膜孔肥液单向交汇入渗特性及数学模型研究

董玉云[1],费良军[2],穆红文[3]

(1.兰州交通大学土木工程学院,甘肃 兰州 730070;2.西安理工大学水资源研究所,陕西 西安 710048;
3.甘肃省电力设计院,甘肃 兰州 730050)

摘 要:通过室内入渗试验,分析了膜孔肥液单向交汇的入渗特性。在此基础上,根据已知试验资料,提出了 Kostiakov 模型、分段函数模型、减渗量模型和增渗率模型等 4 个膜孔肥液单向交汇入渗模型。Kostiakov 模型建立的条件是膜孔肥液单向交汇入渗参数均为已知;分段函数模型建立的条件是膜孔肥液自由入渗和单向交汇入渗参数均为已知;减渗量模型建立的条件是膜孔肥液单向交汇入渗相对于膜孔肥液自由入渗的减渗量参数和膜孔肥液自由入渗参数已知;增渗率模型建立的条件是膜孔肥液单向交汇入渗相对膜孔清水单向交汇入渗增渗率和清水单向交汇入渗参数已知。模型验证表明,所提出的 4 个模型均为描述膜孔肥液单向交汇入渗的有效模型,其中分段函数模型的计算精度相对最高,Kostiakov 模型、减渗量模型和增渗率模型稍次之。在实际应用中,可根据不同的已知资料情况加以选用。

关键词:膜孔灌;肥液入渗;单向交汇;入渗特性;数学模型

中图分类号:S152.7+2 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-7601(2012)03-0081-04

膜孔灌溉是覆膜灌溉中先进的灌水技术之一,该技术是将地膜平铺于畦中,利用地膜输水,通过作物的放苗孔和专用灌水孔入渗来进行灌溉,具有节水、保肥、灌水质量高和灌溉水利用率高的优点。膜孔灌条件下的土壤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。根据农业地膜栽培和种植规格,膜孔入渗可以分为三种类型:第一种为作物的行距和株距都很大的膜孔自由入渗;第二种为作物的行距相对株距很大时,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;第三种为作物的行距和株距均较小,则在入渗过程中,膜孔将受到周围膜孔入渗的干扰作用,称为膜孔多向交汇入渗。近年来,国内对清水膜孔入渗土壤水分运移特性的研究已有一定进展[1-9];直至目前尚未见到国外有关膜孔灌的研究报道。关于施肥条件下膜孔灌养分运移方面的研究,目前多为膜孔肥液自由入渗的研究报道[10-13],膜孔肥液交汇入渗方面的研究还较少见[14]。因此,开展膜孔肥液交汇入渗特性及数学模型研究具有重要的理论价值和生产实际意义。

1 材料与方法

膜孔肥液单向交汇入渗室内试验装置如图 1 所示。试验装置由土箱、膜孔仪和马氏瓶三部分组成。试验土箱采用 10 mm 厚的有机玻璃板制作,长 × 宽 × 高为 40 cm × 12 cm × 30 cm。为便于观测点源入渗湿润锋形状及其变化过程,两个膜孔点源均采用 1/4 膜孔面积的方形水室分别置于土箱的一角,膜孔直径为 4 cm,膜孔间距为 12 cm。由于两个膜孔的直径相同,且同时供水入渗,所以湿润锋及湿润土体的含水率分布均关于图 1 中 abcd 面对称,abcd 面为膜孔交汇界面,即零通量面。试验利用马氏瓶进行自动供水,马氏瓶横截面积为 30.5 cm^2。试验过程中为防止土壤水分蒸发,在土箱的上表面覆膜。

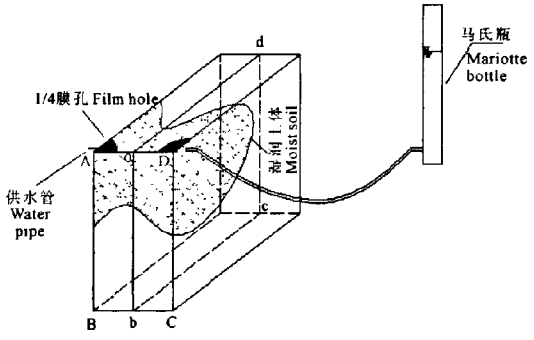

图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

供试土壤为西安粉土,其土壤颗粒级配组成见表 1。土壤容重为 1.30 g/cm^3,饱和重量含水率为 36.2%,初始硝态氮含量为 6.5 mg/kg,试验分浓度

收稿日期:2012-02-13
基金项目:兰州交通大学"青蓝"人才工程基金资助计划资助;国家自然科学基金项目(50579064);陕西高校省级重点实验室重点科研项目(03JS041)
作者简介:董玉云(1975—),女,河北任丘人,博士,副教授,主要从事节水灌溉、农业水资源利用与水环境研究。E-mail:dongyuyun2003@163.com。

万方数据

为 600 mg/L 的肥液自由入渗、肥液单向交汇入渗和清水单向交汇入渗 3 个处理，肥液采用 NH_4NO_3 作为肥料。土料经风干、碾细、过筛(筛孔径为 2 mm)，按预定初始重量含水率为 9.1% 配土，每 5 cm 厚分层填装。试验过程中，按照先密后疏的时间间隔通过马氏瓶读取累积入渗量，并观测湿润锋运移曲线。试验连续灌水时间为 90 min。

表 1 供试土样的颗粒级配组成

Table 1 Grain composition of experimental soil

粒径 Diameter(mm)	<1.0	<0.5	<0.25	<0.1	<0.05	<0.025	<0.01	<0.005	<0.002	<0.001
含量 Content(%)	99.60	99.20	98.87	98.60	89.15	56.58	28.02	11.34	2.82	0.90

2 膜孔肥液单向交汇入渗特性

图 2 为膜孔肥液自由入渗、肥液与清水单向交汇入渗的累积入渗量曲线，图中 t_0 为肥液单向交汇入渗的交汇时间，试验条件下为 20 min，图 3 为相应于图 2 的入渗率曲线。从图 2 可以看出，肥液自由入渗、肥液单向交汇与清水单向交汇的累积入渗量变化趋势一致。随着入渗时间的延长，累积入渗量逐渐增大，由于交汇后的减渗作用，肥液单向交汇的累积入渗量比同条件下的肥液自由入渗量减小，而由于肥液入渗的增渗作用，膜孔肥液单向交汇的累积入渗量比清水单向交汇的大。在入渗初期，肥液自由入渗、清水与肥液的入渗量增加都很快，相应的入渗率降低很快，随着入渗时间的延长，入渗量不断增大，入渗率不断减小，但入渗量增加的趋势和入渗率减小的趋势逐渐减弱。

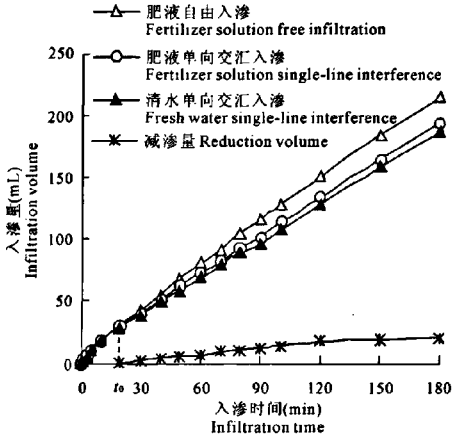

图 2 土壤累积入渗量

Fig.2 Soil cumulative infiltration curve

3 膜孔肥液单向交汇入渗数学模型

膜孔肥液单向交汇入渗过程包括自由入渗和单向交汇入渗两个阶段，本文根据膜孔肥液单向交汇入渗特性和已知实测资料，提出 4 个数学模型。

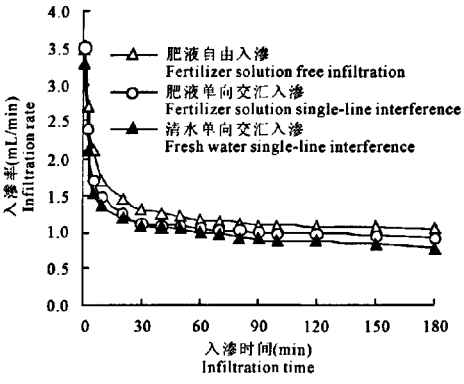

图 3 膜孔入渗率曲线

Fig.3 Infiltration rate curve of film hole

3.1 Kostiakov 模型

膜孔清水单向交汇入渗过程符合 Kostiakov 入渗模型，通过试验分析，膜孔肥液单向交汇入渗过程也可以用 Kostiakov 模型描述。

设 $$Z = kt^a \quad (1)$$

式中，Z 为膜孔肥液单向交汇累积入渗量；k、a 为膜孔入渗拟合参数；t 为入渗时间。

用式(1) 对图 2 的实测资料拟合得：

$$Z = 3.0799t^{0.7806} \quad R^2 = 0.9972 \quad (2)$$

3.2 分段函数模型

经分析，膜孔肥液单向交汇入渗过程中两个阶段的入渗量曲线均符合幂函数规律，则膜孔肥液单向交汇入渗量可以分段拟合为：

$$Z = \begin{cases} kt^a & t < t_0 \\ ct^d & t \geqslant t_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中，t_0 为膜孔发生单向交汇的时间；k、a、c、d 为拟合参数。

用式(3) 对图 2 的实测资料拟合得：

$$Z = \begin{cases} 3.2897t^{0.7426} & t < 20\text{min} \quad R^2 = 0.9917 \\ 2.3121t^{0.8471} & t \geqslant 20\text{min} \quad R^2 = 0.9983 \end{cases} \quad (4)$$

3.3 减渗量模型

由图 2 可知，膜孔肥液单向交汇入渗阶段较同时段的自由入渗具有减渗作用，因而可以建立膜孔

万方数据

肥液单向交汇入渗相对于膜孔肥液自由入渗的减渗量参数 a_0、b_0 和膜孔肥液自由入渗参数 k、α 已知条件下的入渗模型。

由于膜孔肥液自由入渗满足 Kostiakov 入渗模型:

$$Z_0 = kt^{\alpha} \tag{5}$$

式中,Z_0 为膜孔肥液自由交汇累积入渗量;k、α 为膜孔入渗拟合参数;t 为入渗时间。则膜孔肥液单向交汇入渗量可以分段拟合为:

$$Z = \begin{cases} Z_0 = kt^{\alpha} & t < t_0 \\ Z_0 - \Delta Z = kt^{\alpha} - a_0(t - t_0)^{b_0} & t \geqslant t_0 \end{cases} \tag{6}$$

式中,t_0 为膜孔发生单向交汇的时间;a_0、b_0 为拟合参数。

用式(6)对图 2 的实测资料拟合得:

$$Z = \begin{cases} 2.9678t^{0.8111} \\ \quad t < 20\text{min}, \quad R^2 = 0.9935 \\ 2.9678t^{0.8111} - 0.3733(t - 20)^{0.8081} \\ \quad t \geqslant 20\text{min}, \quad R^2 = 0.9893 \end{cases} \tag{7}$$

3.4　增渗率模型

由于膜孔肥液单向交汇入渗比清水单向交汇入渗的累积入渗量大,因而可以建立膜孔肥液单向交汇入渗相对于清水单向交汇入渗的增渗率 η 和入渗参数 k_0、α_0 已知条件下的入渗模型。

定义增渗率 η 为膜孔肥液单向交汇入渗量 Z 相对于相同入渗历时的膜孔清水单向交汇入渗量 Z_0 增加的百分数。即

$$\eta = \frac{Z - Z_0}{Z_0} \times 100\% \tag{8}$$

在已知膜孔肥液单向交汇入渗相对于同条件的膜孔清水单向交汇入渗的增渗率 η 和清水单向交汇入渗参数 k_0、α_0 的条件下,膜孔肥液单向交汇入渗量 Z 为:

$$Z = (1 + \eta)Z_0 = (1 + \eta)k_0t^{\alpha_0} \tag{9}$$

式中,k_0、α_0 为膜孔清水单向交汇入渗参数。

表 2 为相应于图 2 的膜孔肥液交汇入渗时间与增渗率的关系表。

经分析,增渗率 η 与膜孔入渗时间之间符合幂函数规律,设

$$\eta = a't^{b'} \tag{10}$$

式中,a'、b' 为拟合参数。

对表 2 资料拟合得:

$$\eta = 0.005t^{0.4789} \qquad R^2 = 0.9883$$

则式(9)可以表示为:

$$Z = (1 + \eta)Z_0 = (1 + \eta)k_0t^{\alpha_0} = (1 + a't^{b'})k_0t^{\alpha_0} \tag{11}$$

由于清水入渗:

$$Z_0 = 2.9701t^{0.7777} \qquad R^2 = 0.9965$$

因此,对图 2 资料拟合得:

$$Z = (1 + 0.005t^{0.4789})2.9701t^{0.7777} \tag{12}$$

表 2　膜孔肥液入渗时间与增渗率的关系

Table 2　Correlation of film hole infiltration time and increased infiltration ratio

t(min)	0	20	40	60	80	100	120	150	180
η(%)	0	2.03	2.87	3.62	4.29	4.69	5.02	5.37	5.65

4　模型验证与评价

4.1　模型验证

用图 2 试验资料对本文所提出的 4 个膜孔肥液单向交汇入渗数学模型进行验证。结果见表 3,表中的误差为计算值相对实测值的误差。

表 3　模型的计算值与实测值对照表

Table 3　Comparison of calculated and measured values by the models

特征值 Eigenvalue	实测值 Measured value	模型 1 Model 1	模型 2 Model 2	模型 3 Model 3	模型 4 Model 4
均值(ml) Mean value	94.11	90.95	93.19	91.02	90.77
最大误差(%) Max. deviation		8.85	3.81	9.63	8.22
平均误差(%) Mean deivation		-1.16	-0.74	-0.47	-2.17

由表 3 可以看出:模型 1 的实测值与计算值比较,计算值总体上较实测值偏小,其最大误差为 8.85%,平均误差为 -1.16%,从总的计算结果来看,模型 1 计算精度较高。模型 2 的实测值与计算值比较,计算值总体上较实测值偏大,其最大误差为 3.81%,平均误差为 -0.74%,从计算结果来看,模型 2 计算精度最高。模型 3 的实测值与计算值比较,计算值总体上较实测值偏小,其最大误差为 9.63%,平均误差为 -0.47%,从计算结果来看,模型 3 计算精度较高。从计算过程看,该模型计算简便,模型计算所需基本资料和模型包含的基本参数较少。模型 4 的实测值与计算值比较,计算值总体上较实测值偏小,其最大误差为 8.22%,平均误差为 -2.17%,从计算结果来看,模型 4 计算精度较高。

4.2　模型评价

通过对模型验证可以看出:4 个模型的均值与实测值接近,模拟精度均较高。模型 1 是建立在具有部分试验资料基础上的膜孔肥液单向交汇入渗模

万方数据

型,即基于膜孔肥液单向交汇入渗参数 k、α 已知的入渗模型,该模型计算需要的基本资料较少。模型2是建立在具有充分试验资料基础上的膜孔肥液单向交汇入渗参数 k、α、c 和 d 已知条件下的一个入渗模型,该模型建立在较多的试验资料基础上。模型3是建立在膜孔肥液单向交汇入渗相对膜孔肥液自由入渗的减渗量参数 a_0、b_0 和膜孔肥液自由入渗参数 k、α 已知条件下的一个入渗模型,而这些资料的获得试验工作量较大。模型4是建立在膜孔肥液单向交汇入渗相对膜孔清水单向交汇入渗增渗率 η 和清水入渗参数 k_0、α_0 已知条件下的一个入渗模型,这些资料的获得试验工作量较大,且模型中参数较多,计算误差主要来源于模型中各参数和模型本身的计算误差。

5 结 论

1) 膜孔肥液单向交汇入渗分为自由入渗和交汇入渗两个阶段,膜孔肥液单向交汇入渗较膜孔清水单向交汇入渗能力增强,较膜孔肥液自由入渗能力减小。

2) 本文在不同已知资料基础上,提出了4个膜孔肥液单向交汇入渗量计算模型,经实测资料验证,这4个模型均为描述膜孔肥液单向交汇入渗的有效模型,这一成果为膜孔灌理论与技术的进一步研究奠定了基础。

参 考 文 献:

[1] 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,(9):307-311.

[2] 缴锡云.膜孔灌溉理论及实用技术初步研究[D].西安:西安理工大学水利水电学院,1999.

[3] 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,2007,35(5):212-216.

[4] 范严伟,马孝义,王波雷,等.膜孔灌土壤湿润体水分分布与入渗特性数值模拟[J].农业机械学报,2008,39(11):35-41.

[5] 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.

[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,(5):62-68.

[7] 李发文,费良军.膜孔多向交汇入渗特性及其影响因素研究[J].水土保持学报,2003,17(4):105-109.

[8] 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.

[9] 程东娟,费良军,尹 娟.膜孔灌单向交汇入渗减渗量和交汇界面面积试验研究[J].农业工程学报,2007,23(6):105-108.

[10] 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:西安理工大学水利水电学院,2006.

[11] 董玉云,费良军,穆红文.肥液浓度对单膜孔入渗 NO_3^--N 运移特性影响的室内试验研究[J].农业工程学报,2006,22(5):204-206.

[12] 费良军,董玉云,朱兴华.膜孔单点源肥液入渗湿润体特性试验研究[J].农业工程学报,2006,22(12):78-81.

[13] 董玉云,费良军,任建民.土壤质地对单膜孔肥液入渗水分及氮素运移的影响[J].农业工程学报,2009,25(4):30-34.

[14] 雷雁斌,董玉云,费良军.膜孔灌单向交汇肥液入渗湿润体特性试验研究[J].灌溉排水学报,2007,26(1):33-36.

Mathematical models for single-line interference infiltration of fertilizer solution in film hole

DONG Yu-yun[1], FEI Liang-jun[2], MU Hong-wen[3]

(1. *Collge of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou* 730070, *China*; 2. *Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048, *China*; 3. *Gansu Design Institute of Electric Power, Lanzhou* 730050, *China*)

Abstract: Based on lab. experiment, characteristics of single-line interference irrigation of fertilizer solution in film hole were analyzed. Four mathematical models were presented based on different measured data, such as Kostiakov model, piecewise function model, reduction volume model and increasing infiltration ratio model for film hole fertilizer solution single-line interference irrigation. Kostiakov model is based on the infiltration parameters of film hole single-line interference infiltration which are known; Piecewise function model is based on the infiltration parameters of two stages of film hole single-line infiltration-film hole free infiltration and interference infiltration which are known; Reduction volume model is based on the rate of reduced infiltration that film hole single-line infiltration compared with film hole free infiltration and the parameters of free infiltration which are known; Increasing infiltration ratio model is based on the rate of increased infiltration that film hole fertilizer solution single-line interference infiltration as compared with film hole single-line interference infiltration and the parameters of fresh water infiltration which are known. The four infiltration models are effective models for film hole fertilizer solution single-line interference irrigation through the measured data. The calculation precision of piecewise function model is the most accurate. The calculation precision of three others' is relatively less accurate. The models may be selected in the light of measured data.

Keywords: film hole irrigation; fertilizer solution; single-line infiltration; infiltration characteristic; mathematical model

万方数据