

膜孔灌单点源入渗特性与数学模型研究^{*}

费良军¹,程东娟^{1,2},雷雁斌³,贾丽华¹

(1 西安理工大学 水资源研究所,陕西 西安 710048;2 河北工程大学 水电校区,河北 邯郸 056021;3 陕西省水利厅项目办,陕西 西安 710048)

[摘 要] 通过室内膜孔单点源入渗试验,分析了膜孔灌单点源入渗单位面积侧渗量与一维垂直入渗量的变化规律,研究了膜孔灌单点源入渗单位面积侧渗量与入渗时间、膜孔直径之间的关系,建立了包含垂直一维入渗量和侧渗量的两个具有明确物理意义的膜孔单点源入渗模型,只需知道垂直一维入渗参数、膜孔直径和入渗时间,即可用于膜孔单点源入渗量的计算。实例验证结果表明,两个模型计算精度高,应用方便,均为计算膜孔单点入渗量的有效模型。

[关键词] 膜孔灌;单点源入渗;入渗特性;一维垂直入渗;入渗模型

[中图分类号] S275.3

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)05-0212-05

Study on the infiltration characteristic and the mathematical model of the point source free infiltration under film hole irrigation

FEI Liang-jun¹, CHENG Dong-juan^{1,2}, Lei Yan-bin³, JIA Li-hua¹

(1 Xi'an Institute of Water Resource, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 College of Hydraulic and Electric Power, Hebei Engineering University, Handan, Hebei 056021, China;

3 Project Office of Shaanxi Water Resources Hall, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract : Based on the indoor experiment of film hole infiltration ,the rule of the side infiltration volume per unit area under film hole single point infiltration and one-dimensional vertical infiltration volume per unit area and the relationship between side infiltration volume ,infiltration time and film hole diameter are studied. Then the relationship between the side infiltration volume and vertical volume per unit area are set up. Thereby two single point source infiltration models including the side infiltration volume and one-dimensional vertical volume are established. The models have obvious physical meaning and can be used conveniently for calculating infiltration volume only with vertical infiltration parameter and film hole diameter and infiltration time. With good preciseness ,the two models are effective for calculating infiltration volume.

Key words : film hole irrigation ;single point source infiltration ;infiltration characteristic ;one-dimensional vertical infiltration ;infiltration model

膜孔灌是覆膜灌溉中最先进的灌溉方式之一,其利用地膜输水,通过作物的出苗孔、专用灌水孔入渗进行灌溉。膜孔入渗不同于滴灌条件下非充分供水的点源入渗,而是充分供水条件下的空间三维入渗,目前对其的研究尚比较少^[1-4]。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,即膜孔自由入渗、膜孔单向交汇入渗和膜孔多向交汇入渗。膜孔入渗模型的研究是膜孔灌溉灌水方案设计和灌水质量评价的基础。因此,进行膜孔灌充分供水点源入渗特性与数学模型研究具有重要的理论价值和

^{*} [收稿日期] 2006-04-05

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50579064;50179030);陕西省高校重点实验室重点科研项目(30JS041)。

[作者简介] 费良军(1963-),男,陕西蓝田人,教授,博士,博士生导师,主要从事节水灌溉、农业水资源利用与水环境研究。

E-mail: feiliangjun@sohu.com

生产实际意义。

近年来,国内学者依据膜孔灌入渗试验资料,提出了几个膜孔自由入渗经验模型。如聂新山等^[5]建立了包含膜孔面积、土壤初始含水量、土壤干容重三因子的膜孔入渗模型,该模型需要有 7 组试验数据方可求解,因而模型的求解相当麻烦,而且未考虑土壤质地对膜孔入渗的影响,而试验证明土壤质地对膜孔入渗能力影响很大。门旗等^[6]根据室内水槽试验资料和水量平衡原理推导了膜孔灌单因子入渗方程,该模型根据水量平衡原理推导而来,具有一定的理论基础,但其利用二维灌水入渗试验资料推求三维入渗条件下的入渗方程,故也具有一定的局限性。费良军等^[7]通过室内试验研究了充分供水条件下的单点源入渗特性,建立了一定土壤容重条件下包括点源面积、土壤质地、土壤初始含水量在内的三因子点源入渗模型,并考虑了各影响因素对膜孔入渗的影响,但该模型应用上仅适用膜孔直径 $D < 8.0$ cm 的情况。吴军虎等^[8]分别利用 Kostikov 入渗模型、改进的 Kostikov 入渗模型和 Pihlip 入渗模型,对膜孔入渗实测资料进行了拟合,经分析认为以上 3 种入渗模型都能较好地反映膜孔入渗量与时间的关系,由于 Kostikov 点源入渗模型形式简单、参数少和计算精度高而受到关注。国外学者除对滴灌有类似的入渗模型研究外,至今尚未见到关于膜孔自由入渗模型的相关研究报道。为此,本研究试图通过室内膜孔单点源入渗试验,建立更为精确、适用性更强的单点源入渗模型,以期对膜孔理论与技术要素的进一步研究奠定科学基础。

1 材料与方法

为了研究膜孔单点源入渗特性,利用自行研制的膜孔单点源入渗试验装置,在室内分别进行了不同膜孔直径的膜孔入渗试验。图 1 所示为膜孔单点源自由入渗试验装置,试验土箱由 10 mm 厚的有机玻璃板制成,为使试验过程不产生交汇,试验土箱长×宽×高为 24 cm×24 cm×30 cm;为了便于观测湿润锋的发展过程,入渗点源采用 1/4 膜孔面积的方形水室,并置于土箱的一角。试验利用带有刻度的截面积为 30.5 cm² 的透明有机玻璃制作的马氏瓶进行自动供水。

土样采用陕北粗砂土,土壤初始重量含水率为 3.20%,饱和含水量 37.27%,土壤容重为 1.52 g/cm³,物理性粘粒含量是 43%,饱和导水率为 2.73×10⁻³ cm/min。土样风干、粉碎过 2 mm 筛,按照

预定的土壤容重分层(5 cm 厚)装入试验土箱,膜孔直径(D)设 2,3,4,5 和 6 cm 共 5 个水平,将 1/4 膜孔直径的膜孔仪置于土箱的 A 位置,在进行充分供水条件下不同膜孔直径点源入渗试验的同时,又进行了同样土壤条件下的一维垂直土柱入渗试验,在入渗时间达 10,20,30,40,50,60,70,80 和 90 min 时从马氏瓶刻度上读取入渗水量,将入渗水量除以入渗面积即为单位面积入渗量;膜孔点源入渗侧渗量为单位面积膜孔点源入渗量与单位面积一维垂直入渗量之差。

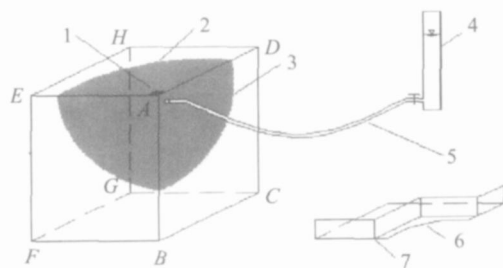


图 1 单膜孔入渗试验装置

1. 膜孔装置;2. 土面;3. 湿润锋;4. 马氏瓶;5. 供水管;
6. 膜孔;7. 膜孔装置

Fig. 1 Device for single film hole free infiltration

1. Device of film hole;2. Soil face;3. Wetting front;4. Marriott bottle;
5. Pipe for water supply;6. Film hole;7. Device of film hole

2 膜孔点源入渗侧渗量与垂直一维入渗量的变化规律

膜孔点源入渗是充分供水的空间三维入渗,存在水分的垂直入渗和水平侧渗现象。若将点源入渗的水分运动分为水平方向的水分运动和垂直方向的水分运动,则点源入渗水量包括侧渗量(水平入渗量)和垂直入渗量两部分,即 $Q = Q_{\text{垂直}} + Q_{\text{侧渗}}$ 。图 2 中的单位面积点源入渗侧渗量为单位面积点源总入渗量与单位面积垂直一维入渗量之差。由图 2 可以看出,不同膜孔直径的单位面积侧渗量均随着入渗时间的延长而增大;相同入渗时间内,随着膜孔直径的增大,单位点源入渗的侧渗量减小,这种趋势随着入渗时间的增长而愈加明显,这主要是由于 $Q_{\text{侧渗}}$ 是膜孔周长占其面积比值的函数。因此,点源面积越大,单位点源入渗的侧渗量越小^[3]。

经分析,不同膜孔直径时单位面积膜孔侧渗量和垂直一维入渗量与入渗时间之间符合幂函数关系,幂函数拟合较线性函数拟合具有更高的精度,设

$$Q_{\text{垂直}} = A t^B, \quad (1)$$

$$Q_{侧渗} = Et^F。$$
 (2)

式中： $Q_{垂直}$ 为单位面积垂直一维入渗量，cm； $Q_{侧渗}$ 为膜孔入渗的单位面积侧渗量，cm； t 为入渗时间，min； A, B, E, F 分别为拟合参数， A 和 B 的值与膜孔直径无关，而 E 和 F 是膜孔直径的函数。

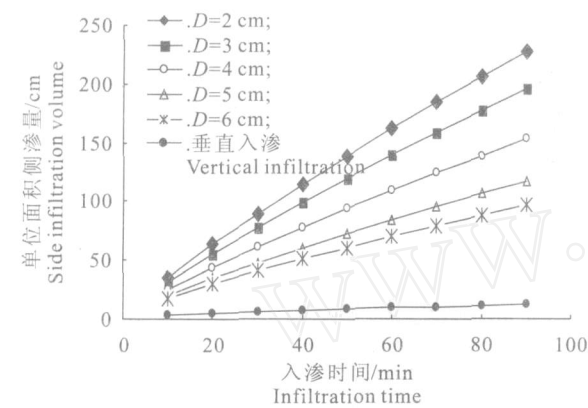


图 2 不同膜孔直径时侧渗量与入渗时间的关系

Fig. 2 Relationship between side infiltration volume and infiltration time under different film hole diameter

表 1 膜孔点源入渗侧渗量与入渗时间关系的拟合参数

Table 1 Fitting parameter of side infiltration volume under point source infiltration and infiltration time

拟合参数 Fitting parameter	D / cm				
	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
E	3.098 9	2.510 0	1.940 9	1.545 3	1.695 1
F	1.706 2	1.728 9	1.724	1.701 9	1.566 7
R ²	0.999 6	0.999 5	0.999 8	0.999 6	0.998 7

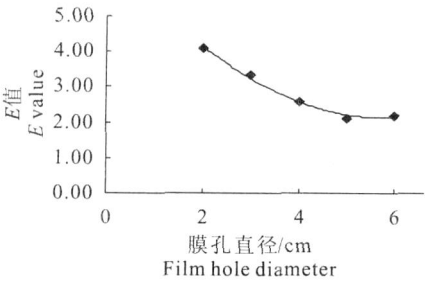


图 3 参数 E 与膜孔直径的关系

Fig. 3 Relationship between parameter E and film hole diameter

3 膜孔灌点源入渗侧渗量与垂直一维入渗量的关系

图 5 为试验条件下，不同膜孔直径的点源入渗单位面积侧渗量与单位面积垂直一维入渗量的关系。由图 5 可以看出，不同膜孔直径的点源入渗单位面积侧渗量，均随着单位面积垂直一维入渗量的增大而增大；随膜孔直径的增大，单位面积的侧渗量

利用式 (1)、(2) 对图 2 资料进行拟合，其结果见表 1。参数 E, F 随膜孔直径的变化关系分别见图 3 和图 4。经分析， E, F 与膜孔直径 D 之间均为二次函数关系，可写成：

$$E = aD^2 + bD + c，$$
 (3)

$$F = a'D^2 + b'D + c'。$$
 (4)

式中： a, b, c, d, b', c' 均为拟合参数； D 为膜孔直径，cm。

对图 3、图 4 资料进行拟合，可得：

$$E = 0.142\ 3D^2 - 1.643\ 3D + 6.872\ 6，$$
$$R^2 = 0.988\ 7；$$
 (5)

$$F = -0.011\ 7D^2 + 0.077\ 2D + 0.772\ 7，$$
$$R^2 = 0.979\ 5。$$
 (6)

则初始重量含水率为 3.20 %、容重 1.52 g/cm³ 的陕北粗沙土，膜孔点源入渗的单位面积侧渗量与入渗历时的关系为：

$$Q_{侧渗} = (0.142\ 3D^2 - 1.543\ 3D + 6.8726) t^{(-0.011\ 7D^2 + 0.077\ 2D + 0.772\ 7)}。$$
 (7)

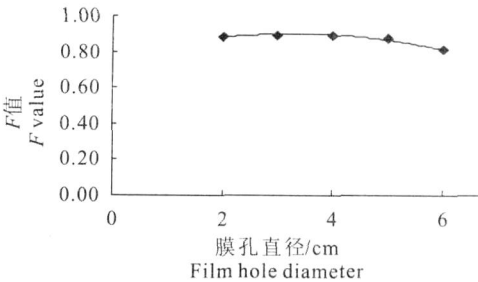


图 4 参数 F 与膜孔直径的关系

Fig. 4 Relationship between parameter F and film hole diameter

减小，这种趋势随垂直一维入渗量的增大而表现得愈加明显。

经分析研究，不同膜孔直径的单位面积膜孔侧渗量与单位面积垂直一维入渗量之间符合幂函数关系，有：

$$Q_{侧渗} = GQ_{垂直}^H。$$
 (8)

式中： $Q_{侧渗}$ 为单位面积侧渗量，cm； $Q_{垂直}$ 为单位面积垂直一维入渗量； G, H 均为拟合参数。

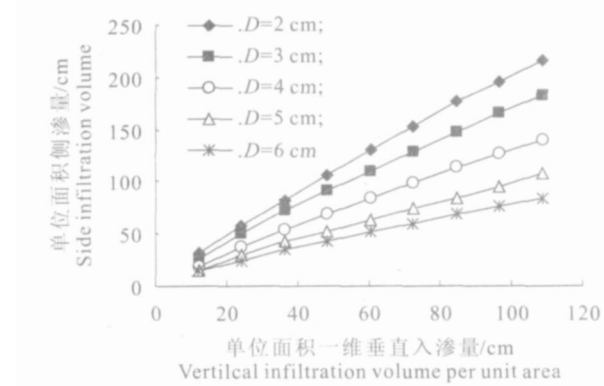


图 5 膜孔单点源入渗单位面积侧渗量和一维垂直入渗量的关系

Fig.5 Relationship between side infiltration volume per unit area under film hole single point infiltration and one-dimensional vertical infiltration volume

利用式 (5) 对图 5 资料进行拟合,其结果见表 2。参数 G 、 H 随膜孔直径的变化关系如图 6 和图 7

所示。经分析, G 、 H 与膜孔直径 D 之间均为二次函数关系, 设:

$$G = eD^2 + fD + g, \tag{9}$$

$$H = e'D^2 + f'D + g'. \tag{10}$$

式中: e 、 f 、 g 、 e' 、 f' 、 g' 为拟合参数; D 为膜孔直径, cm。

对图 6、图 7 资料进行拟合, 可知:

$$G = 0.1179D^2 - 1.3206D + 5.3179, \tag{11}$$
$$R^2 = 0.9887;$$

$$H = -0.0238D^2 + 0.1579D + 1.4749, \tag{12}$$
$$R^2 = 0.9795.$$

则初始重量含水率为 3.20 %、容重 1.52 g/cm³ 的陕北粗沙土, 膜孔点源入渗的单位面积侧渗量与单位面积垂直一维入渗量的关系为:

$$Q_{\text{侧渗}} = (0.1179D^2 - 1.3206D + 5.3179) Q_{\text{垂直}}^{(-0.0238D^2 + 0.1579D + 1.4749)} \tag{13}$$

表 2 点源入渗单位面积侧渗量与垂直一维入渗量关系的拟合参数

Table 2 Fitting parameter of side infiltration volume per unit area under point source infiltration and one-dimensional vertical infiltration volume

拟合参数 Fitting parameter	D / cm				
	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
G	4.098 2	3.336 2	2.576 3	2.098 1	2.191 1
H	0.882 8	0.894 2	0.891 8	0.873	0.810 6
R ²	0.999 8	0.998 9	0.999 3	0.998 9	0.998 9

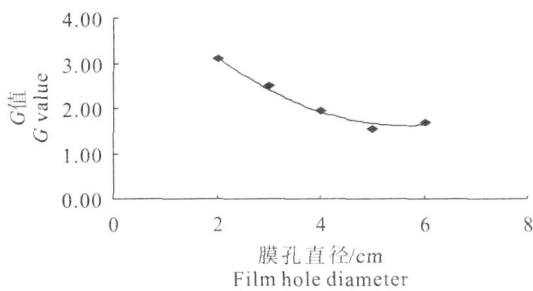


图 6 参数 G 与膜孔直径的关系

Fig.6 Relationship between parameter G and film hole diameter

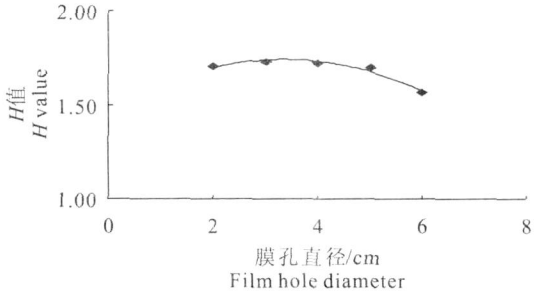


图 7 参数 H 与膜孔直径的关系

Fig.7 Relationship between parameter H and film hole diameter

4 膜孔灌点源入渗模型的推求

膜孔点源入渗水量包括垂直入渗量和侧渗量两部分, 即 $Q = Q_{\text{垂直}} + Q_{\text{侧渗}}$, 由此可以建立膜孔点源入渗模型。

模型 1 (基于侧渗量与入渗时间):

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 (Q_{\text{垂直}} + Q_{\text{侧渗}}) = \frac{\pi}{4} D^2 (At^B + Et^F)$$
$$= \frac{\pi}{4} D^2 [1.2391t^{0.9935} + (0.1423D^2 - 1.6433D +$$

$$6.8726)t^{(-0.0117D^2 + 0.0772D + 0.7727)}] \tag{14}$$

式中: Q 为膜孔单点源总入渗量, cm; 其他符号意义同上。

模型 2 (基于侧渗量与垂直入渗量):

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 (Q_{\text{垂直}} + Q_{\text{侧渗}}) = \frac{\pi}{4} D^2 (At^B + Gt^H)$$
$$= \frac{\pi}{4} D^2 [1.2391t^{0.9935} + (0.1179D^2 - 1.3206D + 5.3079) Q_{\text{垂直}}^{(-0.0238D^2 + 0.1579D + 1.4749)}] \tag{15}$$

式中符号意义同上。

以上两个膜孔点源入渗模型具有明确的物理意

义,且在应用时仅需知道垂直一维入渗参数和膜孔直径等,所需资料容易获得,因而应用方便。

5 膜孔灌点源入渗模型的验证与评价

5.1 模型验证

根据前面提出的 2 个模型,对直径为 3.5 cm 的

表 3 膜孔单点源入渗模型 1 计算入渗值与实测入渗值的比较 ($D = 3.5\text{ cm}$)

Table 3 Comparison of the infiltration volume calculated by model and the infiltration volume measured by experiment			
入渗时间/ min Infiltration time	计算入渗量/ mL Calculating infiltration volume	实测入渗量/ mL Factual infiltration volume	偏差/ % Error
10	256.43	269.04	4.68
20	461.79	479.86	3.77
30	653.69	672.22	2.76
40	837.72	856.00	2.14
50	1 016.16	1 031.35	1.47
60	1 190.44	1 201.01	0.88
70	1 361.81	1 365.61	0.32
80	1 529.11	1 527.23	0.12

表 4 膜孔单点源入渗模型 2 计算值与实测值的比较 ($D = 3.5\text{ cm}$)

Table 4 Comparison of the infiltration volume calculated by model and the infiltration volume measured by experiment			
入渗时间/ min Infiltration time	计算入渗量/ mL Calculating infiltration volume	实测入渗量/ mL Factual infiltration volume	偏差/ % Error
10	258.34	269.04	3.98
20	462.30	479.86	3.66
30	650.43	672.22	3.24
40	831.13	856.00	2.91
50	1 005.28	1 031.35	2.53
60	1 179.89	1 201.01	1.76
70	1 342.58	1 365.61	1.69
80	1 506.13	1 527.23	1.39

5.2 模型评价

以上两个模型是在一定的土壤质地、容重、初始含水率条件下,基于入渗量由垂直一维入渗量和侧渗量两部分组成而建立的。模型 1 中的侧渗量为入渗时间的函数,拟合参数为膜孔直径的函数;模型 2 中的侧渗量为垂直一维入渗量的函数,拟合参数为膜孔直径的函数。模型计算值与试验值的对比分析表明,试验条件下,两个模型的计算误差均小于 5 %。

6 结 论

- 1) 不同膜孔直径的单点源单位面积入渗侧渗量均随着入渗时间的延长而增大;相同的入渗时间,随着膜孔直径的增大,单位面积点源入渗侧渗量减小,这种趋势随入渗时间的延长愈加明显。
- 2) 对不同膜孔直径的点源入渗,单位面积垂直一维入渗量相同时,随着膜孔直径的增大,单位面积的侧渗量减小。
- 3) 本文建立的 2 个膜孔灌单点源入渗模型具有明确的物理意义,经验证该模型拟合结果与实测值

膜孔单点源总入渗量进行计算,并与实测值进行比较,结果见表 3 和表 4 中计算入渗量为计算侧渗量与实测垂直一维入渗量之和。由表 3 和表 4 可以看出,两个模型的计算值与实测值相对偏差均小于 5 %,计算精度均较高。

- 相差均小于 5 %。
- 4) 在本文研究的基础上,今后应开展膜孔灌土壤氮素运移特性试验研究。

[参考文献]

[1] 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(3):23-29.

[2] 缴锡云. 膜孔灌溉理论与技术要素的试验研究[D]. 陕西西安:西安理工大学水利水电学院,1999.

[3] 谭奇林. 充分供水条件下的点源入渗试验研究[D]. 陕西西安:西安理工大学水利水电学院,1998.

[4] 吴军虎. 膜孔灌溉入渗特性与技术要素试验研究[D]. 陕西西安:西安理工大学水利水电学院,2000.

[5] 聂新山,韩 俊. 膜孔渗吸速度初探[J]. 水土保持研究,1996,3(3):18-22.

[6] 门 旗,米孟恩,陈祖森,等. 膜孔沟灌水力特性和基本参数的研究[J]. 节水灌溉,1997,16(4):8-22.

[7] 费良军,谭奇林,王文焰,等. 充分供水条件下多因子点源入渗模型研究[J]. 西安理工大学学报,2000,18(1):19-22.

[8] 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,2001,12(3):307-311.