

# 膜孔灌单向交汇入渗数学模型研究

费良军<sup>1</sup>, 李发文<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048; 2 河海大学水文水资源及环境学院, 南京 210098)

**摘 要:** 通过室内膜孔单向交汇入渗试验资料, 分析了膜孔单向交汇入渗特性, 在此基础上, 根据不同的已知资料情况, 提出了相应的 3 个膜孔单向交汇入渗数学模型, 其中模型 1 是建立在膜孔单向交汇入渗相对膜孔自由入渗的减渗量参数和膜孔自由入渗参数已知条件下的一个入渗模型, 模型 2 建立在膜孔单向交汇入渗的自由入渗阶段和交汇入渗阶段的入渗参数均为已知的基础上, 模型 3 建立在膜孔单向交汇入渗相对膜孔自由入渗减渗率和自由入渗参数为已知的基础上。经实测资料验证表明, 3 个模型均为计算膜孔单向交汇入渗量的有效模型, 这一研究成果可为膜孔灌技术研究提供参考。

**关键词:** 膜孔灌溉; 单向交汇入渗; 数学模型; 入渗参数

**中图分类号:** S275; TV 142

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2003)03-0068-04

## 1 引言

膜孔灌溉是在地膜上输水, 通过作物孔和专用灌水孔入渗进行灌溉的一种节水型地面灌溉新技术<sup>[1]</sup>。膜孔灌入渗为充分供水条件下的空间 3 维入渗, 它不同于滴灌条件下的非充分供水点源入渗<sup>[2]</sup>。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: 第 1 种为作物的行距和株距都很大的膜孔自由入渗; 第 2 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, 称之为膜孔单向交汇入渗; 第 3 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, 称之为膜孔多向交汇入渗。近几年, 国内对膜孔自由入渗特性进行了初步研究<sup>[2~6]</sup>, 而目前尚未见到国外有关方面的研究报导, 膜孔交汇入渗比膜孔自由入渗复杂得多, 国内对膜孔交汇入渗的研究很少<sup>[7]</sup>, 国内仅有文献[3]针对陕北榆林壤土在室内开展了膜孔单向交汇入渗特性试验, 并对其进行了数值模拟, 文献[6]和文献[7]针对沙土在室内开展了膜孔单向交汇入渗特性及其影响因素试验, 目前尚未见到国外开展有关膜孔灌交汇入渗方面的研

究报导, 而国内外对膜孔单向交汇入渗数学模型的研究更为少见<sup>[6]</sup>。而膜孔交汇入渗是膜孔灌技术研究的基础, 也是覆膜旱地农业雨水高效利用的基础。因此, 开展膜孔交汇入渗特性及其数学模型研究具有重要的理论价值和生产实际意义。

## 2 试验方法

为了研究膜孔单向交汇入渗特性和数学模型, 在室内进行膜孔单向交汇入渗试验<sup>[7]</sup>。试验土样采用粉土、粗沙土和粉质粘土, 其基本物理参数见表 1, 表 1 中土壤含水率均为重量含水率。试验土样经风干碾碎后, 过 2 mm 筛子, 按预定的含水率配水后, 分层(5 cm 间隔)装入试验土箱并按预定土壤容重夯实。试验土箱采用 12 mm 厚的有机玻璃板制作, 为了便于观测湿润锋的发展过程, 两个膜孔点源均采用 1/4 膜孔面积的方形水室, 并分别置于土箱的一角。马氏瓶的尺寸为 4 cm × 2.5 cm × 50 cm (长 × 宽 × 高), 每次试验开始前, 给马氏瓶装满水, 并用皮管将马氏瓶与土箱进水孔相连, 试验开始后, 打开阀门, 以分钟为单位, 观测时间间隔先短后长, 由马氏瓶的刻度读取入渗水量。

表 1 土壤基本物理参数表

Table 1 Basic physics parameters of experiment soil

土壤质地	沙粒含量 /%	粉粒含量 /%	物理性粘粒含量 /%	土壤容重 /g · cm <sup>-3</sup>	风干土含水率 /%	田间持水率 /%	饱和含水率 /%	饱和导水率 $K_s$ /cm · min <sup>-1</sup>
粗沙土	72.35	25.22	2.43	1.65	0.39	12.34	37.25	$2.73 \times 10^{-3}$
粉土	19.26	51.04	29.70	1.30	1.94	17.40	32.44	$3.80 \times 10^{-5}$
粉质粘土	3.86	46.54	49.60	1.45	1.87	23.81	29.86	$2.17 \times 10^{-5}$

## 3 膜孔单向交汇入渗特性

### 3.1 膜孔单向交汇入渗特性

收稿日期: 2002-03-20 修订日期: 2003-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59779027); 陕西省科技攻关项目(95K04-G4)

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方面的研究工作。西安市金花南路 西安理工大学水资源研究所, 710048

膜孔单向交汇入渗过程可以分为两个阶段, 第 1 阶段为相邻膜孔入渗的水平湿润锋未发生交汇之前, 即自由入渗阶段, 该阶段入渗特性与膜孔自由入渗特性相同; 第 2 阶段为膜孔入渗的水平湿润锋发生交汇以后, 即膜孔单向交汇入渗阶段, 其入渗量小于膜孔自由入渗量, 膜孔单向交汇入渗能减小土壤的入渗能力。

图 1 表示土壤质地为粉土, 膜孔直径为 36 mm、膜孔间距  $S$  为 24 cm、土壤初始质量含水率为 1.94% 条件下的膜孔单向交汇入渗与同条件下的膜孔自由入渗量

曲线。可以看出:膜孔单向交汇入渗较膜孔自由入渗的入渗能力减小,并随着交汇入渗时间的增长,减渗量增大。试验表明,粗沙土和粉质粘土与粉土膜孔单向交汇入渗具有相似的规律<sup>[7]</sup>。分析表明膜孔单向交汇入渗较膜孔自由入渗的减渗量与入渗时间之间符合幂函数关系,即

$$\Delta Z = a(t - t_0)^b \quad t > t_0 \quad (1)$$

式中  $\Delta Z$ ——膜孔单向交汇入渗相对自由入渗的减渗量, cm;  $t$ ——膜孔入渗时间, min;  $t_0$ ——膜孔发生单向交汇入渗的时间, min;  $a, b$ ——拟合参数。

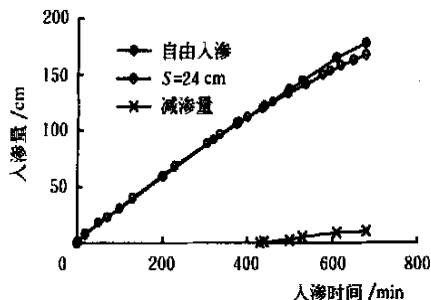


图1 粉壤膜孔自由入渗与交汇入渗量曲线

Fig 1 Free infiltration and interference infiltration volumes from film hole

图1中膜孔单向交汇入渗( $t_0 = 27$  min)的减渗量资料拟合得

$$\Delta Z = 0.1626(t - 430)^{0.7363} \quad t > 430 \text{ min}$$

$$R^2 = 0.9995$$

上述相关系数  $R^2$  为 0.9995, 说明膜孔单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。

## 4 膜孔单向交汇入渗数学模型

### 4.1 数学模型

膜孔单向交汇入渗不同于膜孔自由入渗,膜孔单向交汇入渗包括自由入渗和膜孔交汇入渗两个阶段,本文根据膜孔单向交汇入渗特性和已知资料情况,提出3个膜孔单向交汇入渗数学模型。

#### 1) 模型1

该模型是建立在膜孔单向交汇入渗相对膜孔自由入渗的减渗量参数  $a, b$  和膜孔自由入渗参数  $k, a$  已知条件下的一个入渗模型。

膜孔自由入渗满足 Kostiakov 幂函数规律<sup>[4]</sup>, 设

$$Z_0 = kt^a \quad (2)$$

式中  $Z_0$ ——膜孔自由入渗量, cm;  $k, a$ ——拟合参数, 由试验资料确定。

则膜孔单向交汇入渗量曲线可以分段表示为

$$Z = \begin{cases} Z_0 = kt^a & t < t_0 \\ Z_0 - \Delta Z = kt^a - a(t - t_0)^b & t > t_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $t_0$ ——膜孔发生单向交汇的时间;  $a, b$ ——拟合参数。

#### 2) 模型2

根据膜孔单向交汇入渗包括自由入渗和交汇入渗两个过程, 提出两阶段模型。

经分析膜孔单向交汇入渗两阶段的入渗量曲线均符合幂函数规律, 则膜孔单向交汇入渗量可分段表示为

$$Z = \begin{cases} kt^a & t < t_0 \\ ct^d & t > t_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $t_0$ ——膜孔发生单向交汇的时间;  $k, a, c, d$ ——拟合参数。

#### 3) 模型3

该模型是建立在膜孔单向交汇入渗相对膜孔自由入渗减渗率  $\eta$  和膜孔自由入渗参数  $k, a$  已知条件下的一个入渗模型。

定义减渗率  $\eta$  为膜孔单向交汇入渗量  $Z$  相对于同条件下相同入渗历时的膜孔自由入渗量  $Z_0$  减小的百分数, 即

$$\eta = \frac{Z_0 - Z}{Z_0} \times 100\% \quad (5)$$

在已知膜孔单向交汇入渗相对同条件下膜孔自由入渗的减渗率  $\eta$  和膜孔自由入渗量参数  $k$  和  $a$  条件下, 膜孔单向交汇入渗量  $Z$  为

$$Z = (1 - \eta)Z_0 = (1 - \eta)kt^a \quad (6)$$

式中  $\eta$ ——膜孔单向交汇入渗相对膜孔自由入渗的减渗率, %;  $k, a$ ——膜孔自由入渗参数。经分析膜孔交汇入渗的减渗率  $\eta$  与入渗时间  $t$  之间符合幂函数规律, 设

$$\eta = a(t - t_0)^b \quad t > t_0 \quad (7)$$

式中  $a, b$ ——拟合参数;  $t_0$ ——膜孔入渗发生单向交汇的时间, min。

则式(6)可以表示为

$$Z = (1 - \eta)Z_0 = (1 - \eta)kt^a = [1 - a(t - t_0)^b]kt^a \quad (8)$$

### 4.2 模型验证与评价

#### 4.2.1 模型验证

利用图1试验资料对本文所提出的3个膜孔单向交汇入渗数学模型进行验证。

根据式(3)对图1的实测资料拟合得

$$Z = \begin{cases} 0.7053t^{0.8381} & t < 430 \text{ min} \\ 0.7053t^{0.8381} - 0.1626(t - 430)^{0.7363} & t > 430 \text{ min} \end{cases} \quad R^2 = 0.9974$$

根据式(4)对图1资料拟合得

$$Z = \begin{cases} 0.7053t^{0.8381} & t < 430 \text{ min} \\ 1.1792t^{0.7609} & t > 430 \text{ min} \end{cases} \quad \begin{matrix} R^2 = 0.9974 \\ R^2 = 0.9992 \end{matrix}$$

表2为利用图1资料得到的膜孔交汇入渗时间与减渗率  $\eta$  的关系。

表2 膜孔交汇入渗时间与减渗率  $\eta$  的关系

$t/\text{min}$	430	440	500	530	610	680
$\eta/\%$	0	0.66	1.98	3.79	5.54	6.04

对表2资料拟合得

$$\eta = 0.001213(t - 430)^{0.7159} \quad t > 430 \text{ min}$$

$$R^2 = 0.9708$$

利用模型3对图1试验资料拟合得

$$Z = [1 - 0.001213(t - 430)^{0.7159}] \times 0.7053t^{0.8381}$$

表 3 为 3 个膜孔单向交汇入渗模型计算值相对图 1 实测资料的误差计算结果。可以看出: 实测值与计算值比较, 计算值总体上较实测值偏小, 从总的计算结果来看, 计算精度均较高。模型 1 计算的最大误差为 6.86%, 平均误差为 2.96%; 模型 2 计算的最大误差为 10.85%, 平均误差为 1.21%; 模型 3 计算的最大误差为 6.99%, 平均误差为 2.97%。从表 3 看出: 模型 1 与模型 3 计算误差基本相同。

表 3 模型的计算值与试验实测值对照表

Table 3 Comparison of calculated and experimental values				
特征值	均值	均方差	最大误差/%	平均误差/%
实测值	102.771	52.504	—	—
模型一计算值	97.534	48.309	6.86	2.96
模型二计算值	101.696	52.555	5.85	1.21
模型三计算值	94.498	48.225	6.99	2.97

表 4 模型的计算值与试验实测值对照表(粉质粘土和粗沙土)

Table 4 Comparison table of models calculated value and experimental value

特征值	粉质粘土				粗沙土			
	均值	均方差	最大误差/%	平均误差/%	均值	均方差	最大误差/%	平均误差/%
实测值	36.47	18.56	—	—	142.53	72.86	—	—
模型 1 计算值	36.59	17.38	6.23	2.14	138.65	70.45	5.36	2.38
模型 2 计算值	36.02	18.24	6.07	1.83	140.67	71.26	4.23	1.39
模型 3 计算值	34.91	17.23	6.64	2.42	137.26	70.17	6.07	2.07

1 次之, 而模型 3 相对较差。模型 1 是建立在膜孔单向交汇入渗相对膜孔自由入渗减渗参数  $a$ 、 $b$  和膜孔自由入渗参数  $k$ 、 $a$  已知条件下的一个入渗模型, 该模型计算精度较高, 但所需资料的获得试验工作量较大。模型 2 是建立在一个具有试验资料基础上的膜孔单向交汇入渗参数  $k$ 、 $a$ 、 $c$  和  $d$  已知条件下的一个入渗模型, 由于模型 2 建立在较多的基本资料基础上, 所以该模型计算精度相对较高。模型 3 是建立在一个具有试验资料基础上的膜孔单向交汇入渗模型, 即建立在膜孔单向交汇入渗相对膜孔自由入渗减渗率  $\eta$  和膜孔自由入渗参数  $k$ 、 $a$  已知条件下的一个入渗模型, 模型参数较多, 而这些参数的确定所需资料的试验工作量相对较大。

## 5 结 论

1) 膜孔单向交汇入渗过程可以分为自由入渗阶段和交汇入渗阶段, 膜孔单向交汇入渗较膜孔自由入渗能力减小。

2) 本文建立在不同已知资料基础上, 提出了 3 个膜孔单向交汇入渗量计算模型, 这一研究成果为膜孔灌理论与技术的进一步研究奠定了基础。

3) 经试验实测资料验证和模型评价表明: 所提出的 3 个膜孔单向交汇入渗模型计算精度均较高, 且计算

本文还利用了表 1 中粉质粘土、粗沙土的试验实测资料, 对本文提出的 3 个膜孔单向交汇入渗模型进行了验证, 其结果见表 4。由表 4 可以看出: 对粉质粘土, 模型 1、模型 2 和模型 3 计算的最大相对误差分别为 6.23%、6.07% 和 6.64%, 平均误差分别为 2.14%、1.83% 和 2.42%; 对粗沙土, 模型 1、模型 2 和模型 3 计算的最大相对误差分别为 5.36%、4.23% 和 6.07%, 平均相对误差分别为 2.38%、1.39% 和 2.07%。从表 3 和表 4 看出: 模型 1 与模型 3 计算误差基本相同。

## 4.2.2 模型评价

由模型验证可以看出: 对于验证模型的粗沙土、粉土和粉质粘土的 3 组试验实测资料, 模型 1、模型 2 和模型 3 的计算值较试验值的最大相对误差分别为 6.86%、6.07% 和 6.99%, 平均误差分别为 2.96%、1.83% 和 2.97%, 说明模型 2 计算精度相对最高, 模型

简便, 因而该模型均为计算膜孔单向交汇入渗量的有效模型, 在实际应用中, 可根据不同的已知资料情况加以选用。在已知膜孔单向交汇入渗相对膜孔自由入渗减渗参数和膜孔自由入渗参数时, 选用模型 1; 在已知膜孔单向交汇入渗两阶段入渗参数时, 选用模型 2; 在已知膜孔单向交汇入渗减渗率和膜孔自由入渗参数时, 选用模型 3。

## [参 考 文 献]

- [1] 徐首先, 魏玉强, 等. 膜孔灌理论及实用技术初步研究[J]. 水土保持研究, 1996, (3): 23~29.
- [2] 费良军, 谭奇林, 王文焰, 等. 充分供水条件下点源入渗特性及其影响因素[J]. 水土保持学报, 1999(5): 70~74.
- [3] 缴锡云. 膜孔灌溉理论与技术要素的实验研究[D]. 西安理工大学, 1999.
- [4] 吴军虎. 膜孔灌溉入渗特性与技术要素实验研究[D]. 西安理工大学, 2000.
- [5] 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(5): 137~140.
- [6] 李发文. 膜孔灌交汇入渗特性及其影响因素研究[D]. 西安理工大学, 2002.
- [7] 李发文, 费良军. 膜孔灌多源交汇入渗影响因素试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, (6): 26~30.

## Mathematical models of single-line interference infiltration from film holes

Fei Liangjun<sup>1</sup>, Li Fawen<sup>2</sup>

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** By experimental data, characteristic of film hole single-line interference infiltration was analyzed. The three mathematical models of film hole single-line interference infiltration were proposed under different conditions of known data. Model 1 is based on that the parameters of the reduced infiltration volume that film hole single-line interference infiltration as compared with film hole free infiltration and of the film hole free infiltration are known; Model 2 is based on that the infiltration parameters of two stages of film hole single-line infiltration——film hole free infiltration and interference infiltration are known; Model 3 is based on that the rate of reduced infiltration that film hole single-line interference as compared with film hole free infiltration and the parameter of free infiltration are known. The calculation precision of the model was verified by experimental data. The results provide reference for further study of film hole irrigation.

**Key words** film hole irrigation; single-line interference infiltration; mathematical models; infiltration parameters

### “海峡两岸农产品深加工论坛、食品安全研讨会暨食品科技新成果展示会”征稿启事

“海峡两岸农产品深加工论坛、食品安全研讨会、食品科技新成果展示会”，由福建农林大学、福建省科技厅、台湾食品科学技术学会、台湾海洋大学、中国农学会农产品贮藏加工专业委员会、全国高等院校食品学院院长协作会、中国农业部“食品科学与工程”学科组共同发起，经中国科学技术部批准，由中国农学会农产品贮藏加工专业委员会、全国高等院校食品学院院长协作会、中国农业部“食品科学与工程”学科组、福建农林大学和福建省科技厅主办，福建农林大学食品科学学院及福建省闽台交流协会承办。

大会将秉承往届大会的宗旨，以共同研讨 21 世纪食品领域内的科学研究、技术开发和产品发展战略为目的，加强交流与协作，增进了解和友谊，为加强海峡两岸食品科技交流和推动海峡两岸食品加工技术的发展做出应有的贡献。在中国农业工程学会的大力支持下，大会组委会拟正式出版论文集，论文通过评审后以《农业工程学报》2003 年增刊形式出版。

会议主要内容：21 世纪食品科学发展。论文征集范围包括：1 食品安全性；2 农产品加工、贮藏与包装；3 海峡两岸食品资源开发；4 21 世纪海峡两岸食品发展战略。

本届交流会初定于 2003 年 11 月 22-24 日在福

州市召开，会期 3 天，具体时间见后续通知，会后将组织前往福建南平地区及武夷山市参观考察相关食品加工企业并进行项目对接洽谈。

大会会务组设在福建农林大学食品科学学院和福建省闽台科技交流协会，会议论文须按《农业工程学报》的规范与要求写作，稿件请寄会务组，投稿时务请提供详细通讯方式，论文被录用后，作者必须提供电子文档。会务组诚邀业界专家学者踊跃投稿和参会，大学学术组将安排部分优秀论文作者在大会上发言。欲知详情，请与会务组联系：

1、地 址：福州 金山 福建农林大学食品科学学院

联系人：庞 杰 陈锦权

电 话：0591-7688590, 3789424

邮 编：350002

E-mail: pang3721941@sina.com

2、地 址：福州湖东路 7 号 福建省闽台科技交流协会

联系人：何伟鹏

电 话：0591-7620559

传 真：0591-7557274

邮 编：350003

E-mail: hwp5412@sina.com