膜孔肥液多向交汇入渗特性及数学模型研究

董玉云1,郭小雷1,费良军2

(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)

摘 要:通过室内入渗试验,分析了膜孔肥液多向交汇入渗特性,在此基础上,提出了4个膜孔肥液多向交汇 入渗模型。减渗量模型建立在膜孔肥液自由入渗参数和减渗量参数已知的条件下,分段函数模型建立在膜孔肥液 多向交汇入渗各阶段入渗模型均为幂函数的条件下,增渗率模型建立在膜孔肥液多向交汇入渗相对膜孔清水多向 交汇入渗增渗率和清水入渗参数已知的条件下,减渗率模型建立在膜孔肥液单向交汇入渗相对膜孔肥液自由入渗 的减渗率、膜孔肥液多向交汇入渗相对膜孔肥液单向交汇入渗的减渗率和膜孔肥液自由入渗参数已知的条件下。 经实测资料验证,所提出的4个模型计算精度均较高。

关键词: 膜孔灌; 肥液入渗; 多向交汇; 入渗特性; 数学模型 中图分类号: S152.72 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)06-0073-05

Study on the infiltration characteristics and mathematical models of fertilizer solution bilaterally flowing into the film hole

DONG Yu-yun¹, GUO Xiao-lei¹, FEI Liang-jun²

(1. Collge of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Institute of Water Resources, Xi' an University of Technology, Xi' an 7100482, China)

Abstract: Based on the lab experiment, has analyzed the infiltration characteristics and put forward the four mathematical models for the fertilizer solution bilaterally flowing into the film hole. The reducing infiltration model was set up under the conditions that the free infiltration parameters and the reducing infiltration parameters of fertilizer solution flowing into film hole has been known. The piecewise function model was set up under the conditions that the infiltration model in each stage was total for the power function. The increasing infiltration ratio model was set up under the conditions of increasing infiltration rate that compared the fertilizer solution with the fresh water bilaterally flowing into film hole and the parameters of fresh water bilaterally flowing into film hole has been known. The reduction infiltration ratio model was set up under the condition of reducing infiltration rate compared the fertilizer solution single-line infiltrated into film hole with the fertilizer solution free infiltrated into film hole and the parameters of free infiltration has been known. These four models can be supplied rather accurate canculation results through the measured data.

Keywords: film hole irrigation; infiltration of fertilizer solution; bilateral intersection; infiltration characteristic; mathematical model

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,适合于 干旱缺水的北方地区。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:膜孔自由入渗、膜 孔单向交汇入渗和膜孔多向交汇入渗。近年来,国 内对膜孔入渗土壤水分运移特性的研究已有一定进 展^[1-6];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和单向交汇入渗的研究报道^[7-15],膜孔肥液多向交汇入渗方面的研究还较少见^[16]。因此,开展膜孔肥液多向交汇入渗研究具有重要的理论价值和生产实际意义。

1 材料与方法

膜孔肥液多向交汇入渗室内试验装置如图1所

收稿日期:2013-06-08

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。

示。试验装置由土箱、膜孔仪和马氏瓶三部分组成。 膜孔点源采用 1/4 膜孔面积的方形水室置于土箱的 一角,膜孔直径均为 4.0 cm。试验模拟密植棉花的 入渗过程, AD 和 ad 分别为作物株距的一半, Aa 和 Dd 分别为作物行距的一半, 其中 AD = ad = 6 cm, Aa = Dd = 8 cm, DCcd 面和 abcd 面为膜孔交汇面,即零 通量面,图中阴影部分为湿润土体。试验利用透明 有机玻璃制成的马氏瓶进行自动供水,马氏瓶横截 面积为 30.5 cm²。试验过程中为防止土壤水分蒸 发,在土箱的上表面覆膜。

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,田间持水率为 23.5%,初始硝态氮含量为 6.5 mg·kg⁻¹,试验采用 600 mg·L⁻¹的 NH₄NO₃ 作为肥料。土料经风干、碾 细、过筛(筛孔径为 2 mm),按灌水的土壤下限含水 率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 180 min。



Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

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 膜孔肥液多向交汇入渗特性

图 2 表示粉土在膜孔直径为 4.0 cm、土壤容重为 1.30 g·cm⁻³、肥液浓度为 600 mg·L⁻¹、土壤初始 重量含水率为 9.11%条件下的自由入渗、膜孔间距 为 12 cm 的单向交汇入渗和株距为 12 cm、行距为 16 cm 的膜孔肥液及清水多向交汇累积入渗量曲线,此 条件下的累积入渗量分别为 215.45、194.65、182.85 mL 和 150.25 mL,折算为单位膜孔面积的入渗量分 别为:68.61、61.99、58.23 mL 和 47.85 mL。图 2 中减 渗量 1 表示膜孔肥液单向交汇入渗相对于自由入渗 的减渗量,减渗量 2 表示膜孔肥液多向交汇入渗相对 于单向交汇入渗的减渗量。t₀为膜孔肥液入渗发生 单向交汇的时间,t₁为发生多向交汇的时间。

从图 2 可以看出,各种膜孔入渗条件下的累积 入渗量均随着入渗时间的延长而增加,并且膜孔肥 液单向交汇入渗比肥液自由入渗的入渗能力小,膜 孔肥液交汇入渗的减渗量随着膜孔交汇时间的延长 而增加;膜孔肥液多向交汇入渗比肥液单向交汇入 渗的入渗能力小,其减渗量也随着膜孔交汇时间的 延长而增加;膜孔肥液多向交汇入渗比清水多向交 汇入渗的入渗能力大,其增渗量也随着膜孔交汇时间的 延长而增加。图 1 中肥液多向交汇入渗条件下 膜孔间距为 12 cm 的 ABCD 界面处水平湿润锋发生 交汇的时间 $t_0 = 20$ min;间距为 16 cm 的 ABba 界面 处水平湿润锋发生交汇的时间 $t_1 = 62$ min。



图 2 土壤累积入渗量



图 3 为相应于图 2 的人渗率曲线。由图 3 可以 看出,在膜孔交汇入渗初期属于自由入渗,相应的入 渗率迅速减小,随着入渗时间的延长,相继发生单向 和多向交汇,交汇后的入渗速度随着入渗时间的延 长逐渐减小,因而交汇入渗的入渗率比自由入渗的 小,总的变化过程是入渗量增加的趋势和入渗率减 小的趋势逐渐减弱。 设





图 3 膜孔入渗率曲线

Fig.3 Infiltration rate curve of film hole

经分析, 膜孔肥液交汇入渗的减渗量与入渗时 间 t 之间符合幂函数关系。

$$\Delta Z_1 = A(t - t_0)^B \quad t \ge t_0 \tag{1}$$

$$\Delta Z_2 = C(t - t_1)^D \quad t \ge t_1 \tag{2}$$

式中, ΔZ_1 为膜孔肥液单向交汇入渗较自由入渗的 减渗量(mL); ΔZ_2 为膜孔肥液多向交汇入渗较单向 交汇入渗的减渗量(mL);t为入渗时间(min); t_0 为 膜孔肥液多向交汇入渗发生单向交汇的时间(min); t_1 为膜孔肥液多向交汇入渗发生多向交汇的时间 (min); $A \setminus B \setminus C \setminus D$ 为拟合参数。

3 膜孔肥液多向交汇入渗数学模型

根据对膜孔肥液多向交汇入渗特性的分析,膜 孔肥液多向交汇入渗累积入渗量与入渗时间之间符 合以下数学模型。

3.1 模型 1- 减渗量模型

设

该模型建立在膜孔肥液自由人渗参数 k_{α} 和 式(1)、式(2) 减渗量入渗参数 $A_{\lambda}B_{\lambda}C_{\lambda}D$ 已知的条 件下。由于膜孔肥液自由入渗过程符合 Kosjiakov 幂 函数模型^[10],

$$Z_0 = Kt^{\alpha} \tag{3}$$

式中,Z₀为膜孔肥液自由入渗累积入渗量;K、α为 拟合参数;t为入渗时间。则膜孔肥液多向交汇入渗 各阶段入渗量可表示为:

$$Z = \begin{cases} Z_0 & t < t_0 \\ Z_0 - \Delta Z_1 & t_0 \le t < t_1 \\ Z_0 - \Delta Z_1 - \Delta Z_2 & t > t_1 \end{cases}$$
(4)

式中,Z为膜孔肥液多向交汇入渗累积入渗量

 $(mL);\Delta Z_1$ 为膜孔肥液单向交汇入渗较自由入渗的 减渗量 $(mL);\Delta Z_2$ 为膜孔肥液多向交汇入渗较单向 交汇入渗的减渗量(mL);其它符号意义同前。

3.2 模型 2-分段函数模型

根据对膜孔肥液多向交汇入渗特性的分析,其 各阶段入渗量曲线均符合幂函数规律,则

$$Z = \begin{cases} a_0 t^{b_0} & t < t_0 \\ a_1 t^{b_1} & t_0 \le t < t_1 \\ a_2 t^{b_2} & t \ge t_1 \end{cases}$$
(5)

式中, a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_0 、 b_1 、 b_2 为拟合参数;其它符号意义同前。

3.3 模型 3- 增渗率模型

设

由图 2 可知,膜孔肥液多向交汇入渗比清水多向 交汇入渗的累积入渗量大,因而可以建立膜孔肥液多 向交汇入渗相对于清水入渗的增渗率 η 和膜孔清水 多向交汇入渗参数 k'、α' 已知条件下的入渗模型。

定义增渗率 η 为膜孔肥液多向交汇入渗量 Z 相 对于相同入渗历时的膜孔清水多向交汇入渗量 Z' 增加的百分数。

$$\eta = \frac{Z - Z'}{Z'} \times 100\% \tag{6}$$

在已知膜孔肥液多向交汇入渗相对于同条件的 膜孔清水多向交汇入渗的增渗率 η和清水多向交汇 入渗参数 k'、α'时,膜孔肥液多向交汇入渗量 Z为:

$$Z = (1 + \eta)Z' = (1 + \eta)k't^{\alpha'}$$
(7)

式中, k'、α'为膜孔清水多向交汇入渗参数。

经分析,增渗率 η 与膜孔入渗时间之间具有幂 函数规律,

设
$$\eta = a't^{b'}$$
 (8)
式中, a',b' 为拟合参数。

把式(8)代入式(7),则可得膜孔肥液多向交汇 入渗量模型:

$$Z = (1 + \eta)Z' = (1 + \eta)k't^{\alpha'} = (1 + \alpha't^{b'})k't^{\alpha'}$$
(9)

3.4 模型 4- 减渗率模型

该模型建立在膜孔肥液单向交汇入渗相对膜孔 肥液自由入渗减渗率 δ₁、膜孔肥液多向交汇入渗相 对膜孔肥液单向交汇入渗减渗率 δ₂ 和膜孔肥液自 由入渗参数 K、α 已知的条件下。

定义减渗率 δ 为膜孔肥液交汇入渗量 Z 相对于 同条件和同历时的膜孔肥液自由入渗量 Z₀ 减小的 百分数,即

$$\delta = \frac{Z_0 - Z}{Z_0} \times 100\%$$
 (10)

由于 $\delta = 1 - (1 - \delta_1)(1 - \delta_2)$ (11) 式中, δ_1 为膜孔肥液单向交汇入渗较自由入渗的减 渗率, δ_2 为膜孔肥液多向交汇入渗较单向交汇入渗 的减渗率。

则膜孔肥液多向交汇入渗量可表示为:

$$Z = (1 - \delta_1)(1 - \delta_2)Z_0 = (1 - \delta_1)(1 - \delta_2)Kt^a$$
 (12)

模型验证与评价 4

4.1 模型验证

见

利用式(1)、(2) 对图 2 中膜孔肥液交汇入渗的

减渗量曲线拟合得:

 $\Delta Z_1 = 0.2078(t - 20)^{0.8389} \quad t \ge 20 \quad R^2 = 0.9810$ $\Delta Z_2 = 0.1629(t - 62)^{0.8559} \quad t \ge 62 \quad R^2 = 0.9954$ 上述拟合的相关系数 R²均大于0.98,说明膜孔 肥液多向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。

利用模型1对图2资料拟合得:

$[2.9678t^{0.8111}]$			t < 20	min $R^2 = 0.9$	963
$Z = \left\{ 2.9678 t^{0.8111} - 0.2 \right\}$	$2078(t-20)^{0.8389}$		$20 \min \leq t < 62 m$	min $R^2 = 0.99$	946
$l_{2.9678t^{0.8111}} - 0.2$	$2078(t-20)^{0.8389}$	$-0.1629(t-62)^{0.855}$	$t \ge 62 \text{ m}$	$nin R^2 = 0.98$	367
利用模型2对图2中的资料	拟合得				
[3.2	$2897 t^{0.7426}$	$t < 20 \min$	$R^2 = 0$. 9917	
$Z = \{2.7\}$	$7587 t^{0.7925}$	$20 \min \leq t < 62 m$	in $R^2 = 0$. 9971	
l _{2.6}	$5178 t^{0.8139}$	$t \ge 62 \min$	$R^2 = 0$. 9990	
图 2 中膜孔肥液交汇入渗明	时间与增渗率的	关系	$Z' = 3.0063 t^{0.7}$	$R^2 = 0$. 9982
表 2。		因」	比,对图2资料月	目模型3拟合得	f :
对表2资料拟合得:		Z = (1	$+ 0.0407 t^{0.3091})$	$\times 3.0063 t^{0.7466}$	$R^2 = 0.9863$
$\eta = 0.0407 t^{0.3091}$	$R^2 = 0.9658$	图	2 中减渗量 1 和	减渗量2在不	司时刻计算得
由于清水多向交汇入渗累积	只入渗量:	到的减	参率值见表3和	表 4。	

到的减渗率值见表3和表4。

表 2 膜孔肥液入渗时间与增渗率 η 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
$\eta/\%$	0	10.86	12.13	14.32	15.34	16.21	17.83	19.04	21.70

表 3 膜孔肥液入渗时间与减渗率 δ_1 的关系

t/min	20	40	60	80	100	120	150	180
$\delta_1 / \%$	0	7.3	8.5	9.5	9.9	10.4	10.6	10.8

表4 脵扎肥	液入漆时间与 减	漆 単 δ₂	的天糸
--------	-----------------	--------	-----

Table 4 Correlation of film hole infiltration time and decreased infiltration ratio

t/min	62	70	80	90	100	120	150	180
$\delta_2/\%$	0	1.4	2.8	3.6	4.4	5.2	5.9	6.8

经分析,减渗率δ与膜孔入渗时间之间符合幂 函数规律。

对表3和表4资料拟合得:

 $\delta_1 = 0.0419(t - 20)^{0.1924}$ $t \ge 20 \text{ min } R^2 = 0.9770$

 $\delta_2 = 0.0050(t - 62)^{0.5667}$ $t \ge 62 \text{ min}$ $R^2 = 0.9646$

将以上两式代入模型4,即可得出膜孔肥液多 向交汇入渗量:

 $Z = [1 - 0.0419(t - 20)^{0.1924}][1 - 0.0050(t - 62)^{0.5667}] \times$ $2.9678t^{0.8111}$ $R^2 = 0.9768$

表5为用本文所提出的4个膜孔肥液多向交汇 入渗数学模型相对于实测值的误差计算结果。

4.2 模型评价

从表5中的计算值与实测值的偏差结果可以看 出,模型2和模型3的精度较高,模型1次之,模型4 相对较差。模型1是建立在膜孔肥液自由入渗参数 K_{α} 和减渗量参数 $A_{\beta}C_{D}$ 已知条件下的入渗模 型,这些资料的获取试验工作量较大,模型计算精度 相对较高。模型2是建立在膜孔肥液多向交汇入渗 参数 $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ 已知条件下的入渗模型, 参数的获取试验工作量较大,但由于该模型建立在 较多的基本资料基础上,所以该模型在4个模型中 计算精度较高。模型3是建立在膜孔肥液多向交汇

77

入渗相对膜孔清水多向交汇入渗增渗率 η 和膜孔清 水多向交汇入渗参数 k'、α'已知条件下的一个入渗 模型,模型中参数较多,误差主要来源于模型中各参 数的计算误差,该模型的精度较高。模型 4 是建立在 膜孔肥液单向交汇入渗相对膜孔肥液自由入渗减渗 率 δ₁、膜孔肥液多向交汇入渗相对膜孔肥液单向交 汇入渗减渗率 δ₂ 和膜孔肥液自由入渗参数 K、α 已 知条件下的入渗模型,模型的误差主要来自模型中 各经验参数和模型本身的计算误差,在4个模型中 计算精度较差。

入渗时间 Infiltration time/min	实测值 Measured values/mL	模型 1 计算值 Calculated value/mL	偏差/% Error	模型 2 计算值 Calculated value/mL	偏差/% Error	模型 3 计算值 Calculated value/mL	偏差/% Error	模型 4 计算值 Calculated value/mL	偏差/% Error		
5	11.30	10.95	3.09	10.87	3.80	10.67	5.58	10.95	3.10		
20	30.75	31.92	3.80	30.43	1.04	31.03	0.91	31.92	3.80		
40	51.64	56.58	6.20	51.32	0.61	53.22	3.07	54.72	5.97		
60	73.85	77.58	5.05	70.78	4.16	73.11	1.00	75.17	1.79		
80	90.63	95.38	5.25	95.65	5.54	91.84	1.34	91.78	1.27		
120	127.08	128.94	1.47	128.88	1.42	126.44	0.50	123.00	3.21		
150	155.53	152.92	1.67	154.55	0.63	151.62	2.91	144.54	7.07		
180	182.85	175.95	3.77	179.27	1.96	174.62	4.50	165.81	9.32		

表 5 模型的计算值与实测值对照表

Table 5 Comparison of calculated and measured values by infiltration model

5 结论与讨论

1) 膜孔肥液多向交汇入渗分为自由入渗、单向 交汇入渗和多向交汇入渗三个阶段; 膜孔肥液多向 交汇入渗由于交汇后的减渗作用,较膜孔肥液多向 交汇入渗由于交汇后的减渗作用,较膜孔肥液多向交汇 入渗由于肥液入渗的增渗作用^[10],表层土壤胶体表 面吸附的肥料分子多,吸附的阳离子与代换性阳离 子的量大,同时土壤胶粒产生的凝聚作用增强,形成 的团聚体增多,增大了土壤颗粒粒径,相应表层土壤 的孔隙增大,水分入渗的通道增多,导致入渗量增加,因而较膜孔清水多向交汇入渗能力增强。

2)在已知资料基础上,提出了4个膜孔肥液多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多向交汇入渗的有效模型。以上模型是在一定的土壤质地、容重、初始含水率条件下建立的,初始条件的改变是否会影响模型的精度,还需要更多的试验资料加以验证。

3)由于模型2对膜孔肥液多向交汇入渗过程 采用分段函数拟合,具有较为明确的物理意义,而且 较为准确,本文建议采用模型2作为膜孔肥液多向 交汇入渗的数学模型。

4) 在本文研究的基础上,今后应开展膜孔肥液 多向交汇入渗影响因素的试验研究。

参考文献:

[1] 吴军虎,费良军,王文焰.膜孔灌溉单孔人渗特性研究[J].水科 学进展,2001,(9):307-311.

- [2] 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(自然版),2007,35(5):212-216.
- [3] 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.
- [4] 程东娟,费良军,尹 娟.膜孔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.
- [5] 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.
- [6] 范严伟,马孝义,王波雷,等.膜孔灌土壤湿润体水分分布与人 渗特性数值模拟[J].农业机械学报,2008,39(11):35-41.
- [7] 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.
- [8] 董玉云,费良军,穆红文.肥液浓度对单膜孔人渗 NO₃⁻ 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 雷雁斌,董玉云,费良军.膜孔灌单向交汇肥液人渗湿润体特 性试验研究[J].灌溉排水学报,2007,26(1):33-36.
- [12] 董玉云,费良军,任建民.肥液浓度对膜孔单向交汇入渗水分 运移特性的研究[J].干旱地区农业研究,2009,27(6):83-88.
- [13] 穆红文,费良军,雷雁斌.膜孔灌肥液自由人渗硝态氮运移特 性试验研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(2):63-66,79.
- [14] 董玉云,费良军,穆红文.膜孔灌单向交汇入渗湿润体特性试验研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(3):81-84.
- [15] 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.
- [16] 董玉云,费良军.膜孔肥液多向交汇入渗湿润体特性试验研究[J].水利水电技术,2012,43(11):87-91.