

浑水膜孔灌多向交汇入渗及减渗特性

钟 韵, 费良军, 陈 琳, 傅渝亮

(西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

摘要: 浑水灌溉是我国黄河流域引黄灌区灌溉的主要特点, 其中浑水中的泥沙含量对土壤入渗特性有较大的影响, 为揭示浑水膜孔灌多向交汇入渗的减渗特性, 通过开展浑水及清水膜孔灌入渗试验, 建立了浑水膜孔灌自由入渗相对于清水的减渗率及浑水膜孔灌多向交汇入渗相对于自由入渗的减渗率与入渗时间之间的量化关系, 提出了由清水膜孔灌自由入渗量推求浑水膜孔灌多向交汇入渗量的模型。结果表明: 浑水膜孔灌自由入渗较清水的减渗量随入渗时间的延长而增大, 但增大幅度慢慢变小, 入渗后期其减渗量基本呈线性增加, 其减渗率随时间的增大先快速增大后缓慢减小, 入渗后期减渗率基本稳定; 当入渗产生交汇后, 入渗能力明显减小, 多向交汇入渗和单向交汇入渗相对自由入渗的减渗率均随入渗时间的增长而增大, 多向交汇入渗相对单向交汇入渗也存在减渗作用, 3 条减渗率曲线的变化率随着时间的增长而逐渐减小。

关键词: 浑水膜孔入渗; 减渗作用; 多向交汇; 减渗率

中图分类号: S275.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0269-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.01.042

Experimental Study on the Characteristics of Bilateral Interference Infiltration and Infiltration Reduction in Film Hole Irrigation with Muddy Water

ZHONG Yun, FEI Liangjun, CHEN Lin, FU Yuliang

(Research Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: Muddy water irrigation is the main feature of irrigation in the Yellow River irrigation area of the Yellow River Basin. The sediment content in muddy water has important impact on soil water infiltration. The muddy water and clean water film hole irrigation experiments were conducted to reveal the infiltration reduction characteristics of bilateral interference under muddy water film hole irrigation. The relationship between infiltration reduction rate of free infiltration under muddy water film hole irrigation compared to clean water and infiltration time, and the relationship between the infiltration reduction rate of bilateral interference under muddy water film hole irrigation compared to free infiltration and infiltration time had been established in this study. Then we proposed a model to reconstruct the infiltration volume of bilateral interference infiltration under film hole irrigation with muddy water by the infiltration volume of free infiltration under clean water film hole irrigation. The results showed that the infiltration reduction volume of free infiltration under muddy water irrigation compared with clean water increased with the increasing of infiltration time, but the increasing degree reduced gradually. The infiltration reduction volume increased linearly at the later stage of infiltration, and the infiltration reduction rate increased rapidly and then decreased slowly with the increasing of infiltration time. It maintained stable at the later stage of infiltration. The infiltration capacity reduced obviously when the intersection infiltration occurred. The infiltration reduction rates of bilateral interference infiltration and one-way intersection infiltration compared with free infiltration were both increased with the increasing of infiltration time. Compared with one-way intersection infiltration, the bilateral interference infiltration also had the effect of reducing infiltration. The change rates of three infiltration curves were decreased with the increasing of time.

Keywords: film hole infiltration with muddy water; infiltration reduction effect; bilateral interference infiltration; reduced infiltration rate

膜孔灌既具有地面灌的特点, 又具有滴灌局部灌的效果, 从而提高了灌溉水利用率, 增强了人为对地

面灌溉水流入渗的操控性。关于膜孔灌方面的研究, 目前国外鲜有研究报道, 国内学者在陕西和新疆等地

开展了在清水条件下的膜孔灌入渗特性、田面水流运动、灌溉技术要素、灌溉质量和影响因素等方面的室内外试验研究工作,已取得了一批重要的研究成果^[1-5];但以上研究大都是建立在膜孔灌自由入渗的基础上,而在实际应用中交汇入渗是膜孔灌常见的情形,交汇入渗比膜孔自由入渗复杂得多,故自由入渗条件下的入渗规律不适用于交汇条件下,对交汇入渗研究具有重要的生产实际意义,且以上研究都是在清水条件下进行,未考虑水中泥沙对入渗的影响。而长期以来,在水资源短缺的黄河流域,大部分是以多泥沙河流为水源的浑水灌区,由于水资源短缺往往不得不引用浑水灌溉,所以利用浑水灌溉是其显著特点,且浑水灌溉在我国具有独特性,其在缓减旱情和增加土壤肥力、改良盐碱地和土壤质地等方面发挥了巨大作用,但由于浑水灌溉时泥沙的沉积改变了土壤表面的机械组成,并影响了土壤的入渗机制^[6],使浑水入渗过程与清水相比存在很大差异,故现有的清水入渗条件下的有关灌溉研究成果不再适用于浑水条件下应用,因此浑水入渗规律当前亟待研究。

关于浑水灌溉的研究,国外尚未见相关报道,目前有文献报道的仅有 Heman 等^[7]针对大池塘渗漏问题对浑水入渗规律进行了探讨,主要研究了浑水泥沙沉积中的泥沙颗粒运动状况对渗流的影响特性;国内在浑水灌溉方面的研究主要集中在浑水一维垂直连续入渗和波涌灌间歇入渗方面。王全九等^[8]通过对一维浑水入渗特性和浑水入渗规律的分析,对现有的 Green-Ampt 入渗模式进行改进,将泥沙沉积对入渗的影响归结为对湿润锋平均吸力的影响;曹惠提等^[9]通过一维垂直入渗试验,探讨了浑水土壤一维垂直入渗特性及其影响因素,指出浑水降低了土壤入渗能力,这主要与浑水含沙率和泥沙中物理性黏粒含量有关;费良军等^[10]研究了浑水波涌灌入渗模型,基于不同的已知条件和影响因素,提出了 3 个浑水间歇入渗模型;汪志荣等^[11]提出了基于不同含沙率的浑水波涌灌入渗的 Green-Ampt 模型。而关于浑水膜孔灌,国内外有关方面的研究报导甚少^[12-15],本文结合浑水灌溉的实际,开展了浑水膜孔灌多向交汇入渗减渗特性的试验研究,不仅对缓解我国北方地区水资源紧缺、扩灌增产、提高灌溉质量等方面具有十分重要的现实意义,而且在浑水膜孔灌入渗特性、灌水技术要素以及在地面灌溉理论与技术等方面均具有明显的创新性,从而也更加突出了膜孔灌在我国研究的特色与优势。

1 材料与方法

1.1 计算方法

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,与清水膜孔灌自由入渗相比,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,所以浑水膜孔灌自由入渗与清水膜孔灌自由入渗之间存在一个减渗率 $\eta_{清-浑}$ 。

由于浑水膜孔灌多向交汇入渗为充分供水条件下的空间三维入渗,在室内试验条件下,水分入渗过程中的土水势主要包括重力势、压力势和基质势等,土壤水分在土水势的驱动下运移;在浑水膜孔灌多向交汇入渗发生交汇后,在 X 轴方向,交汇界面 ADD'A'和 CDD'C'的二侧具有相同的土水势,X 方向的水流量为零,即 ADD'A'和 CDD'C'零通量面上水分无水平方向运动,所以导致浑水膜孔灌多向交汇入渗量与浑水膜孔灌自由入渗量存在较大差别,两者之间也存在减渗率 $\eta_{自-交}$ 。根据以上分析可知浑水膜孔灌自由入渗量和浑水膜孔灌多向交汇入渗量计算公式为:

$$I_1 = (1 - \eta_{清-浑}) I_0 \quad (1)$$

$$I_3 = (1 - \eta_{自-交}) I_1 \quad (2)$$

式中: I_0 为清水膜孔灌自由入渗量 (cm); I_1 为浑水膜孔灌自由入渗量 (cm); I_3 为浑水膜孔灌多向交汇入渗量 (cm); $\eta_{清-浑}$ 为浑水膜孔灌自由入渗相对于清水的减渗率 (%); $\eta_{自-交}$ 为浑水膜孔灌多向交汇入渗相对于浑水膜孔灌自由入渗的减渗率 (%)。

结合公式(1)、公式(2)可推得浑水膜孔灌多向交汇入渗量的模型,根据此模型只需通过已有清水膜孔灌自由入渗研究成果便可计算出浑水膜孔灌多向交汇入渗量,从而为制定合理灌溉制度提供依据,控制灌水量,达到节水、快速、高效灌溉的目的。

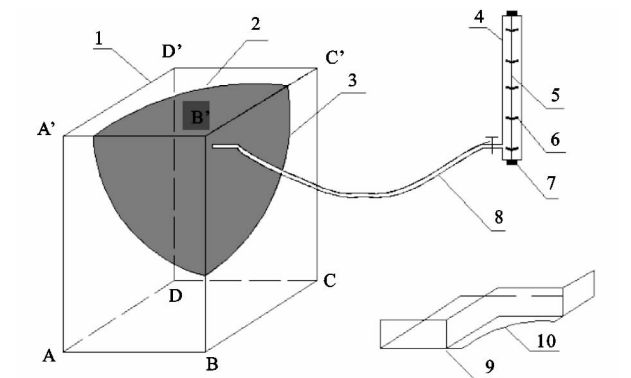
$$I_3 = (1 - \eta_{清-浑})(1 - \eta_{自-交}) I_0 \quad (3)$$

通过以上分析可知,浑水膜孔灌多向交汇入渗相对清水膜孔灌自由入渗经过 2 次减渗过程,在讨论其减渗率 η 的关系时可以分为 2 个过程来考虑^[16],第 1 个减渗过程为浑水膜孔灌自由入渗相对于清水膜孔灌自由入渗的减渗率 $\eta_{清-浑}$,第 2 个减渗过程为浑水膜孔灌多向交汇入渗相对于浑水膜孔灌自由入渗的减渗率 $\eta_{自-交}$ 。为研究浑水膜孔灌多向交汇入渗减渗特性,现分别逐个对其 2 个减渗率进行分析。

1.2 试验材料

为了研究浑水膜孔灌多向交汇入渗及其减渗特性,利用西安理工大学水资源研究所研制的点源入渗试验装置在室内分别进行了浑水和清水膜孔灌自由入渗模拟(株距和行距均为 24 cm,为半无限体,行与行、株与株之间不产生交汇)、浑水膜孔灌单向交汇入渗模拟(行距为 24 cm,株距为 12 cm,有限体,行与行之间不产生交汇,株与株之间产生交汇)及浑水膜孔灌多向交汇入渗模拟(行距为 16 cm,株距为 12 cm,有限体,行与行、株与株之间均产生交汇)试验。图 1 为浑水膜孔灌多向交汇入渗装置,试验土箱采用 10

mm 厚的有机玻璃制作,土箱长×宽×高为 8 cm×6 cm×15 cm,浑水膜孔灌点源自由入渗和单向交汇入渗的室内试验装置与图 1 类似,仅土箱大小不同。由于浑水膜孔灌多向交汇入渗相邻 3 个膜孔大小相同且同时供水入渗,所以湿润锋和湿润体内的土壤含水率分布关于 ADD'A'和 CDD'C'对称,因而 ADD'A'和 CDD'C'面为膜孔多向交汇界面,即零通量面。试验在土箱中土壤上表层覆膜,入渗点源采用 1/4 膜孔面积的方形水室,置于土箱的一角,以便于观测湿润锋的运移过程。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 mm,结合马氏瓶调整水室的水头。试验利用改进的具有机械自动搅拌系统的透明有机玻璃马氏瓶自动供水,马氏瓶内径为 9 cm,传动轴直径为 1.4 cm,高 90 cm,经计算叶片体积仅为马氏瓶体积的 2%,可忽略。



1 为土箱;2 为土面;3 为湿润锋;4 为马氏瓶;5 为转轴;6 为叶片;7 为电动机;8 为供水管;9 为膜孔装置;10 为 1/4 膜孔

图 1 浑水膜孔灌多向交汇入渗装置

1.3 试验方法

试验土样为西安粉砂土,风干碾碎后过 2 mm 筛,土壤初始质量含水量为 2.25%,饱和质量含水量为 36.87%,饱和导水率为 0.017 2 cm/min。试验土壤颗粒组成使用英国马尔文仪器有限责任公司生产的 Mastersizer-2000 激光粒度分析仪测定,粒径在 $d \leq 0.001$, $0.001 < d \leq 0.01$, $0.01 < d \leq 0.1$, $0.1 < d \leq 2$ mm 分别占 0.70%, 24.36%, 72.08%, 2.86%;试验配置重量含沙率为 5%,运用同种粉砂土配置,风干碾碎后过 1 mm 筛,物理性黏粒含量为 25.06%;采用膜孔直径为 5 cm 进行浑水膜孔灌入渗试验;供试土样干容重为 1.40 g/cm³,按 5 cm 分层称重装入试验土箱;在进行试验时,将 1/4 膜孔置于土箱装置的垂直角上,按照先密后疏的时间间隔通过带有刻度改进的马氏瓶读取累积入渗量,将通过马氏瓶读取的累积入渗量除以膜孔面积即得膜孔灌单位膜孔面积累积入渗量(文中所涉及入渗量均为单位膜孔面积累积入渗量)。

2 结果与分析

2.1 浑水膜孔灌自由入渗减渗特性

由图 2 可知,浑水和清水的入渗量均随入渗时间的延长而增大,经分析考斯加可夫模型仍可较好的描述浑水膜孔灌自由入渗量曲线,这与王锦辉等^[17]研究的结论一致;相同入渗条件下,浑水膜孔灌自由入渗量小于清水入渗量,清水入渗 190 min 时入渗量达 35.47 cm,而浑水入渗 190 min 后其入渗量为 29.60 cm,减小率达 16.55%,减渗效果显著,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,形成一个致密层,与清水膜孔灌自由入渗相比,该致密层改变了膜孔入渗土壤的上边界条件,起到了阻渗作用。

以清水膜孔灌自由入渗量为基础,计算出相同条件下的浑水膜孔灌自由入渗减渗量,点绘浑水膜孔灌自由入渗减渗量随入渗时间的变化曲线。由图 3 可知,浑水膜孔灌自由入渗的减渗量随着入渗时间的延长而增大,但增大幅度逐渐变小,入渗后期浑水膜孔灌自由入渗减渗量基本上呈线性增加。

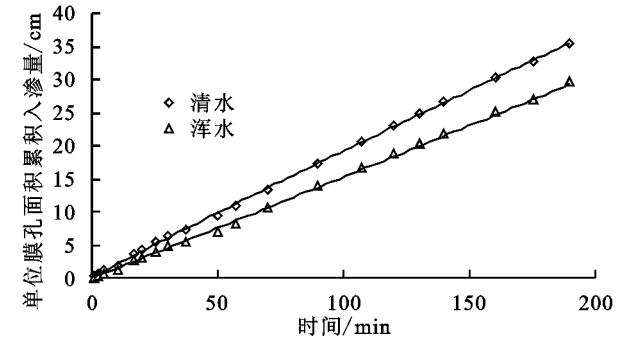


图 2 累积入渗量曲线

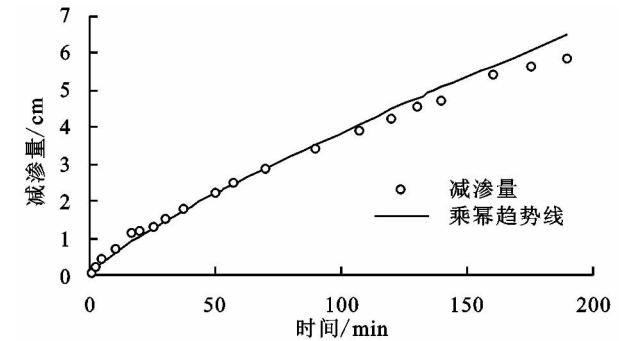


图 3 单位膜孔面积累积减渗量曲线

为了更加清楚地反映浑水的减渗效果,以清水膜孔灌自由入渗为对照,利用减渗率^[1]概念来表述浑水对膜孔灌自由入渗能力的影响,浑水膜孔灌自由入渗减渗率 $\eta_{清-浑}$ 可表示为:

$$\eta_{清-浑} = \frac{I_0 - I_i}{I_0} \times 100\% \tag{4}$$

通过公式(4)计算浑水膜孔灌自由入渗相对于清水的减渗率。由表 1 可知,浑水膜孔灌自由入渗的减渗率随入渗时间延长先快速增大而后缓慢减小,最大

值发生在 30~57 min,入渗后期减渗率大致稳定。经分析表 1 中减渗率 $\eta_{\text{清-浑}}$ 与入渗时间 t 之间的关系可知两者之间符合一元二次函数关系,经拟合方程为:

$$\eta_{\text{清-浑}} = -0.0008(t-43)^2 + 31 \quad R^2 = 0.959 \quad (5)$$

其决定系数为 0.959 ($P < 0.01$),均方根误差为

表 1 浑水膜孔灌自由入渗减渗率

指标	t/min											
	5	10	20	30	57	70	90	120	140	160	175	190
$\eta_{\text{清-浑}}/\%$	27.00	27.50	28.60	30.00	30.00	29.10	28.40	25.70	22.30	19.80	17.90	16.55

2.2 浑水膜孔灌多向交汇入渗减渗特性

由图 4 可知,浑水膜孔单向交汇入渗能力小于浑水膜孔自由入渗能力,而浑水膜孔多向交汇入渗能力又小于浑水膜孔单向交汇入渗能力,这是由于浑水膜孔灌交汇入渗的交汇界面为零通量面,即该界面两侧不存在水势梯度,水分不能通过零通量面,减弱了水分的水平侧渗,从而达到了交汇入渗的减渗效果。在 3 种入渗方式下,其入渗量均随着入渗时间的增大而增大,当入渗产生交汇后,其入渗能力显著减小,浑水膜孔自由入渗 190 min 时入渗量达 29.60 cm,而单向交汇入渗 190 min 后其入渗量为 26.52 cm,减小率达 10.41%,多向交汇入渗 190 min 后其入渗量仅为 25.68 cm,减小率高达 13.24%,减渗效果显著。从图 4 还可知,两条减渗量曲线也随着入渗时间的延长而逐渐上升,经分析交汇入渗的减渗量与入渗时间之间符合幂函数关系,函数关系式为:

$$\Delta I_1 = a(t-t_0)^b \quad t \geq t_0 \quad (6)$$

$$\Delta I_2 = m(t-t_1)^n \quad t \geq t_1 \quad (7)$$

式中: ΔI_1 为浑水膜孔灌单向交汇入渗较浑水膜孔灌自由入渗的减渗量(cm); ΔI_2 为浑水膜孔灌多向交汇入渗较浑水膜孔灌单向交汇入渗的减渗量(cm); t 为入渗时间(min); t_0 为浑水膜孔灌发生单向交汇入渗的时间(min); t_1 为浑水膜孔灌发生多向交汇入渗的时间(min); a 、 b 、 m 、 n 为拟合参数。

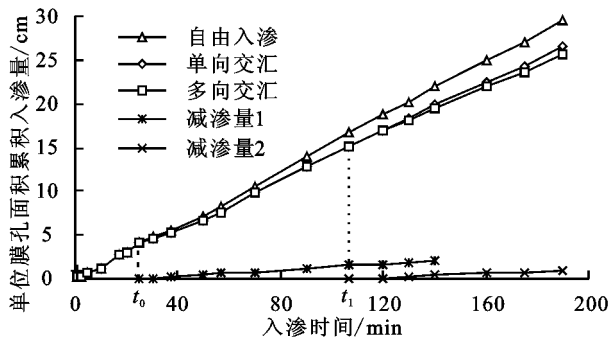


图 4 浑水膜孔灌入渗曲线

对图 4 中减渗量曲线进行拟合,得出交汇入渗的减渗量与入渗时间关系式为:

$$\Delta I_1 = 0.1708(t-25)^{0.5331} \quad t \geq 25 \quad R^2 = 0.9987 \quad (8)$$

1.601%,拟合效果良好。因此,一元二次函数可较好地反映浑水膜孔灌自由入渗的减渗率与入渗时间之间的量化关系。由所得减渗率 $\eta_{\text{清-浑}}$ 与入渗时间 t 之间的量化关系式可知,浑水膜孔灌自由入渗的减渗率最大值发生在第 43 min,最大减渗率为 31%。

$$\Delta I_2 = 0.1846(t-107)^{0.5289} \quad t \geq 107 \quad R^2 = 0.9834 \quad (9)$$

公式(8)、公式(9)决定系数 R^2 均大于 0.98 ($P < 0.01$),均方根误差分别为 0.176, 0.119 cm,拟合效果良好,说明浑水膜孔灌交汇入渗的减渗量与入渗时间之间具有良好的幂函数关系。

浑水膜孔灌多向交汇入渗可看作成经过了两次减渗过程的浑水膜孔灌自由入渗。因此在研究多向交汇减渗率 $\eta_{\text{自-交}}$ 时可分为两个过程分析,浑水膜孔灌自由入渗经过一个减渗作用变成浑水膜孔灌单向交汇入渗,用减渗率 η_1 来表述,浑水膜孔灌单向交汇入渗经过一个减渗作用变成浑水膜孔灌多向交汇入渗,用减渗率 η_2 来表述。则 η_1 、 η_2 定义为:

$$\eta_1 = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \quad t_0 \leq t < t_1 \quad (10)$$

$$\eta_2 = \frac{I_2 - I_3}{I_2} \quad t \geq t_1 \quad (11)$$

式中: I_2 为浑水膜孔灌单向交汇入渗量(cm)。

浑水膜孔灌多向交汇入渗的整个过程中相对于浑水膜孔灌自由入渗的减渗率 $\eta_{\text{自-交}}$ 可以用 η_1 和 η_2 来表示:在 $t_1 \leq t < t_2$ 时,浑水膜孔入渗过程处于单向交汇阶段,则 $\eta_{\text{自-交}}$ 等于 η_1 ;在 $t \geq t_2$ 时,浑水膜孔入渗过程处于多向交汇阶段,则

$$\eta_{\text{自-交}} = \frac{I_1 - I_3}{I_1} = 1 - \frac{I_3}{I_1} = 1 - \frac{I_3}{I_2}, \quad (12)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = 1 - (1 - \eta_2)(1 - \eta_1)$$

即浑水膜孔灌多向交汇入渗的整个过程中相对于浑水膜孔灌自由入渗的减渗率可用下式表示:

$$\eta_{\text{自-交}} = \begin{cases} \eta_1 & t_0 \leq t < t_1 \\ \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \eta_2 & t \geq t_1 \end{cases} \quad (13)$$

根据图 4 中的试验资料计算得减渗率 η_1 、减渗率 η_2 、减渗率 $\eta_{\text{自-交}}$ 。由表 2 可知,减渗率 η_1 、减渗率 η_2 及减渗率 $\eta_{\text{自-交}}$ 均随着入渗时间的延长而增大,但减渗率 η_1 和减渗率 η_2 增大趋势逐渐变缓,说明两者的变化率随着时间的增长而逐渐减小;在入渗时间 $t > 107$ min 时, $\eta_{\text{自-交}} > \eta_1$,再一次证实了浑水膜孔灌多向交汇入渗比单向交汇入渗的减渗效果更加明显。经分析,减渗率 η_1 和 η_2 与入渗时间 t 之

间均符号幂函数规律,对 η_1 和 η_2 进行拟合得

$$\eta_1 = 1.3855(t-25)^{0.4111} \quad t \geq 25 \text{ min} \quad R^2 = 0.9454 \quad (14)$$
$$\eta_2 = 0.0708(t-107)^{0.8882} \quad t \geq 107 \text{ min} \quad R^2 = 0.9618 \quad (15)$$

$$\eta_{\text{自-交}} = \begin{cases} 1.3855(t-25)^{0.4111} & 25 \leq t < 107 \text{ min} \\ 1.3855(t-25)^{0.4111} + 0.0708(t-107)^{0.8882} - 0.0981(t-25)^{0.4111}(t-107)^{0.8882} & t \geq 107 \text{ min} \end{cases} \quad (16)$$

将公式(5)和公式(16)代入公式(3)即可利用清水膜孔灌自由入渗量 I_0 求出发生交汇后浑水膜孔灌多向交汇入渗量 I_3 的模型。根据此模型只需通过已有清水膜孔灌自由入渗量研究资料,便可计算出浑水膜孔灌多向交汇入渗任意时刻的入渗量,从而为浑水膜孔灌多向交汇入渗制定合理灌溉制度提供依据,控制灌水量,达到节水、快速、高效灌溉的目的。

表 2 浑水膜孔灌交汇入渗的减渗率与入渗时间的关系

t/min	$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$	$\eta_{\text{自-交}}/\%$
25	0		0
50	5.89		5.89
70	7.31		7.31
90	8.19		8.19
107	8.48	0	8.48
120	9.10	0.62	9.66
140	9.55	1.92	11.28
160	9.92	2.57	12.24
175	10.17	2.91	12.78
190	10.39	3.18	13.24

3 结 论

(1)浑水膜孔灌自由入渗较相同条件下的清水膜孔灌自由入渗单位膜孔面积的减渗量随着入渗时间的延长而增大,但增大幅度逐渐变小,入渗后期其减渗量基本上呈线性增加,即入渗后期减渗率基本维持在稳定值;其相对于清水的减渗率随时间的增大先快速增大后缓慢减小,最大值发生在 43 min,入渗后期减渗率趋于稳定。

(2)当入渗产生交汇后,其入渗能力明显减小,交汇入渗的减渗量也随着入渗时间的增大而增大;浑水膜孔灌多向交汇入渗和浑水膜孔灌单向交汇入渗相对浑水膜孔灌自由入渗的减渗率均随着入渗时间的增长而增大,浑水膜孔灌多向交汇入渗相对浑水膜孔灌单向交汇入渗也有减渗作用,3 条减渗率曲线的变化率均随着时间的增长而逐渐减小。

(3)本文中所涉及的浑水为固定含沙量、泥沙级配,对于其他不同泥沙特性的浑水,运用本文所得成果时应对其加以修正应用。为进一步分析浑水膜孔灌交汇入渗的减渗特性,在下一步的工作中使用 Hydrus 模拟软件对其进行模拟,将试验值与模拟值进行相互验证。

上式决定系数 R^2 均大于 0.94($P < 0.05$),均方根误差分别为 1.182%,0.917%,拟合效果良好,说明浑水膜孔灌交汇入渗的减渗量与入渗时间之间具有良好的幂函数关系。

将公式(14)、公式(15)代入公式(13)计算得:

参考文献:

[1] 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.

[2] 脱云飞,王克勤,张丽娟,等.肥液浓度对膜孔交汇入渗水氮运移转化影响[J].排灌机械工程学报,2014,32(6):541-546.

[3] 程东娟,刘颖,高然,等.施肥量对膜孔灌土壤氮素动态变化影响[J].灌溉排水学报,2012,31(2):38-42.

[4] 范严伟,赵彤,赵文举,等.膜孔灌灌溉入渗量的简化计算方法及验证[J].农业工程学报,2016,32(13):67-74.

[5] 董玉云,王宝成,贾丽华,等.膜孔灌夏玉米耗水特性和水分生产效率试验研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):7-11.

[6] 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):105-112.

[7] Herman B, Jamie L, Robert C R. Sealing Pond bottoms with muddy water [J]. Ecological Engineering, 2001, 18(2): 233-238.

[8] 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):135-138.

[9] 曹惠提,卞艳丽,张会敏,等.浑水灌溉下土壤水分变化研究[J].节水灌溉,2013,1(8):1-6,9.

[10] 费良军,王文焰.浑水间歇入渗模型研究[J].水利学报,1999,3(2):39-42.

[11] 汪志荣,王文焰,王全九,等.浑水波涌灌溉入渗机制及其 Green-Ampt 模型[J].水利学报,1998,1(10):45-49.

[12] Muhammad S, Sajid M. Application of film hole irrigation on borders for water saving and sunflower production [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2013, 38(6): 1347-1358.

[13] Li Y B, Fan Y W, Liu Y, et al. Influencing factors and simplified model of film hole irrigation [J]. Water, 2017, 9(7): 543.

[14] 孙存喜.浑水入渗特性的试验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2009.

[15] 胡建桥,王锦辉,张建香.浑水膜孔灌自由入渗特性试验研究[J].排灌机械工程学报,2017,35(1): 84-90.

[16] 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.

[17] 王锦辉,费良军.不同膜孔直径的浑水膜孔灌单向交汇入渗特性[J].水土保持学报,2016,30(1):184-188,195.