

肥液浓度对膜孔单向交汇入渗水分运移特性的影响

董玉云¹, 费良军², 任建民¹

(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: 通过清水与不同肥液浓度的膜孔单向交汇室内入渗试验, 研究了不同浓度的膜孔肥液单向交汇入渗量、湿润锋运移距离及土壤含水量分布。提出了土壤入渗量和湿润锋运移距离随肥液浓度的增加而增大的规律; 建立了不同肥液浓度膜孔入渗量和湿润锋运移距离经验模型。经实测资料验证, 模型精度较高; 肥液浓度越大, 相同时间的湿润锋运移距离越大, 相同深度处的土壤含水量也越大。

关键词: 膜孔灌; 单向交汇入渗; 肥液浓度; 水分运移特性

中图分类号: S152.7⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)06-0083-06

土壤水、氮运移分布特性与灌溉入渗方式密切相关, 传统地面灌溉技术存在灌溉水深层渗漏严重、肥料淋失量大、水肥利用率低及对地下水环境造成污染等问题^[1,2]。膜孔灌是一种节水型地面灌溉新技术, 它较传统地面灌具有节水、保肥、灌溉质量高和灌溉水利用率高等特点。目前, 国内对膜孔入渗土壤水分运移和分布规律的研究已有一定的进展, 王文焰、费良军、李发文等^[3~6]主要针对清水膜孔入渗问题开展了膜孔土壤水分运移特性、影响因素及数学模型等方面的试验研究工作, 直至目前尚未见到国外有关方面的研究报道。关于施肥条件下膜孔灌农田养分运移方面的研究目前国内仅有膜孔自由入渗的研究报道^[7~10]。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, 开展膜孔肥液交汇入渗下土壤水分和氮素运移特性研究具有重要的理论价值和生产实际意义。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

膜孔单向交汇肥液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 3 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 4.0 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以 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 cm²。

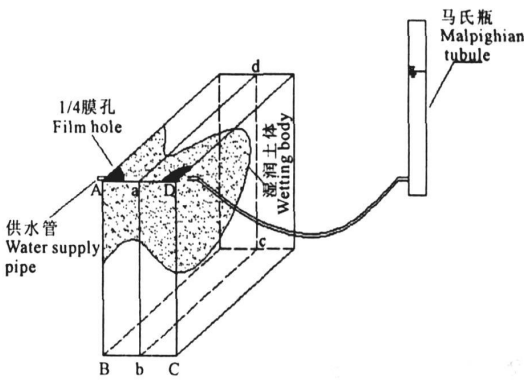


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

1.2 试验方法

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/cm³, 饱和重量含水率为 36.2%, 初始硝态氮含量为 6.5 mg/kg, 试验分清水和浓度分别为 300 mg/L、600 mg/L 和 1 000 mg/L 的肥液入渗 4 个处理, 3 次重复, 肥液采用 NH₄NO₃ 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。

收稿日期: 2009-03-26
基金项目: 兰州交通大学“青蓝”人才工程基金(QL-08-20A); 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, 副教授, 博士, 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。

试验连续灌水时间为 90 min,取湿润体表层向下按 2.5 cm×2.5 cm×2.5 cm 的立方体网格取样。各点取得的土样中的 5 g 用以测定硝态氮浓度,其余土样用烘干法测定土壤含水量。土样以 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液为浸提液,以土水质量比 1:10 浸提,经过滤、活性炭吸附等处理制成待测液,采用 HACH 公司生产的 DR/4000 型紫外分光光度计测定硝态氮浓度。

表 1 供试土样的颗粒级配组成

Table 1 Grain composition of experimental soil

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

2 结果与分析

2.1 肥液浓度对入渗能力的影响

图 2 表示清水和浓度分别为 300 mg/L、600 mg/L 和 1 000 mg/L 的肥液入渗 90 min 的膜孔单向交汇累积入渗量随时间的变化曲线。对比不同肥液浓度的膜孔入渗,在入渗时间相同时,累积入渗量随肥液浓度的增大而增大,说明在一定浓度范围内,肥液浓度影响土壤的入渗能力,在其它条件相同时,入渗量随肥液浓度的增加而增大。

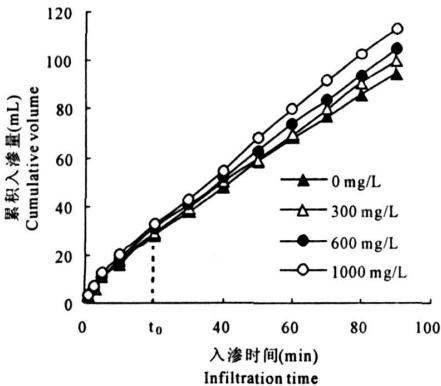


图 2 肥液浓度对累积入渗量的影响

Fig.2 Influence of fertilizer solution concentration to the cumulative infiltration

为便于对不同肥液浓度的膜孔单向交汇入渗能力进行对比,定义增渗率 η 为肥液单向交汇入渗量相对同时段清水入渗增加的百分数,设

$$\eta = \frac{Z_c - Z_0}{Z_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中, η 为不同肥液浓度入渗的增渗率; Z_c 、 Z_0 分别为相同条件和相同时段的肥液入渗量与清水入渗量 (mL)。

图 2 中,供水时间为 90 min 时清水与肥液浓度为 300 mg/L、600 mg/L 和 1 000 mg/L 的膜孔单向交汇累积入渗量分别为 93.82 mL、98.725 mL、104.35 mL 和 114.37 mL,肥液入渗量均大于清水入渗量,相应的增渗率分别为 5.23%、10.09% 和 21.90%。表明肥液浓度越大,累积入渗量越大,增渗效果越明显。

2.2 不同浓度的肥液入渗量计算模型

经研究,不同浓度的膜孔肥液单向交汇入渗均符合 Kostiakov 入渗模型,设

$$Z_c = k_c t^{\alpha_c} \tag{2}$$

式中, Z_c 意义同前; k_c 为入渗系数; α_c 为入渗指数。
用式 (2) 对图 2 实测资料进行拟合,结果见表 2。

表 2 膜孔肥液入渗方程

Table 2 Fertilizer solution infiltration equations under film hole

浓度 (mg/L) Concentration	拟合方程 Simulated equation	决定系数 R^2 Decision coefficient
0	$Z_c = 2.9920 t^{0.7576}$	0.9973
300	$Z_c = 3.0825 t^{0.7602}$	0.9974
600	$Z_c = 3.1825 t^{0.7650}$	0.9979
1000	$Z_c = 3.4196 t^{0.7688}$	0.9977

取显著性水平为 0.01,对含有 12 个数据点的系列,其临界相关系数 r_a 为 0.6614,决定系数 R^2 均大于临界相关系数,说明采用式 (2) 能较好地描述不同肥液浓度膜孔单向交汇累积入渗量与入渗时间之间的关系。

经分析,不同浓度的肥液单向交汇入渗参数与肥液浓度之间符合线性函数关系。

设 $k_c = \mu_c + k_0$ (3)

$$\alpha_c = \nu_c + \alpha_0 \tag{4}$$

式中, k_0 、 α_0 分别为清水入渗的系数和指数, μ 、 ν 为拟合系数。

对表 2 中的数据进行回归分析得:

$$k_c = 0.0426 c + 2.9682 \quad R^2 = 0.9733 \tag{5}$$

$$\alpha_c = 0.0011 c + 0.7573 \quad R^2 = 0.9949 \tag{6}$$

式中, c 的单位为 100 mg/L。

将式(5)、式(6) 代入式(2) 得到肥液入渗的模型:

$$Z_c = (0.0426c + 2.9682)t^{(0.0011c+0.7573)} \tag{7}$$

采用该模型可以推求不同肥液浓度的膜孔单向

交汇累积入渗量。
为验证模型的拟合精度, 采用该模型拟合浓度为 600 mg/L 的膜孔肥液单向交汇累积入渗量, 结果见表 3。

表 3 模型的拟合值与实测值对照表
Table 3 Comparison of simulated and measured values by the model

入渗量 Cumulative volume	时间 Time(min)							
	5	20	30	40	50	60	70	90
计算值 Calculated value(mL)	11.02	31.79	43.33	53.97	64.00	73.57	82.76	100.28
实测值 Measured value(mL)	11.30	30.75	40.85	51.64	62.70	73.85	83.00	104.30
相对偏差 Relative difference(%)	-2.48	3.38	6.07	4.34	2.07	-0.38	-0.29	-3.85

由表 3 可知, 模型拟合值与实测值相对偏差较小, 说明采用该模型预测膜孔肥液单向交汇累积入渗量是有效的。

2.3 肥液浓度对湿润锋运移特性的影响

2.3.1 肥液浓度对膜孔中心湿润锋运移特性的影响 图 3 表示清水与浓度分别为 300 mg/L、600 mg/L 和 1 000 mg/L 的肥液供水 90 min 时膜孔中心垂直湿润锋随时间的变化曲线。可以看出, 不同肥液浓度的膜孔入渗湿润锋运移过程均符合膜孔入渗的一般规律; 在入渗时间相同时, 湿润锋运移距离随肥液浓度的增大而增大。供水入渗 90 min 时, 清水与浓度为 300 mg/L、600 mg/L 和 1 000 mg/L 的肥液入渗膜孔中心处湿润锋运移距离分别为 7.5 cm、7.8 cm、8.1 cm 和 8.6 cm, 肥液入渗湿润深度均大于清水入渗, 并且肥液浓度越大, 湿润深度也越大。

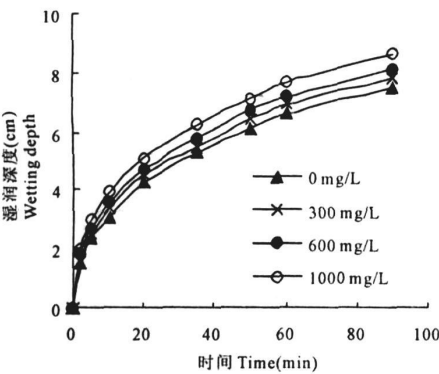


图 3 垂直湿润锋运移曲线

Fig.3 Vertical wetting front transport curve

经分析, 不同肥液浓度的膜孔入渗膜孔中心处湿润锋运移距离与入渗时间符合幂函数关系,

设
$$R_Z = A_c t^{B_c} \tag{8}$$

式中, R_Z 为膜孔中心垂直湿润锋运移距离(cm); A_c 、 B_c 为肥液入渗湿润锋运移参数; c 为肥液浓度, 以

100 mg/L 为单位; t 为入渗时间(min)。
利用式(8)对图 3 实测资料拟合的结果见表 4。

表 4 膜孔中心垂直湿润锋运移曲线方程

Table 4 Vertical wetting front transport curve equations of film hole center

肥液浓度(mg/L) Concentration	拟合方程 Simulated equation	决定系数 R^2 Decision coefficient
0	$R_Z=1.1732 t^{0.4214}$	0.9970
300	$R_Z=1.2595 t^{0.4148}$	0.9968
600	$R_Z=1.4105 t^{0.3966}$	0.9983
1000	$R_Z=1.5927 t^{0.3824}$	0.9977

取显著性水平为 0.01, 对含有 9 个数据点的系列, 临界相关系数 r_α 为 0.7348, 决定系数 R^2 均大于临界相关系数, 说明式(8)是计算膜孔肥液单向交汇入渗膜孔中心处垂直湿润锋运移距离的有效模型。

经分析, 膜孔肥液单向交汇入渗湿润锋的运移参数 A_c 、 B_c 与肥液浓度之间符合线性函数关系。

设
$$A_c = ac + A_0 \tag{9}$$

$$B_c = bc + B_0 \tag{10}$$

式中, A_0 、 B_0 分别为清水膜孔单向交汇入渗湿润锋运移的系数和指数; a 、 b 为拟合系数; c 为肥液浓度, 以 100 mg/L 为单位。

则
$$R_Z = (ac + A_0)t^{(bc+B_0)} \tag{11}$$

用式(11) 对表 4 的数据进行拟合, 得试验条件下膜孔肥液单向交汇入渗膜孔中心垂向的湿润锋运移模型:

$$R_Z = (0.0429c + 1.1553)t^{(-0.0041c+0.4233)} \tag{12}$$

该模型建立了不同肥液浓度膜孔单向交汇入渗湿润锋运移参数与肥液浓度的关系。为验证模型的拟合精度, 采用该模型拟合浓度为 600 mg/L 的肥液入渗湿润锋运移距离, 结果见表 5。

表 5 模型的拟合值与实测值对比表

Table 5 Comparison of simulated and measured values by the model

运移距离 Transport distance	时间 Time(min)							
	2	5	10	20	35	50	60	90
计算值 Calculated value(cm)	1.86	2.68	3.54	4.66	5.83	6.72	7.23	8.49
实测值 Measured value(cm)	1.80	2.70	3.60	4.70	5.80	6.70	7.20	8.10
相对偏差 Relative difference(%)	3.33	-0.74	-1.67	-0.85	0.52	0.30	0.42	4.81

由表 5 可知,模型拟合值与实测值相对最大误差为 4.81%,说明采用该模型可以有效地预测不同肥液浓度的膜孔单向交汇湿润锋运移距离。

2.3.2 肥液浓度对交汇中心湿润锋运移特性的影响 图 4 表示清水与浓度分别为 300 mg/L、600 mg/L和1 000 mg/L的肥液入渗 90 min 时交汇中心垂向湿润锋随时间的变化曲线。其交汇时间分别为 25 min、23 min、20 min 和 18 min。在供水 90 min 时,清水与浓度为 300 mg/L、600 mg/L和1 000 mg/L的肥液入渗交汇中心垂直湿润锋运移距离分别为5.3 cm、5.6 cm、6.1 cm 和 6.4 cm,其平均运移速率分别为0.0815 cm/min、0.0836 cm/min、0.0871 cm/min和 0.0889 cm/min,肥液入渗湿润深度均大于清水入渗,并且肥液浓度越大,发生交汇的时间越早,湿润深度也越大。

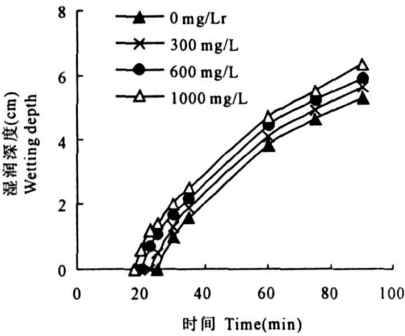


图 4 交汇中心垂直湿润锋运移曲线

Fig.4 Vertical wetting front transport curve of interference center

经分析,不同肥液浓度的膜孔入渗交汇中心垂向湿润锋运移距离与入渗时间之间符合幂函数关系,设

$$R_Z = M_c(t - \tau)^{N_c} \quad (t > \tau) \tag{13}$$

式中, R_Z 为膜孔交汇中心垂向湿润距离(cm); M_c 、 N_c 分别为肥液入渗湿润锋运移参数; c 为肥液浓度,以 100 mg/L 为单位; τ 为膜孔单向交汇时间(min); t 为膜孔入渗时间(min)。

利用式(13) 对图 4 实测资料进行拟合得:
 $C = 0 \text{ mg/L}; R_Z = 0.3018(t - 25)^{0.7009} \quad R^2 = 0.9973$

$$C = 300 \text{ mg/L}; R_Z = 0.3273(t - 23)^{0.6889} \quad R^2 = 0.9974$$
$$C = 600 \text{ mg/L}; R_Z = 0.3611(t - 20)^{0.6673} \quad R^2 = 0.9979$$
$$C = 1\,000 \text{ mg/L}; R_Z = 0.3943(t - 18)^{0.6557} \quad R^2 = 0.9977$$

经分析,膜孔肥液单向交汇入渗湿润锋的运移参数与肥液浓度之间符合线性函数关系。

设 $M_c = \alpha c + M_0$ (14)

$$N_c = \beta c + N_0 \tag{15}$$

式中: M_0 、 N_0 分别为清水膜孔单向交汇入渗交汇中心湿润锋运移的系数和指数; α 、 β 为拟合系数; c 为肥液浓度,以 100 mg/L 为单位。

则 $R_Z = (\alpha c + M_0)(t - \tau)^{(\beta c + N_0)}$ (16)

用式(16) 对图 4 资料拟合得膜孔肥液单向交汇入渗交汇中心垂直湿润锋运移模型:

$$R_Z = (0.0094c + 0.3014)(t - \tau)^{(-0.0047c + 0.7006)} \tag{17}$$

2.3.3 肥液浓度对膜孔中心水平湿润锋运移特性的影响 图 5 为不同浓度的膜孔肥液单向交汇入渗膜孔交汇方向水平湿润锋运移曲线。可以看出:在其它条件相同时,肥液浓度越大,达到交汇的时间越短,图 5 中清水和浓度分别为 300 mg/L、600 mg/L 和 1 000 mg/L 的肥液入渗 90 min 时交汇时间分别为 25、23、20 min 和 18 min。当发生交汇后,水平湿润锋运移距离不随入渗时间的延长而改变。

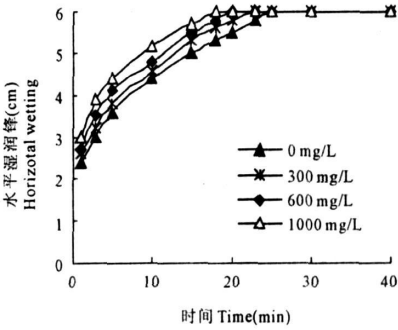


图 5 水平湿润锋运移曲线

Fig.4 Horizontal wetting front transport curve

经分析,膜孔肥液单向交汇入渗水平湿润锋运移距离与入渗时间之间的变化规律为:

$$R_x = (1 - \alpha) \times (D/2 + mt^n) + \alpha \times S_0 \tag{18}$$

式中: D 为膜孔直径(cm); t_0 为交汇时间; m 、 n 为拟合参数; S_0 为膜孔中心距的一半; 参数

$$\alpha = \begin{cases} 1 & t \geq t_0 \\ 0 & t < t_0 \end{cases}$$

用式(18) 对图 5 资料拟合得:

$$C = 0 \text{ mg/L: } R_x = (1 - \alpha)(2.0 + 0.4490t^{0.6966}) + 6.0\alpha \quad R^2 = 0.9896$$

$$C = 300 \text{ mg/L: } R_x = (1 - \alpha)(2.0 + 0.5899t^{0.6300}) + 6.0\alpha \quad R^2 = 0.9938$$

$$C = 600 \text{ mg/L: } R_x = (1 - \alpha)(2.0 + 0.7556t^{0.5719}) + 6.0\alpha \quad R^2 = 0.9888$$

$$C = 1000 \text{ mg/L: } R_x = (1 - \alpha)(2.0 + 0.9719t^{0.5077}) + 6.0\alpha \quad R^2 = 0.9863$$

经分析,膜孔肥液单向交汇入渗水平湿润锋运移参数 m 、 n 与肥液浓度 C 之间符合以下关系:

$$m = eC + f; n = pC + h$$

则
$$R_x = (1 - \alpha)[D/2 + (eC + f)t^{(pC + h)}] + 6.0\alpha \tag{19}$$

式中, e 、 f 、 p 、 h 为拟合参数。

对图 5 资料拟合得膜孔肥液单向交汇入渗交汇中心水平湿润锋运移模型:

$$R_x = (1 - \alpha)[D/2 + (0.0526C + 0.4416)t^{(-0.0188C + 0.6910)}] + 6.0\alpha \tag{20}$$

2.4 肥液浓度对膜孔入渗土壤含水量分布的影响

图 6、图 7 表示清水和浓度分别为 300 mg/L、600 mg/L 和 1 000 mg/L 的肥液入渗供水 90 min 时膜孔中心和交汇中心垂向土壤含水量的分布情况。

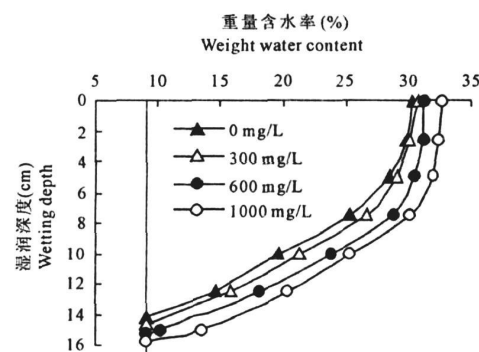


图 6 膜孔中心垂向土壤含水量分布
Fig. 6 Distribution of soil water content at the vertical of film hole center

可以看出,入渗时间相同时,不同肥液浓度的土壤含水量分布有所不同,膜孔中心处和交汇中心处

均为低浓度肥液入渗土壤含水量率分布曲线位于高浓度的肥液之上。肥液浓度越大,相同入渗时间的湿润深度越大,并且相同深度处的土壤含水量也越大。对比膜孔中心和交汇中心处的含水量,不同浓度的膜孔单向交汇入渗相同深度的膜孔中心处的土壤含水量率均大于交汇界面中心处的含水量,而交汇界面中心处在表层土壤 7.5 cm 以下土壤含水率的分布梯度比膜孔中心处的大。

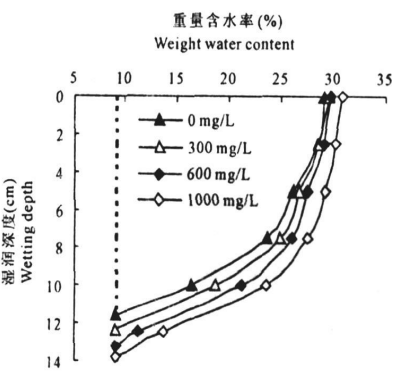


图 7 膜孔交汇中心垂向土壤含水量分布
Fig. 7 Distribution of soil water content at the vertical of interference center

3 结论与讨论

3.1 结 论

- 1) 水肥耦合有利于土壤水分的下渗,相同的入渗时间内土壤入渗量和湿润锋运移距离均随肥液浓度的增加而增大,与入渗时间之间符合幂函数关系。
- 2) 建立了不同肥液浓度膜孔单向交汇土壤入渗量和湿润锋运移模型,经实测资料验证,模型精度较高。
- 3) 肥液浓度越大,相同入渗时间的湿润深度也越大,湿润体相同深度处的土壤含水量也越大;不同浓度的膜孔单向交汇入渗相同深度的膜孔中心处的土壤含水量率均大于交汇界面中心处的含水量。

3.2 讨 论

本研究基于膜孔单点源肥液入渗的基础之上,所得肥液入渗量较清水入渗量增大的结果与点源入渗的结果相同,验证了文献[9]中肥液较清水入渗量增加的机理,并且入渗量随肥液浓度的增加而增大。在今后研究膜孔肥液单向交汇入渗时可以借鉴膜孔单点源肥液入渗的研究方法。

参 考 文 献:

[1] Flipse W J, Katr B G. Source of nitrate groundwater in a Sewered

housing development[M]. Central Long Island, New York; Ground-water, 1984, 22; 57—65.

[2] 魏新平. 灌溉对作物根区硝酸钾运移影响的研究[D]. 西安: 西安理工大学水利水电学院, 1999.

[3] 王文焰, 谭奇林, 缴锡云, 等. 膜孔灌溉点源入渗模型的建立与验证[J]. 水科学进展, 2001, (9); 300—306.

[4] 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.

[5] 李发文, 费良军. 膜孔灌单向交汇入渗数学模型研究[J]. 农业工程学报, 2003, (3); 68—71.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 董玉云, 费良军, 穆红文. 膜孔单点源肥液入渗运移特性研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(1); 70—73.

Influence of fertilizer solution concentration on water transport characteristics under film hole single—line interference infiltration

DONG Yu-yun¹, FEI Liang-jun², REN Jian-min¹

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Based on lab experiment under film hole single-line interference infiltration with different fertilizer solution concentration, cumulative infiltration volume, wetting front transport distance and the distribution of soil water content with different fertilizer solution concentration were studied. The laws of cumulative infiltration volume and transport distance of wetting front increased with the increase of solution concentration were presented, mathematical models for cumulative infiltration volume under film hole infiltration and wetting front transport distance were developed, the models were verified by measured data, wetting front transport distance in the same time and the soil water content at the same depth increased with the increase of solution concentration.

Keywords: film hole irrigation; single-line interference infiltration; fertilizer solution concentration; water transport characteristics