

文章编号: 1001-6791(2001)03-0307-05

膜孔灌溉单孔入渗特性研究

吴军虎, 费良军, 王文焰

(西安理工大学水资源研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 根据室内单点膜孔入渗试验资料, 研究了充分供水条件下单点膜孔入渗规律及膜孔入渗与垂直一维入渗之间的关系, 提出了膜孔入渗的数学模型, 建立了膜孔入渗参数与垂直一维入渗参数的关系, 实现了根据一维垂直入渗资料确定膜孔入渗模型。该研究成果为膜孔灌溉理论与技术的进一步研究奠定了基础。

关键词: 膜孔灌溉; 充分供水; 单点膜孔入渗

中图分类号: O 357.3 **文献标识码:** A

我国地膜覆盖种植面积已居世界首位^[1], 而膜孔灌溉是在农田地膜栽培的基础上, 利用地膜输水, 并通过膜孔渗入土壤对作物进行灌水的一种节水型地面灌溉新技术, 它具有节水、省肥、提高灌水质量和增产等特点^[2,3]。大力发展膜孔灌溉技术, 对我国实现农业高效用水, 缓解水资源供需矛盾, 保证农业持续发展具有十分重要的战略意义。膜孔灌在灌水方式上, 属于地面灌溉, 但其土壤水分入渗方式却又类似于滴灌。对于间距较大的作物, 如西瓜等, 膜孔入渗属于单膜孔自由入渗。对于单个膜孔而言, 膜孔入渗与滴灌条件下的点源入渗一样, 均属于局部浸润的空间三维入渗。膜孔入渗与滴灌条件下点源入渗的不同之处在于, 滴灌的土壤水分入渗是非充分供水条件下的点源入渗, 而膜孔灌溉中水流在田面流动, 膜孔上方有薄层积水, 使供水能力始终大于土壤的入渗能力, 所以膜孔入渗属于充分供水条件下的入渗。另外, 膜孔入渗并非严格意义上的点源入渗, 其受水面积(即膜孔面积)的大小对膜孔入渗特性影响很大, 但膜孔面积与整个湿润面积相比非常小。因此, 从宏观上可以把膜孔入渗看作充分供水条件下的三维“点源”入渗。目前国内外在膜孔灌点源入渗特性与数学模型方面研究较少^[4,5], 而膜孔入渗特性与数学模型研究是膜孔灌灌水方案设计和灌水质量评价的基础。因此, 开展充分供水条件下的单点膜孔入渗特性与数学模型研究具有重要的理论价值和实际意义。

1 试验装置与试验方法

为了研究膜孔入渗特性及其规律, 利用西安理工大学水资源研究所研制的点源入渗装置在室内进行单点膜孔入渗试验^[6], 试验装置如图 1 所示。试验装置由有机玻璃材料制成, 长×宽

收稿日期: 2000-06-14; 修订日期: 2000-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59779027); 陕西省“九五”攻关项目(95K04-G4)。

作者简介: 吴军虎(1974-), 男, 陕西铜川人, 西安理工大学博士研究生, 主要从事农业水资源利用与节水灌溉方面的理论和技术研究。

×高为 40 cm × 30 cm × 40 cm, 利用改进的马氏瓶进行自动供水^[7]。

试验土样为陕北粗沙土, 其土壤基本物理参数如表 1 所示。试验土样经风干、粉碎、过筛, 按预定的含水量配水后分层装入试验土箱。对膜孔直径分别为 2 cm、3 cm、4 cm、5 cm、6 cm 的膜孔进行入渗试验, 在进行试验时, 将 1/4 膜孔置于 A 点, 按照先密后疏的时间间隔在入渗 1、3、5、…、30、35、…、80、90 min 时 (共 19 个数据点) 通过马氏瓶读取累积入渗量, 由装置的 ABCD 面或 ABba 面绘出湿润体的形状并测量垂直湿润深度和水平湿润半径随入渗时间的变化。为比较膜孔入渗与一维垂直入渗的关系, 在进行充分供水条件下膜孔入渗试验的同时, 又进行了相同土壤条件下的垂直土柱入渗试验。

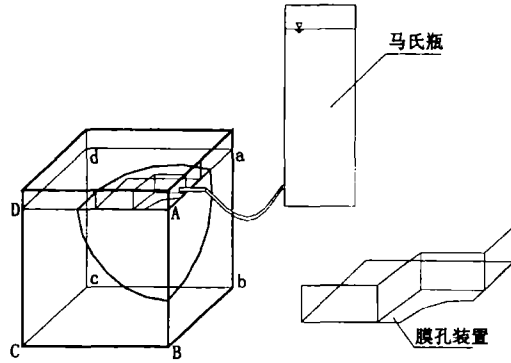


图 1 试验装置与膜孔示意图
Fig.1. Experimental equipment and film hole device

表 1 土壤基本物理参数表

Table 1. Soil hydraulic parameters

土壤质地	土壤容重 /g/cm ³	初始含水率 /%	饱和含水率 /%	物理性粘粒含量 /%	饱和导水率 /cm/min
粗沙土	1.52	3.20	24.47	2.43	2.73 × 10 ⁻³

2 单点膜孔入渗特性

2.1 单点膜孔入渗累积入渗量

图 2 表示不同膜孔直径条件下的膜孔累积入渗量曲线。入渗时间相同时, 不同膜孔直径上的累积入渗量随着膜孔直径的增大而增加。在膜孔入渗中, 膜孔面积作为水分进入土壤的入渗界面, 膜孔直径越大, 膜孔面积也越大, 意味着水分渗入土壤的通道也越多, 因而整个膜孔面积上的入渗水量也随之增加。

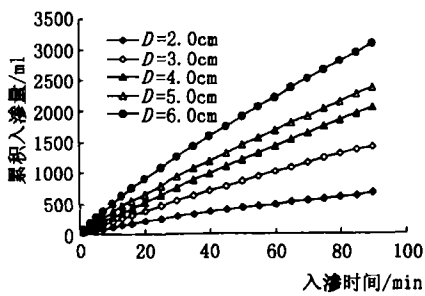


图 2 不同膜孔直径的单膜孔累积入渗量曲线
Fig.2. Cumulative infiltration volume of single film hole with different Diameter

2.2 单位膜孔面积累积入渗量

图 3 为对应于图 2 的不同膜孔直径条件下单位膜孔面积的人渗量曲线。可以看出: 单位膜孔面积的人渗量均大于相同入渗时间的一维垂直入渗量。在相同入渗时间内, 单位膜孔面积上的入渗量随着膜孔直径的增加而减小, 并且入渗时间越长, 这种减小的趋势越明显。

膜孔入渗是充分供水条件下的三维入渗, 它不仅包含垂直向下的水分运动, 而且还有侧向的水分运动。假定单位膜孔面积上的入渗水量是由垂直入渗水量和膜孔侧渗水量组成, 即

$$Z = Z_0 + Z_c \tag{1}$$

式中 Z 为单位膜孔面积的入渗水量, cm; Z_0 为一维垂直入渗水量, cm; Z_c 为单位膜孔面积的侧渗水量, cm。

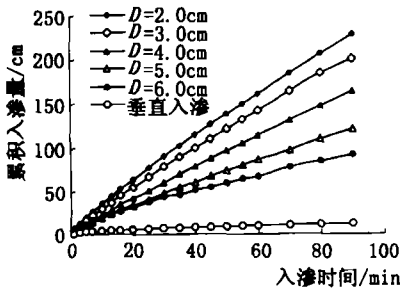


图3 单位膜孔面积的累积入渗量曲线
Fig.3. Cumulative infiltration volume per unit film hole area with different diameters

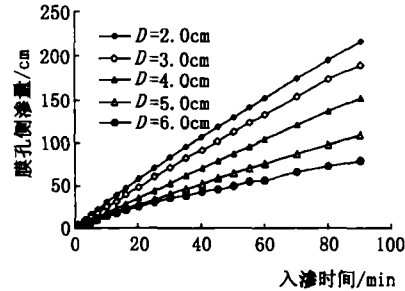


图4 膜孔侧渗量与入渗时间的关系
Fig.4. Lateral infiltration volume per unit film hole area with different Diameter

图4为不同膜孔直径条件下单位膜孔面积的侧渗量与入渗时间的关系。图中膜孔直径上的侧渗量为对应于图3中同一时间的单位膜孔面积入渗水量与相应时间的一维垂直入渗水量之差。由图可见,单位膜孔面积上的侧渗量均随着入渗时间的延长而增大,并且随着膜孔直径的增加而减小。图4中膜孔侧渗量曲线与图3中膜孔入渗量曲线相差不大,说明垂直入渗量在膜孔入渗量中所占比重很小,而膜孔侧渗量所占比重很大。

3 单点膜孔入渗模型

图5表示膜孔直径为4.0 cm的膜孔入渗和垂直一维入渗实测的累积入渗量曲线,表2为分别利用 Kostiakov 入渗公式、改进的 Kostiakov 入渗公式和 Philip 入渗公式对图5中膜孔入渗实测资料的拟合结果,表2中改进的 Kostiakov 入渗模型的 α 根据土壤质地确定^[4]。取显著性水平为0.01,对含有19个数据点的系列,其临界相关系数 $r_c = 0.5751$ 。从表2可以看出:这三种入渗模型拟合膜孔入渗的相关系数均大于临界相关系数 r_c ,说明这三种模型均能较好地反映膜孔入渗量与入渗时间的关系,相关关系显著。但由于 Kostiakov 入渗模型形式简单、参数少、计算简便,并且计算精度高,使用广泛。因此,本文对单点膜孔入渗采用 Kostiakov 入渗模型,式中 K 、 α 均为膜孔直径 D 的函数。

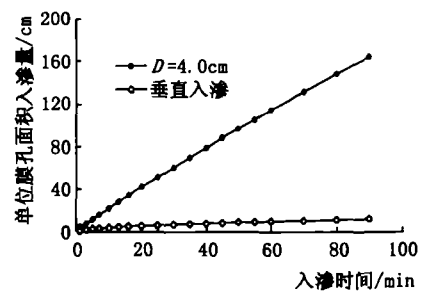


图5 单位膜孔面积入渗量与入渗时间的关系
Fig.5. Cumulative infiltration volume per unit film hole area

表2 膜孔入渗方程

Table 2. Mathematical models of single film hole infiltration

模型名称	Kostiakov 入渗模型	改进的 Kostiakov 入渗模型	Philip 入渗模型
模型形式	$z = Kt^\alpha$	$z = Kt^\alpha + ft$	$z = S_t^{1/2} + At$
拟合方程	$z = 3.6344t^{0.8307}$	$z = 1.9236t^{0.723} + 1.2654t$	$z = 1.8702t^{1/2} + 1.650t$
相关系数 R	0.9952	0.9957	0.9996

4 单点膜孔入渗与垂直一维入渗的关系

由于垂直一维入渗试验操作简单, 试验资料易于获取, 建立膜孔入渗与垂直一维入渗的关系, 实现由垂直一维入渗参数确定膜孔入渗参数。

采用 Kostiakov 入渗模型拟合图 3 中各曲线的结果见表 3。

表3 膜孔入渗与垂直入渗的 Kostiakov 模型参数表

Table 3. Kostiakov parameters of single film hole infiltration and vertical infiltration

膜孔直径/cm	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	垂直入渗
K	5.0184	4.4873	3.6344	3.0201	2.8751	1.2071
α	0.8481	0.8391	0.8307	0.8135	0.7802	0.5114
相关系数 R	0.9981	0.9978	0.9952	0.9995	0.9988	0.9988

可以看出, 膜孔入渗参数 K 、 α 随着膜孔直径的增大而减小, 将垂直入渗看作是膜孔直径趋于无穷大时的膜孔入渗^[6], 经分析研究, 膜孔入渗参数 K 、 α 与垂直入渗参数 K_0 、 α_0 符合以下关系:

$$K = K_0(1 + aD^b) \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha_0(1 + m \cdot e^{nD}) \quad (3)$$

即膜孔入渗与垂直入渗之间具有以下的关系:

$$Z = Kt^\alpha = K_0(1 + aD^b) \cdot t^{\alpha_0(1+m \cdot e^{nD})} \quad (4)$$

式中 K 、 α 、 K_0 、 α_0 分别为膜孔入渗和垂直入渗参数; D 为膜孔直径, cm; a 、 b 、 m 、 n 分别为拟合系数。

根据表 3 中的数据回归分析得

$$K = 1.2071(1 + 5.9487D^{-0.8113}) \quad \text{相关系数 } R = 0.9773 \quad (5)$$

$$\alpha = 0.5114(1 + 0.7548e^{-0.0554D}) \quad \text{相关系数 } R = 0.9357 \quad (6)$$

取显著性水平为 0.01, 对含有 6 个数据点的系列, 其临界相关系数 $r_\alpha = 0.9172$ 。膜孔入渗参数 K 、 α 与膜孔直径 D 的相关系数均大于临界相关系数 r_α , 相关关系显著。则陕北粗沙土膜孔入渗量模型为:

$$Z = 1.2071(1 + 5.9487D^{-0.8113}) \cdot t^{0.5114(1+0.7548e^{-0.0554D})} \quad (7)$$

采用该模型计算的膜孔直径为 5.0 cm 的膜孔入渗量与实测值如表 4 所示。模型计算值与实测值相对偏差较小, 说明采用该模型预测膜孔入渗量是有效的。

表4 膜孔入渗模型计算值与实测值对比表 ($D = 5.0$ cm)

入渗时间/min	10	20	30	40	60	70	80	90
实测入渗量 Z /cm	18.79	33.47	47.74	60.37	86.05	97.47	109.70	121.11
计算入渗量 Z' /cm	20.08	35.05	48.56	61.20	84.79	95.98	106.86	117.47
相对偏差 $(Z-Z')/Z/\%$	-6.87	-4.72	-1.72	-1.37	1.46	1.53	2.59	3.01

5 结 语

通过室内膜孔入渗试验研究了单点膜孔入渗规律。膜孔入渗量随着入渗时间的延长而增大;在入渗时间相同时,膜孔总入渗量随着膜孔直径的增大而增加,而单位膜孔面积的侧渗量和入渗量随膜孔直径的增大而减小;单位膜孔面积的入渗量与入渗时间的关系符合 Kostiakov 模型。

分析研究了膜孔入渗与垂直一维入渗之间的关系,建立了膜孔入渗参数与垂直一维入渗参数及膜孔直径间的关系,由此可以根据垂直入渗参数推求膜孔点源入渗参数。

参考文献:

- [1] 黄介生,沈荣开.地膜覆盖技术的研究现状与展望[J].中国农村水利水电,1997年增刊:80-81.
- [2] 米孟恩.膜上灌节水技术[J].节水灌溉,1998,(1):20-24.
- [3] 徐首先,魏玉强,聂新山,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.
- [4] 谭奇林.充分供水条件下点源入渗实验研究[D].西安:西安理工大学水利水电学院,1998.34-45.
- [5] 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].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,2:70-74.
- [6] 吴军虎.膜孔灌溉入渗特性与技术要素试验研究[D].西安:西安理工大学水利水电学院,2000.12-22.
- [7] 沈晋,王文焰,沈冰,等.动力水文实验研究[M].西安:陕西科学技术出版社,1991.81-83.

Study on the Infiltration Characteristics of Single Filmed Hole and Its Mathematical Model under Filmed Hole Irrigation*

WU Jun-hu, FEI Liang-jun, WANG Wen-yan

(Institute of Water Resources Research, Xian University of Technology, Xian 710048, China)

Abstract: The paper researches single filmed hole infiltration law and the relation between filmed hole infiltration and vertical infiltration under adequate water supply based on indoor experimental data, suggests the filmed hole infiltration model based on Kostiakov infiltration equation, finds the connection between film hole infiltration parameters and vertical infiltration parameters, and determines the single filmed hole infiltration model according to vertical infiltration data. These research results have laid a foundation for further study of the theory and technology of filmed hole irrigation.

Key words: filmed hole irrigation; adequate water supply; single filmed hole infiltration

* The project is supported by National Natural Science Fund of China(No.59779027).