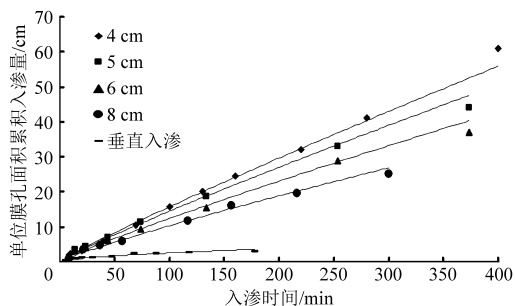


图4 不同膜孔直径的单位膜孔面积累积入渗量曲线

Fig.4 Cumulative infiltration volume curves of unit film hole area with different film hole diameters

经分析,浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积入渗量符合 Kostiakov 模型^[15],即

$$I = Kt^\alpha \quad (1)$$

式中 I ——浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积入渗量, cm

K ——入渗系数, cm/min

α ——入渗指数 t ——入渗时间, min

用式(1)对图4中的浑水垂直一维入渗和4种不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积入渗量的实测数据进行拟合,拟合结果见表2。

表2 单位膜孔面积累积入渗量拟合参数

Tab.2 Fitting parameters of cumulative infiltration volume per unit film hole area

膜孔直径 D/cm	$K/(cm \cdot min^{-1})$	α	决定系数 R^2
4	0.230 1	0.916 9	0.992 0
5	0.223 3	0.905 2	0.973 9
6	0.200 3	0.895 8	0.962 7
8	0.182 6	0.875 0	0.982 2
垂直入渗	0.161 3	0.596 9	0.949 1

由表2可知,浑水垂直一维入渗和4种不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积入渗量拟合结果的决定系数 R^2 都大于 0.94,说明按照 Kostiakov 模型建立的人渗模型相关关系都很显著。

可以看出, K 和 α 都随着膜孔直径的增大而减小。浑水垂直一维入渗可以看做是膜孔直径趋近于无穷大时的入渗。通过分析得到 K 、 α 与膜孔直径 D 的关系为

$$K = K_0(1 + aD^b) \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha_0(1 + me^{nD}) \quad (3)$$

则浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积入渗量与膜孔直径的关系为

$$I = Kt^\alpha = K_0(1 + aD^b)t^{\alpha_0(1 + me^{nD})} \quad (4)$$

式中 K_0 ——垂直一维入渗的入渗系数, cm/min
 α_0 ——垂直一维入渗的入渗指数
 a, b, m, n ——拟合参数

对表 2 中数据进行拟合得

$$K = 0.1613(1 + 5.6241D^{-1.7709}) \quad (R^2 = 0.9431) \quad (5)$$

$$\alpha = 0.5969(1 + 0.6160e^{-0.0348D}) \quad (R^2 = 0.9992) \quad (6)$$

拟合的决定系数 R^2 都大于 0.94, 说明 K, α 与膜孔直径 D 的相关性很好。将式 (5)、(6) 代入式 (4) 可以得到不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积入渗量模型为

$$I = 0.1613(1 + 5.6241D^{-1.7709})t^{0.5969(1 + 0.6160e^{-0.0348D})}$$

图 5 为不同膜孔直径的入渗率曲线。可以看出, 在相同入渗时间内, 浑水垂直一维入渗和不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗入渗率均随着入渗时间的延长而逐渐减小, 最后都趋于稳定, 并且随着膜孔直径的增大, 入渗率逐渐减小。浑水膜孔灌自由入渗入渗率均大于相同入渗时间的浑水垂直一维入渗率。

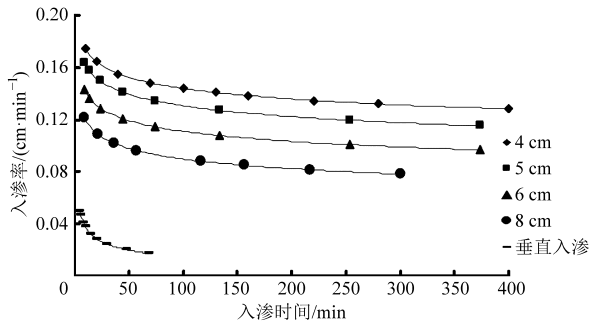


图 5 不同膜孔直径的入渗率曲线

Fig. 5 Infiltration rate curves of different film hole diameters

对图 5 中的稳定入渗率 i_f 和不同膜孔直径 D 进行拟合, 可以得到不同膜孔直径的稳定入渗率模型为

$$i_f = i_0(1 + 31.7479D^{-0.8309}) \quad (R^2 = 0.9861) \quad (7)$$

式中 i_f ——不同膜孔直径的稳定入渗率, cm/min
 i_0 ——垂直一维入渗的稳定入渗率, cm/min

其拟合决定系数 R^2 大于 0.98, 说明拟合结果较好。

2.1.3 单位膜孔面积侧渗量

膜孔点源入渗是充分供水的空间三维入渗, 存在水分的垂直入渗和水平侧渗现象。若将点源入渗的水分运动分为水平方向的水分运动和垂直方向的水分运动, 则点源入渗水量包括侧渗量(水平入渗量)和垂直入渗量两部分。单位膜孔面积侧渗量为单位膜孔面积累积入渗量与单位面积垂直一维入渗

量之差^[16]。

图 6 为 178 min 内不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积侧渗量曲线。可以看出, 在其他条件一定的情况下, 不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗在单位膜孔面积上的侧渗量均随着时间的延长而增大, 并且随膜孔直径的增大, 单位膜孔面积侧渗量逐渐减小。这主要是由于单位膜孔面积侧渗量是膜孔周长与面积比值的正函数。因此, 膜孔面积越大, 单位膜孔面积侧渗量越小。

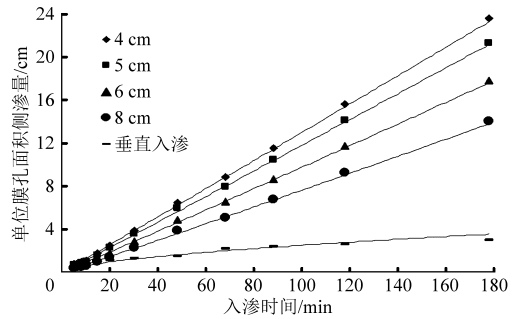


图 6 不同膜孔直径的单位膜孔面积侧渗量曲线

Fig. 6 Side infiltration volume curves of unit film hole area with different film hole diameters

经分析, 浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积侧渗量也符合 Kostiakov 模型, 即

$$I_c = K_c t \alpha_c \quad (8)$$

式中 I_c ——浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积侧渗量, cm

K_c ——侧渗量入渗系数, cm/min

α_c ——侧渗量入渗指数

用式 (8) 对图 6 中的 4 种不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积侧渗量的试验数据进行拟合, 拟合结果见表 3。

表 3 单位膜孔面积侧渗量拟合参数

Tab. 3 Fitting parameters of side infiltration volume per unit film hole area

膜孔直径 D/cm	$K_c/(cm \cdot min^{-1})$	α_c	决定系数 R^2
4	0.1247	1.0092	0.9953
5	0.1117	1.0120	0.9964
6	0.0882	1.0222	0.9946
8	0.0680	1.0252	0.9909

由表 3 可知, 4 种不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积侧渗量拟合结果的决定系数 R^2 都大于 0.99, 说明浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积侧渗量按照 Kostiakov 模型建立入渗模型, 相关关系十分显著。

可以看出, K_c 随着膜孔直径的增大而减小, α_c 随着膜孔直径的增大而增大。通过分析得到 K_c, α_c 与膜孔直径 D 符合幂函数关系, 对表 3 中数据进行拟

合得

$$K_c = 0.4543D^{-0.9078} \quad (R^2 = 0.9777) \quad (9)$$

$$\alpha_c = 0.9749D^{0.0247} \quad (R^2 = 0.9038) \quad (10)$$

拟合的决定系数 R^2 都大于 0.90, 说明 K_c 、 α_c 与膜孔直径 D 的相关性很好。将式(9)、(10)代入式(8)可以得到不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积侧渗量模型为

$$I_c = 0.4543D^{-0.9078}t^{0.9749D^{0.0247}}$$

2.2 湿润锋运移变化规律

2.2.1 垂直湿润锋

图7表示浑水垂直一维入渗和不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗垂直方向湿润锋运移曲线。可以看出,浑水垂直一维入渗和不同膜孔直径的浑水膜孔自由入渗垂直湿润锋运移距离均随着入渗时间的延长而不断增大,在相同入渗时间内,随膜孔直径的增大,垂直湿润锋运移距离也增大。这主要是由于膜孔面积越大,膜孔入渗的侧渗作用在整个入渗中的比重越小。

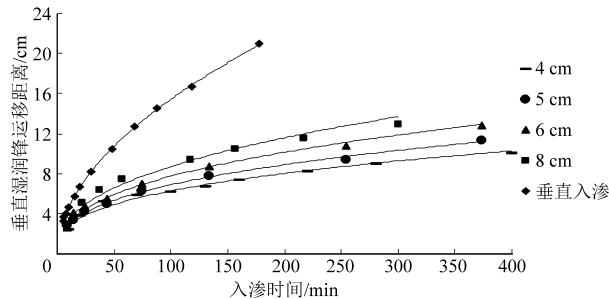


图7 不同膜孔直径的垂直湿润锋运移曲线

Fig.7 Vertical wetting front movement curves with different film hole diameters

经分析发现,浑水膜孔灌自由入渗垂直湿润锋运移距离与入渗时间呈幂函数关系,即

$$S_z = Et^F \quad (11)$$

式中 S_z ——浑水膜孔灌自由入渗垂直湿润锋运移距离, cm

E 、 F ——拟合参数

利用式(11)对图7中的浑水垂直一维入渗和4种不同膜孔直径的浑水膜孔自由入渗垂直湿润锋运移距离与入渗时间进行拟合,拟合结果见表4。

表4 垂直湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数
Tab.4 Fitting parameters of vertical wetting front movement distance and infiltration time

膜孔直径 D/cm	E	F	决定系数 R^2
4	1.223 2	0.354 7	0.999 3
5	1.259 7	0.368 6	0.974 4
6	1.287 0	0.389 3	0.977 1
8	1.313 6	0.410 7	0.998 3
垂直入渗	1.390 1	0.522 6	0.969 7

由表4可以看出,浑水垂直一维入渗和4种不同膜孔直径的浑水膜孔自由入渗垂直湿润锋运移距离与入渗时间拟合结果的决定系数 R^2 都大于 0.96, 说明根据幂函数 $S_z = Et^F$ 模型建立的相关关系相当显著。

可以看到,随着膜孔直径的不断增大,拟合参数 E 和 F 都不断增大。通过分析得到 E 、 F 与膜孔直径 D 符合关系

$$E = E_0(1 - cD^d) \quad (12)$$

$$F = F_0(1 - gD^f) \quad (13)$$

则浑水膜孔灌自由入渗垂直湿润锋运移距离与入渗时间与膜孔直径关系为

$$S_z = E_0(1 - cD^d)t^{F_0(1 - gD^f)} \quad (14)$$

式中 E_0 、 F_0 ——浑水垂直一维入渗的湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数

c 、 d 、 g 、 f ——拟合参数

对表4中的数据进行拟合得

$$E = 1.3901(1 - 0.5775D^{-1.1346}) \quad (R^2 = 0.9984) \quad (15)$$

$$F = 0.5226(1 - 0.7536D^{-0.6019}) \quad (R^2 = 0.9865) \quad (16)$$

拟合的决定系数 R^2 都大于 0.98, 说明 E 、 F 与膜孔直径 D 相关性很好。从而可以得到浑水膜孔灌自由入渗垂直湿润锋运移距离与入渗时间的模型为

$$S_z = 1.3901(1 - 0.5775D^{-1.1346})t^{0.5226(1 - 0.7536D^{-0.6019})}$$

2.2.2 水平湿润锋

从图8可以看出,入渗开始时,水平湿润锋运移距离从零瞬时增加到膜孔半径,不同膜孔直径的浑水膜孔自由入渗水平湿润锋运移距离均随着入渗时间的延长而不断增大,但增加的速度逐渐减缓,在相同的入渗时间内,随膜孔直径的增大,水平湿润锋运移距离也随着增大,这主要是因为水平湿润锋运移距离在入渗开始的瞬时由零增至膜孔半径,膜孔面积越大,则水平湿润锋运移距离越大。

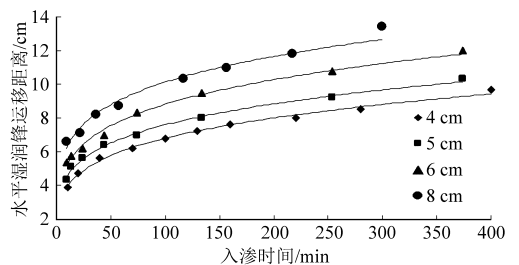


图8 不同膜孔直径水平湿润锋运移曲线

Fig.8 Horizontal wetting front movement curves with different film hole diameters

经分析表明,浑水膜孔灌自由入渗水平湿润锋

运移距离随入渗时间变化的规律符合

$$S_x = D/2 + Gt^H \quad (17)$$

式中 S_x ——浑水膜孔灌自由入渗水平湿润锋运移距离, cm

G, H ——拟合参数

用式(17)对图 8 中的 4 种不同膜孔直径的膜孔灌自由入渗水平湿润锋运移距离与入渗时间进行拟合,拟合结果见表 5。

表 5 水平湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数
Tab.5 Fitting parameters of horizontal wetting front movement distance and infiltration time

膜孔直径 D/cm	G	H	决定系数 R^2
4	0.896 6	0.359 1	0.990 9
5	0.929 3	0.363 1	0.981 4
6	1.033 1	0.368 0	0.995 5
8	1.072 0	0.372 1	0.988 7

由表 5 可知,4 种不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗水平湿润锋运移距离与入渗时间拟合结果的决定系数 R^2 都大于 0.98,说明 $S_x = D/2 + Gt^H$ 模型能很好地描述浑水膜孔灌自由入渗水平湿润锋运移距离与入渗时间的变化规律。同时可以看到,随着膜孔直径的不断增大,拟合参数 G 和 H 都不断增大。通过分析得到 G, H 与膜孔直径 D 符合幂函数关系,对表 5 中数据进行拟合得

$$G = 0.608 5 D^{0.277 6} \quad (R^2 = 0.921 5) \quad (18)$$

$$H = 0.334 0 D^{0.052 5} \quad (R^2 = 0.985 4) \quad (19)$$

拟合的决定系数 R^2 都大于 0.92,说明 G, H 与膜孔直径 D 的相关性很好。将式(18)、(19)代入式(17)可以得到浑水膜孔灌自由入渗水平湿润锋

运移距离与入渗时间的模型为

$$S_x = D/2 + 0.608 5 D^{0.277 6} t^{0.334 0 D^{0.052 5}} \quad (20)$$

3 结论

(1)浑水膜孔灌自由入渗单点膜孔累积入渗量小于相同条件下的清水膜孔灌自由入渗单点膜孔累积入渗量;不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积的累积入渗量、单位膜孔面积侧渗量与入渗时间都符合 Kostiakov 幂函数模型;浑水膜孔灌自由入渗随着膜孔直径的增大,单点膜孔累积入渗量逐渐增大,单位膜孔面积累积入渗量和单位膜孔面积侧渗量逐渐减小。

(2)不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积累积入渗量的 K 和 α 都随着膜孔直径的增大而减小,单位膜孔面积侧渗量的 K_s 随着膜孔直径的增大而减小, α_s 随着膜孔直径的增大而增大;入渗率均随着时间的延长而逐渐减小,最后都趋于稳定,并且随着膜孔直径的增大,入渗率逐渐减小;建立了入渗参数与不同膜孔直径的关系和单位膜孔面积累积入渗量模型、稳定入渗率模型、单位膜孔面积侧渗量模型,其相关性很显著。

(3)不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗垂直湿润锋运移距离与入渗时间呈幂函数模型,水平湿润锋运移距离与入渗时间符合 $S_x = D/2 + Gt^H$ 模型;在相同入渗时间内,随着膜孔直径的增大,垂直和水平湿润锋运移距离都逐渐增加;建立了垂直和水平湿润锋运移参数与不同膜孔直径的关系;提出了垂直和水平湿润锋运移模型,其相关性很好。

参 考 文 献

- 1 费良军,吴军虎,王文焰,等.充分供水条件下单点膜孔入渗湿润特性研究[J].水土保持学报,2001,15(5):137-140.
Fei Liangjun, Wu Junhu, Wang Wenyan, et al. Study on wetting characteristics of point source infiltration under film hole irrigation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(5):137-140. (in Chinese)
- 2 费良军,李发文,吴军虎.膜孔灌单向交汇入渗湿润体特性影响因素研究[J].水利学报,2003(5):62-68.
Fei Liangjun, Li Fawen, Wu Junhu. Study on influential factors of wetting soil characteristic under film hole single-line interference infiltration [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(5):62-68. (in Chinese)
- 3 徐首先,魏玉强,聂新山,等.膜孔灌理论及实用技术初步研究[J].水土保持研究,1996,3(3):23-29.
Xu Shouxian, Wei Yuqiang, Nie Xinshan, et al. Theory of film hole irrigation and practical technology research [J]. Research of Soil and Water Conservation, 1996, 3(3):23-29. (in Chinese)
- 4 吴军虎.膜孔灌入渗特性与技术要素试验研究[D].西安:西安理工大学,2000.
Wu Junhu. The study on infiltration characteristics and technical parameters of film hole irrigation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2000. (in Chinese)
- 5 Philip J R. General theorem on steady infiltration from surface sources with application to point and line sources [J]. Soil Science Society of America Journal, 1971, 35(6):867-871.
- 6 Warrick A W. Time-dependent linearized infiltration I. point sources [J]. Soil Science Society of America Journal, 1974, 38(3):383-386.
- 7 董玉云.膜孔入渗土壤水氮运移特性试验与数值模拟[D].西安:西安理工大学,2007.
Dong Yuyun. Soil water and nitrogen transport characteristics experiment and simulation under film hole infiltration [D]. Xi'an: Xi'an

- University of Technology, 2007. (in Chinese)
- 8 穆红文. 膜孔灌自由入渗氮素运移转化特性试验及数值模拟研究[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
Mu Hongwen. Water and nitrogen transport and translation characteristics research and numerical simulation under film hole free infiltration[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)
- 9 朱兴华. 施肥条件下膜孔自由入渗水、氮运移特性试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2006.
Zhu Xinghua. Water and nitrogen transport characteristics' research under different fertilization in the film hole infiltration[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 10 王文焰, 张建丰, 王全九, 等. 黄土浑水入渗能力的试验研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(1): 59-62.
Wang Wenyan, Zhang Jianfeng, Wang Quanjiu, et al. Experimental studies on infiltration capability of silt-laden water into the loess[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(1): 59-62. (in Chinese)
- 11 费良军. 浑水波涌灌理论与技术要素试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 1997.
Fei Liangjun. The study on theory and technical parameters of surge flow irrigation with muddy water[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 1997. (in Chinese)
- 12 孙存喜, 吴发启, 王健, 等. 不同浓度浑水入渗试验研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 57-60.
Sun Cunxi, Wu Faqi, Wang Jian, et al. Experimental studies on muddy water infiltration with different concentrations[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 57-60. (in Chinese)
- 13 费良军, 程东娟, 雷雁斌, 等. 膜孔灌单点源入渗特性与数学模型研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(5): 212-216.
Fei Liangjun, Cheng Dongjuan, Lei Yanbin, et al. Study on the infiltration characteristic and the mathematical model of the point source free infiltration under film hole irrigation[J]. Journal of Northwest A&F University: Nature Science Edition, 2007, 35(5): 212-216. (in Chinese)
- 14 吴军虎, 费良军, 王文焰. 膜孔灌溉单孔入渗特性研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 307-311.
Wu Junhu, Fei Liangjun, Wang Wenyan. Study on the infiltration characteristics of single filmed hole and its mathematical model under filmed hole irrigation[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(3): 307-311. (in Chinese)
- 15 缴锡云, 王文焰, 张建丰. 单点膜孔入渗特性的试验研究[J]. 水利学报, 1999(7): 33-39.
Jiao Xiyun, Wang Wenyan, Zhang Jianfeng. Experimental research on infiltration from single hole of membrane[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(7): 33-39. (in Chinese)
- 16 谭奇林. 充分供水条件下的点源入渗试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 1998.
Tan Qilin. The experimental study on point source infiltration under the condition of sufficient water supply[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 1998. (in Chinese)
- 17 费良军, 傅渝亮, 何振嘉, 等. 涌泉根灌肥液入渗水氮运移特性研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 121-129.
Fei Liangjun, Fu Yuliang, He Zhenjia, et al. Transport characteristics of water and nitrogen under bubbled-root irrigation with fertilizer solution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 121-129. (in Chinese)
- 18 聂卫波, 费良军, 马孝义. 土壤入渗特性和田面糙率的变异性对沟灌性能的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 108-114.
Nie Weibo, Fei Liangjun, Ma Xiaoyi. Effects of spatial variability of soil infiltration characteristics and manning roughness on furrow irrigation performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 108-114. (in Chinese)
- 19 马海燕, 王昕, 张展羽, 等. 基于 HYDRUS-3D 的微咸水膜孔沟灌水盐分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 137-145.
Ma Haiyan, Wang Xin, Zhang Zhanyu, et al. Numerical simulation of water-salt distribution under brackish water film hole furrow irrigation based on HYDRUS-3D model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 137-145. (in Chinese)