

泥沙粒度组成对浑水膜孔灌单向交汇入渗特性的影响

费良军 王锦辉

(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 通过室内相同条件下清水膜孔灌单向交汇入渗和4种不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗试验, 研究不同泥沙粒度组成对浑水膜孔灌单向交汇入渗特性的影响; 建立浑水膜孔灌单向交汇入渗量、单向交汇时间、湿润锋运移距离与不同泥沙粒度组成的关系; 提出不同泥沙粒度组成下浑水膜孔灌单向交汇入渗单位膜孔面积累积入渗量模型、自由面和交汇面湿润锋运移距离模型; 并揭示不同泥沙粒度组成下浑水膜孔灌单向交汇入渗相对相同条件下清水膜孔灌单向交汇入渗的减渗特性。结果表明, 浑水膜孔灌单向交汇入渗单位膜孔面积的累积入渗量随着物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ (粒径小于 0.01 mm 的颗粒含量) 的增大而逐渐减小; 入渗系数 K 随着 $d_{0.01}$ 的增大而减小, 入渗指数 α 随着 $d_{0.01}$ 的增大而增大; 在相同入渗时间内, 随着物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的增大, 自由面和交汇面垂直和水平湿润锋运移距离都逐渐减小, 减渗率逐渐增大。

关键词: 泥沙粒度组成; 浑水膜孔灌; 单向交汇; 交汇时间; 减渗特性

中图分类号: S274.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0105-08

Effect of Clay and Sand Grades on Single-line Interference Infiltration Characteristics of Muddy Water Film Hole Irrigation

Fei Liangjun Wang Jinhui

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

Abstract: Through indoor single-line interference infiltration of clean water film hole irrigation and four different clay and sand grades of single-line interference infiltration of muddy water film hole irrigation tests under the same condition, the influence of single-line interference infiltration characteristics of muddy water film hole irrigation under different clay and sand grades was studied, the relationships between single-line interference infiltration of muddy water film hole infiltration volume, single-line interference time, wetting front movement distance and different clay and sand grades were established, the cumulative infiltration volume model and free surface and interference surface wetting front movement distance models for single-line interference infiltration of muddy water film hole per unit area under different clay and sand grades were put forward, and the infiltration reduction feature and influent law of single-line interference infiltration of muddy water film hole irrigation with different clay and sand grades under the relatively same condition of clean water single-line interference infiltration of film hole irrigation were revealed. The results showed that the single-line interference infiltration of muddy water film hole infiltration per unit area of the cumulative infiltration volume was gradually decreased with the increase of physical clay content $d_{0.01}$ (particle content with diameters less than 0.01 mm), the infiltration coefficient K was decreased with the increase of $d_{0.01}$, and infiltration index α was increased with the increase of $d_{0.01}$. In the same infiltration time, the vertical and horizontal wetting front movement distances for free surface and interference surface were gradually decreased and the infiltration reduction rate were gradually increased with the increase of physical clay content $d_{0.01}$.

收稿日期: 2015-07-31 修回日期: 2015-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479161, 51279157)和公益性行业(农业)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

Key words: clay and sand grades; muddy water film hole irrigation; single-line interference; interference time; infiltration reduction feature

引言

膜孔灌是在农业地膜覆盖栽培的基础上提出的一种新型覆膜灌溉技术,较传统的地面灌溉具有节水、保肥、灌水质量高和灌溉水利用率高等优点,已在我国干旱缺水的北方地区广泛应用^[1]。

膜孔入渗为充分供水条件下的空间三维入渗,不同于滴灌条件下的非充分供水点源入渗,目前国外研究较少^[2-5]。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^[6]。膜孔单向交汇入渗比膜孔自由入渗复杂得多,目前对膜孔单向交汇入渗的特性研究较少^[7]。国内在膜孔灌理论与技术方面基本只是针对清水和水氮耦合进行了研究^[8-10],浑水膜孔灌方面的研究报道较少。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,使得浑水入渗过程与清水相比有很大差异。浑水膜孔灌单向交汇入渗和清水膜孔灌单向交汇入渗最大的区别是浑水中含沙量和泥沙粒度组成对膜孔灌单向交汇入渗特性的影响很大,从而影响浑水膜孔灌单向交汇入渗的节水效果和灌水质量。

本文在清水膜孔灌自由入渗和单向交汇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,开展室内不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗试验,以期扩展、充实地面灌溉理论和指导生产提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置^[11]由3部分组成:土箱、膜孔装置和马氏瓶。试验土箱采用10 mm厚的有机玻璃制作,土箱长×宽×高为26.5 cm×5.5 cm×25 cm,由于浑水膜孔灌单向交汇入渗相邻3个膜孔直径相同,且同时供水入渗,所以湿润锋的分布关于交汇面(零通量面,图1中EFGH)对称。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,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。进行不同泥沙粒

度组成浑水膜孔灌单向交汇入渗试验,利用加机械自动搅拌系统并带有刻度的马氏瓶自动供水,马氏瓶半径为4.5 cm,由透明有机玻璃制成。试验装置如图1所示。

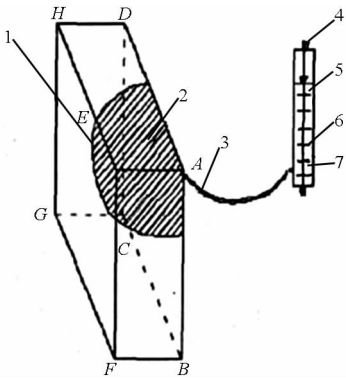


图1 浑水膜孔灌单向交汇入渗装置

Fig. 1 Device for single-line interference infiltration of muddy water film hole irrigation

1. 交汇界面(即零通量面) 2. 湿润体 3. 供水管 4. 电动机
5. 马氏瓶 6. 叶片 7. 转轴

1.2 试验方法

试验土样为西安粉土,风干碾碎后过2 mm筛,初始质量含水率为2.15%,饱和质量含水率为36.87%,土壤干容重为1.30 g/cm³,物理性粘粒体积分数为25.06%,饱和导水率为0.017 2 cm/min。土样按照干容重1.5 g/cm³分层(每层2.5 cm)称量装入试验土箱。在室内对相同条件下清水膜孔灌单向交汇入渗和4种不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗进行试验,4种不同的泥沙粒度组成如表1所示。其中,泥沙粒度机械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。浑水含沙率用风干碾碎后过1 mm筛的泥土配置,含沙率为质量比。采用膜孔直径为5 cm,含沙率为5%的4种不同泥沙粒度组成的浑水进行试验。在进行试验时,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改装的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单向交汇入渗自由面和交汇面湿润体形状和湿润锋的运移过程^[12]。

浑水泥沙粒度组成反映了各级泥沙粒径的相对含量,而这一相对含量直接影响着浑水中固液界面的理化性质和泥沙自身的受力特性,这种性质又影响着浑水泥沙的沉降规律和田面致密层的形成。根据泥沙颗粒在浑水中的界面性质、受力状态以及是

表 1 4 种不同的泥沙粒度组成 (体积分数)

Tab.1 Four different grades of clay and sand %

泥沙粒径 <i>d</i> /mm	浑水泥沙种类			
	A	B	C	D
0 ~ 0.001	0.90	0.70	0.62	1.11
0.001 ~ 0.002	3.06	3.97	4.77	4.66
0.002 ~ 0.005	7.43	9.49	11.90	11.57
0.005 ~ 0.01	8.87	10.90	14.46	19.89
0.01 ~ 0.025	38.96	33.75	34.59	34.72
0.025 ~ 0.05	15.44	29.45	23.71	17.26
0.05 ~ 0.1	12.77	8.88	6.47	7.06
0.1 ~ 0.25	10.33	2.01	2.13	1.46
0.25 ~ 0.5	1.40	0.40	0.73	1.17
0.5 ~ 1	0.83	0.45	0.63	1.10
<i>d</i> _{0.01}	20.26	25.06	31.75	37.23

注：*d*_{0.01}表示 4 种不同的泥沙粒度组成中粒径小于 0.01 mm 颗粒的体积分数。

否发生絮凝现象,可以将其分为 2 类:一类是粒径 *d* < 0.01 mm 的物理性粘性颗粒,另一类是 *d* ≥ 0.01 mm 的非粘性颗粒。物理性粘性与非粘性颗粒因受力性质的不同,使它们从微观和宏观方面对浑水产生不同的影响,其中物理性粘性颗粒是最活跃的成份,其含量是直接影响浑水入渗特性的主要因素^[13]。

由此可以看出,不同泥沙粒度组成对浑水膜孔灌单向交汇入渗特性的影响主要由物理性粘粒含量来反映。因此,在研究浑水泥沙粒度组成对浑水膜孔灌单向交汇入渗特性的影响时,可以用粒径 *d* < 0.01 mm 的物理性粘粒含量(*d*_{0.01})来表征不同泥沙粒度的特性。

2 结果与分析

2.1 单位膜孔面积累积入渗量变化规律

图 2 为不同泥沙粒度组成条件下浑水膜孔灌单向交汇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,清水膜孔单向交汇入渗和不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇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,并且随物理性粘粒含量 *d*_{0.01} 的增大,单位膜孔面积累积入渗量逐渐减小,这是因为在浑水膜孔灌单向交汇入渗过程中,浑水中泥沙在土壤表面沉积,形成一个沉积层,与清水膜孔灌单向交汇入渗对比,该沉积层改变了膜孔入渗的上边界条件,起到阻渗作用。在浑水膜孔灌单向交汇入渗过程中,泥沙中粗颗粒先在膜孔表面沉於,细颗粒后沉於,细颗粒含量越多,阻渗作用越强。大量研究表明,土壤的可塑性、胀缩性、吸湿性、渗透性及最大分子持水量等通常都以 0.01 mm 粒径为明显分界限。浑水

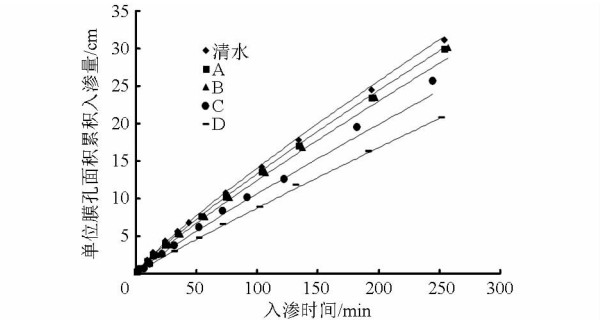


图 2 不同泥沙粒度组成的单位膜孔面积累积入渗量
Fig.2 Cumulative infiltration volumes per unit film hole area of different clay and sand grades

中物理性粘粒含量越高,其减渗效果越大^[14]。
经分析,浑水膜孔灌单向交汇入渗单位膜孔面积累积入渗量符合 Kostiakov 模型^[15],即

$$I = Kt^\alpha \tag{1}$$

式中 *I*——浑水膜孔灌单向交汇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

对图 2 中清水膜孔灌单向交汇入渗和 4 种不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗单位膜孔面积累积入渗量的实测数据利用式(1)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

浑水泥沙种类	<i>d</i> _{0.01} /%	<i>K</i> /(cm·min ⁻¹)	α	<i>R</i> ²
清水	0	0.259 6	0.867 2	0.996 4
A	20.26	0.237 2	0.874 8	0.999 8
B	25.06	0.208 9	0.887 3	0.991 8
C	31.75	0.163 8	0.906 0	0.982 6
D	37.23	0.116 3	0.938 6	0.997 0

由表 2 可知,对于清水膜孔灌单向交汇入渗和 4 种不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗单位膜孔面积累积入渗量拟合结果,其决定系数 *R*² 都大于 0.98,说明按照 Kostiakov 入渗模型建立的相关关系很显著。

可以看出,*K* 随着物理性粘粒含量 *d*_{0.01} 的增大而减小, α 随着 *d*_{0.01} 的增大而增大。通过分析发现 *K*、 α 与 *d*_{0.01} 的关系^[16]为

$$K_d/K_0 = 1 - ad_{0.01}^b \tag{2}$$

$$\alpha_d/\alpha_0 = 1 + cd_{0.01}^d \tag{3}$$

对表 2 中数据进行拟合得

$$K_d/K_0 = 1 - 10^{-5} d_{0.01}^{3.0186} \quad (R^2 = 0.9902) \tag{4}$$

$$\alpha_d/\alpha_0 = 1 + 2 \times 10^{-7} d_{0.01}^{3.5739} \quad (R^2 = 0.9901) \quad (5)$$

式中 K_d ——不同泥沙粒度组成的入渗系数, cm/min
 α_d ——不同泥沙粒度组成的入渗指数
 K_0 ——清水的入渗系数, cm/min
 α_0 ——清水的入渗指数
 K_d/K_0 ——相对入渗系数
 α_d/α_0 ——相对入渗指数

拟合的决定系数 R^2 都在 0.99 以上,说明 K_d 、 α_d 与 $d_{0.01}$ 的相关性很好。将式(4)、(5)代入式(1)可以得到不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗单位膜孔面积累积入渗量模型为

$$I = K_0 (1 - 10^{-5} d_{0.01}^{3.0186}) t^{\alpha_0 (1 + 2 \times 10^{-7} d_{0.01}^{3.5739})}$$

2.2 交汇时间变化规律

图3为不同泥沙粒度组成条件下浑水膜孔灌单向交汇入渗发生交汇的时间。可以看出,在其他条件一定的情况下,浑水膜孔灌单向交汇入渗发生交汇的时间随着物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的增大而增大。这是由于在其他条件一定的情况下,物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 越大,膜孔入渗的水平湿润锋运动越慢,发生交汇的时间越晚。经分析发现,浑水膜孔单向交汇入渗的交汇时间 T 与 $d_{0.01}$ 的关系符合指数函数

$$T = 6.5939 e^{0.0328 d_{0.01}} \quad (R^2 = 0.9870) \quad (6)$$

式中 T ——浑水膜孔单向交汇入渗发生交汇的时间, min

其拟合决定系数 R^2 大于 0.98,说明拟合结果很好。

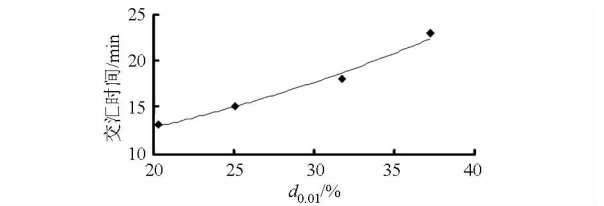


图3 交汇时间与 $d_{0.01}$ 的关系曲线
Fig.3 Relation curve of interference time and $d_{0.01}$

2.3 湿润锋运移变化规律

2.3.1 自由面垂直湿润锋运移变化规律

图4为清水膜孔单向交汇入渗和不同泥沙粒度组成的浑水膜孔单向交汇入渗自由面垂直方向湿润锋运移曲线。可以看出,清水膜孔单向交汇入渗和不同泥沙粒度组成的浑水膜孔单向交汇入渗自由面垂直湿润锋运移距离均随着时间的延长而不断增大,在相同入渗时间内,随物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的增大,垂直湿润锋运移距离逐渐减小。这是因为在浑水膜孔灌单向交汇入渗过程中,浑水中泥沙在土壤表面沉积,形成一个沉积层,这个沉积层改变了膜孔入渗的上边界条件,且起到阻渗作用,使单位膜孔面积累积入渗量减小。

浑水膜孔灌单向交汇入渗自由面垂直湿润锋运移距离与入渗时间呈幂函数关系,即

$$S_{zi} = Et^F \quad (7)$$

式中 S_{zi} ——浑水膜孔灌单向交汇入渗自由面垂直湿润锋运移距离, cm

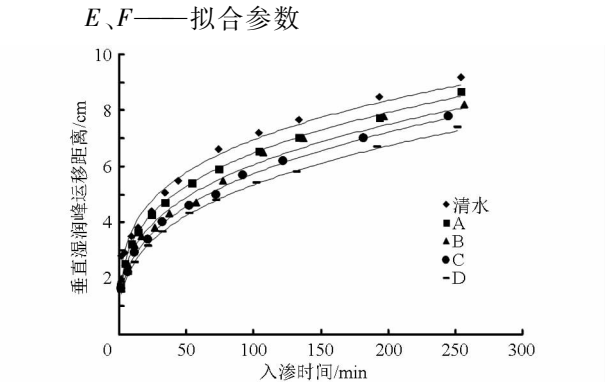


图4 自由面垂直湿润锋运移距离随入渗时间的变化曲线
Fig.4 Vertical wetting front movement distance curves for free surface

利用式(7)对图4中的清水膜孔灌单向交汇入渗和4种不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗自由面垂直湿润锋运移距离与入渗时间进行拟合,拟合结果见表3。

表3 自由面垂直湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数
Tab.3 Fitting parameters of vertical wetting front movement distance and infiltration time for free surface

浑水泥沙种类	$d_{0.01}/\%$	E	F	R^2
清水	0	2.046 0	0.265 5	0.980 5
A	20.26	1.696 6	0.290 8	0.999 7
B	25.06	1.466 9	0.307 9	0.985 4
C	31.75	1.247 0	0.331 4	0.995 3
D	37.23	1.146 8	0.333 9	0.998 0

由表3可以看出,对于清水膜孔灌单向交汇入渗和4种不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗自由面垂直湿润锋运移距离与入渗时间拟合结果,其决定系数 R^2 都大于 0.98,说明按照该幂函数模型建立的相关关系较显著。

可以看出,随着物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的不断增大,拟合参数 E 不断减小,参数 F 不断增大。通过分析发现 E 、 F 与 $d_{0.01}$ 符合关系

$$E_d/E_0 = e e^{f d_{0.01}} \quad (8)$$

$$F_d/F_0 = g e^{h d_{0.01}} \quad (9)$$

用式(8)、(9)对表3中的数据进行拟合得
$$E_d/E_0 = 1.0437 e^{-0.0158 d_{0.01}} \quad (R^2 = 0.9413) \quad (10)$$

$$F_d/F_0 = 0.9888 e^{0.0065 d_{0.01}} \quad (R^2 = 0.9534) \quad (11)$$

式中 $E_d、F_d$ ——不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗自由面垂直湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数

$E_0、F_0$ ——清水膜孔灌单向交汇入渗自由面垂直湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数

$e、f、g、h$ ——拟合参数

拟合的决定系数 R^2 都在 0.94 以上,说明 $E_d、F_d$ 与 $d_{0.01}$ 的相关性很好。将式(10)、(11)代入式(7)可以得到不同粒度组成的浑水单向交汇入渗自由面垂直湿润锋运移距离与入渗时间模型为

$$S_{zi} = E_0 (1.0437 e^{-0.0158 d_{0.01}}) t^{F_0 (0.9888 e^{0.0065 d_{0.01}})}$$

2.3.2 自由面水平湿润锋运移变化规律

从图 5 可看出,入渗开始时,自由面湿润锋运移距离从零瞬时增加到膜孔半径,清水膜孔单向交汇入渗和不同泥沙粒度组成的浑水膜孔单向交汇入渗自由面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,随物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的增大,自由面水平湿润锋运移距离逐渐减小,这主要是因为浑水膜孔灌自由入渗过程中,泥沙在土壤表面沉积,形成一个沉积层,该沉积层起到阻渗作用,使单位膜孔面积累积入渗量减小。

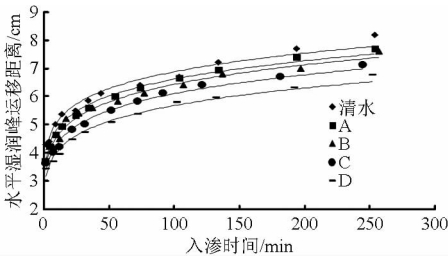


图 5 自由面水平湿润锋运移距离随入渗时间的变化曲线

Fig. 5 Horizontal wetting front movement distance curves for free surface

浑水膜孔灌单向交汇入渗自由面水平湿润锋运移距离随入渗时间变化规律符合

$$S_{xi} = D/2 + Gt^H \tag{12}$$

式中 S_{xi} ——浑水膜孔灌单向交汇入渗自由面水平湿润锋运移距离,cm

D ——膜孔直径,cm

$G、H$ ——拟合参数

利用式(12)对图 5 中的清水膜孔灌单向交汇入渗和 4 种不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗自由面水平湿润锋运移距离与入渗时间进行拟合,拟合结果见表 4。

由表 4 可以看出,对于清水膜孔灌单向交汇入渗和 4 种不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗自由面水平湿润锋运移距离与入渗时间拟合结

表 4 自由面水平湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数
Tab.4 Fitting parameters of horizontal wetting front movement distance and infiltration time for free surface

浑水泥沙种类	$d_{0.01}/\%$	G	H	R^2
清水	0	1.455 3	0.238 1	0.988 9
A	20.26	1.271 1	0.256 1	0.999 9
B	25.06	1.025 7	0.291 2	0.978 7
C	31.75	0.853 4	0.308 4	0.992 8
D	37.23	0.646 6	0.337 1	0.990 7

果,其决定系数 R^2 都大于 0.97,说明该模型能很好地描述浑水膜孔灌单向交汇入渗自由面水平湿润锋运移距离与入渗时间的变化规律。

同时可以看出,随着物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的不断增大,拟合参数 G 不断减小,参数 H 不断增大。通过分析发现 $G、H$ 与 $d_{0.01}$ 符合关系

$$G_d/G_0 = i e^{jd_{0.01}} \tag{13}$$

$$H_d/H_0 = p e^{qd_{0.01}} \tag{14}$$

对表 4 数据用式(13)、(14)进行拟合得

$$G_d/G_0 = 1.0826 e^{-0.0199 d_{0.01}} \quad (R^2 = 0.8811) \tag{15}$$

$$H_d/H_0 = 0.9764 e^{0.0092 d_{0.01}} \quad (R^2 = 0.9480) \tag{16}$$

式中 $G_d、H_d$ ——不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗自由面水平湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数

$G_0、H_0$ ——清水膜孔灌单向交汇入渗自由面水平湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数

$i、j、p、q$ ——拟合参数

拟合的决定系数 R^2 都在 0.9 左右,说明 $G_d、H_d$ 与 $d_{0.01}$ 的相关性很好。将式(15)、(16)代入式(12)可以得到不同泥沙粒度组成的浑水单向交汇入渗自由面水平湿润锋运移距离与入渗时间模型为

$$S_{xi} = D/2 + G_0 (1.0826 e^{-0.0199 d_{0.01}}) t^{H_0 (0.9764 e^{0.0092 d_{0.01}})}$$

2.3.3 交汇面垂直和水平湿润锋运移变化规律

图 6 和图 7 分别为不同泥沙粒度组成的浑水膜孔单向交汇入渗交汇面垂直方向和水平方向湿润锋运移变化曲线。可以看出,不同泥沙粒度组成的浑水膜孔单向交汇入渗交汇面垂直方向和水平方向湿润锋均随着入渗时间的增加而逐渐增大,在相同的入渗时间内,随物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的增大,交汇面垂直方向和水平方向湿润锋运移距离都逐渐减小。这主要是由于浑水膜孔灌单向交汇入渗过程中,泥沙在土壤表面沉积,形成一个沉积层,该沉积层起到阻渗作用,浑水中物理性粘粒含量越高,其减渗效果越大,使单位膜孔面积累积入渗量减小。

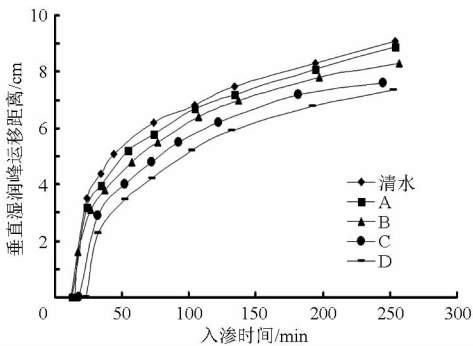


图 6 交汇面垂直湿润锋运移距离随入渗时间的变化曲线

Fig. 6 Vertical wetting front movement distance curves for interference surface

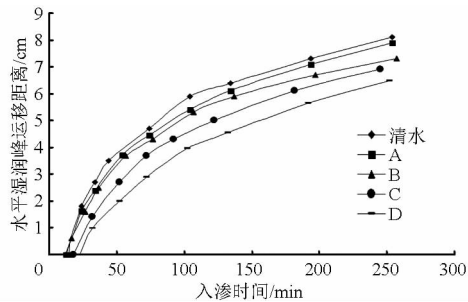


图 7 交汇面水平湿润锋运移距离随入渗时间的变化曲线

Fig. 7 Horizontal wetting front movement distance curves for interference surface

浑水膜孔灌单向交汇入渗交汇面垂直和水平湿润锋运移距离与入渗时间都符合关系

$$S_j = M(t - T)^N \tag{17}$$

式中 S_j ——浑水膜孔灌单向交汇入渗交汇面垂直和水平方向湿润锋运移距离, cm

M 、 N ——交汇面垂直和水平方向拟合参数

利用式(17)对图 6 和图 7 中的交汇面垂直和水平湿润锋进行拟合,拟合结果见表 5。表 5 中, M_z 、 N_z 表示垂直方向拟合参数, M_x 、 N_x 表示水平方向拟合参数。

由表 5 可以看出,对于不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗交汇面垂直和水平方向湿润锋运移距离与入渗时间拟合结果,其决定系数 R^2 都大于 0.97,说明建立的相关关系很好。

可以看出,随着物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的不断增大,拟合参数 M_z 、 M_x 都不断减小,而 N_z 、 N_x 都逐渐增大。通过分析发现交汇面垂直方向和水平方向拟合参数 M 、 N 与 $d_{0.01}$ 都符合关系

$$M_c/M_0 = 1 - md_{0.01}^y \tag{18}$$

$$N_c/N_0 = 1 + nd_{0.01}^k \tag{19}$$

对表 5 中数据进行拟合得交汇面垂直方向

表 5 交汇面垂直和水平湿润锋运移距离与入渗时间拟合参数

Tab. 5 Fitting parameters of vertical and horizontal wetting front movement distances and infiltration time for interference surface

浑水泥沙种类	$d_{0.01}/\%$	垂直方向		R^2	水平方向		R^2
		M_z	N_z		M_x	N_x	
清水	0	1.680 6	0.310 1	0.995 0	0.585 1	0.493 6	0.982 4
A	20.26	1.473 1	0.330 8	0.996 8	0.509 4	0.513 7	0.988 0
B	25.06	1.289 0	0.348 4	0.997 8	0.447 3	0.533 4	0.988 9
C	31.75	1.147 3	0.357 4	0.993 6	0.351 2	0.566 0	0.978 3
D	37.23	0.996 3	0.373 4	0.998 0	0.274 9	0.593 5	0.994 3

$$M_{dz}/M_{0z} = 1 - 4.6 \times 10^{-4} d_{0.01}^{1.892\ 8} \quad (R^2 = 0.961\ 3) \tag{20}$$

$$N_{dz}/N_{0z} = 1 + 4 \times 10^{-4} d_{0.01}^{1.727\ 4} \quad (R^2 = 0.947\ 7) \tag{21}$$

水平方向

$$M_{dx}/M_{0x} = 1 - 10^{-4} d_{0.01}^{2.319\ 8} \quad (R^2 = 0.991\ 8) \tag{22}$$

$$N_{dx}/N_{0x} = 1 + 2 \times 10^{-5} d_{0.01}^{2.635\ 1} \quad (R^2 = 0.991\ 7) \tag{23}$$

式中 M_{dz} 、 N_{dz} 、 M_{dx} 、 N_{dx} ——不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗交汇面垂直方向和水平方向湿润锋运移距离参数

M_{0z} 、 N_{0z} 、 M_{0x} 、 N_{0x} ——清水膜孔灌单向交汇入渗交汇面垂直方向和水平方向湿润锋运移距离参数

垂直方向和水平方向拟合结果的决定系数 R^2 平均值都在 0.94 以上,说明 M_d 、 N_d 与 $d_{0.01}$ 相关性很好。将拟合结果代入式(17)从而可以得到浑水膜孔灌单向交汇入渗交汇面垂直和水平方向湿润锋运移距离与入渗时间模型分别为

$$S_{zj} = M_{0z} (1 - 4.6 \times 10^{-4} d_{0.01}^{1.892\ 8}) (t - T)^{N_{0z} (1 + 4 \times 10^{-4} d_{0.01}^{1.727\ 4})}$$

$$S_{xj} = M_{0x} (1 - 10^{-4} d_{0.01}^{2.319\ 8}) (t - T)^{N_{0x} (1 + 2 \times 10^{-5} d_{0.01}^{2.635\ 1})}$$

2.4 浑水膜孔灌单向交汇入渗的减渗特性

由表 6 可以看出,在入渗 254 min 时,不同泥沙粒

度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗单位膜孔面积累积入渗量随着物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的增大,逐渐减小。

表 6 不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向
交汇入渗减渗性

Tab.6 Infiltration reduction feature for single-line
interference infiltration of muddy water film hole
irrigation under different clay and sand grades

浑水泥沙种类	$d_{0.01}/\%$	254 min 时累积入渗量/cm	减渗率 $\eta/\%$
清水	0	31.20	0
A	20.26	30.12	3.46
B	25.06	28.43	8.88
C	31.75	24.72	20.76
D	37.23	21.03	32.61

为了表述不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗相对相同条件下清水膜孔灌单向交汇入渗的减渗特性,定义减渗率^[17]为

$$\eta = (I_0 - I_d) / I_0 \times 100\% \tag{24}$$

式中 η ——减渗率, %

I_0 ——254 min 时清水膜孔灌单向交汇入渗单位膜孔面积累积入渗量, cm

I_d ——254 min 时不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗单位膜孔面积累积入渗量, cm

对表 6 中物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 和减渗率 η 进行拟合,可以得到

$$\eta = 0.2853e^{0.1309d_{0.01}} \quad (R^2 = 0.9711) \tag{25}$$

其拟合决定系数 R^2 大于 0.97,说明拟合结果较好。

3 结论

(1)不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇

入渗单位膜孔面积的累积入渗量与入渗时间符合 Kostiakov 幂函数模型;随着物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的增大,累积入渗量逐渐减小,且均小于相同条件下的清水累积入渗量;入渗系数 K 随着 $d_{0.01}$ 的增大而减小,入渗指数 α 随着 $d_{0.01}$ 的增大而增大;在其他条件一定的情况下,浑水膜孔灌单向交汇入渗发生交汇的时间随着 $d_{0.01}$ 的增大而增大;建立了入渗参数、单向交汇入渗的交汇时间与不同泥沙粒度组成的关系和单位膜孔面积的累积入渗量模型,其相关性较好。

(2)自由面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 $S_{xi} = D/2 + Gt^H$;在相同入渗时间内,随着物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的增大,自由面垂直和水平湿润锋运移距离都逐渐减小;建立了自由面垂直和水平湿润锋运移参数与不同泥沙粒度组成的关系;提出了自由面垂直和水平湿润锋运移模型,其相关性很好。

(3)交汇面垂直和水平湿润锋运移距离与入渗时间都符合 $S_j = M(t - T)^N$;在相同入渗时间内,随着物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的增大,交汇面垂直和水平湿润锋运移距离都逐渐减小;建立了交汇面垂直和水平湿润锋运移参数与不同泥沙粒度组成的关系;提出了交汇面垂直和水平湿润锋运移模型,其相关性很好。

(4)不同泥沙粒度组成的浑水膜孔灌单向交汇入渗与相同条件下清水对比具有减渗作用;随着物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 的增大,减渗率逐渐增大;提出了减渗率 η 与物理性粘粒含量 $d_{0.01}$ 之间的指数函数模型,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 BEN-ASHER J. Infiltration and water extraction from trickle irrigation source; the effective hemisphere mode[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986,50(4):882 – 887.

3 CHU S T. Green-Ampt analysis of wetting patterns for surface emitters[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1994, 120(2): 414 – 421.

4 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.

5 WARRICK A W. Time-dependent linearized infiltration I. Point sources[J]. Soil Science Society of America Journal, 1974, 38(3): 383 – 386.

6 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,2003,34(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, 2003,34(5):62 – 68. (in Chinese)

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 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)
- 9 费良军,程东娟,朱兴华. 单膜孔点源肥液入渗水氮分布特性试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(10):12-15.
FEI Liangjun, CHENG Dongjuan, ZHU Xinghua. Water and NO_3^- -N distribution characteristics in single film hole point source fertile solution infiltration[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(10):12-15. (in Chinese)
- 10 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)
- 11 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)
- 12 吴军虎. 膜孔灌溉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)
- 13 费良军,王文焰. 泥沙粒度组成对浑水间歇入渗特性的影响研究[J]. 农业工程学报,1999,15(1):139-143.
FEI Liangjun, WANG Wenyan. Effect of clay and sand grade of muddy water on the characteristics of intermittent infiltration [J]. Transactions of the CSAE,1999,15(1):139-143. (in Chinese)
- 14 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)
- 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,1999,30(7):33-39.
JIAO Xiyun, WANG Wenyan, ZHANG Jianfeng. Experimental research on infiltration from single hole of membrane[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1999,30(7):33-39. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 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)
-

(上接第 98 页)

- 24 LYNCH J. Root architecture and plant productivity [J]. Plant Physiology, 1995, 109(1):7-13.
- 25 任小龙,贾志宽,陈小莉,等. 模拟降水量条件下垄沟集雨种植对土壤养分分布及夏玉米根系生长的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(12):94-99.
REN Xiaolong, JIA Zhikuan, CHEN Xiaoli, et al. Effect of ridge and furrow planting of rainfall harvesting on soil available nutrient distribution and root growth of summer corn under simulated rainfall conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(12):94-99. (in Chinese)
- 26 李富春,任祥,王琦,等. 垄沟集雨种植对燕麦根系分布特征的影响[J]. 生态学杂志,2013,32(11):2966-2972.
LI Fuchun, REN Xiang, WANG Qi, et al. Effects of rainfall harvesting in ridges and furrows on root distribution patterns of oat in semi-arid area of Gansu, Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(11):2966-2972. (in Chinese)
- 27 李凤民,王静,赵松岭. 半干旱黄土高原给水高效农业的发展[J]. 生态学报,1999,19(2):259-264.
LI Fengmin, WANG Jing, ZHAO Songling. The rainwater harvesting technology approach for dryland agriculture in semi-arid Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(2):259-264. (in Chinese)
- 28 韩娟,廖允成,贾志宽,等. 半湿润偏旱区垄沟覆盖种植对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 作物学报,2014,40(1):101-109.
HAN Juan, LIAO Yuncheng, JIA Zhikuan, et al. Effects of ridging with mulching on yield and water use efficiency in winter wheat in semi-humid drought-prone region in China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(1):101-109. (in Chinese)