

膜孔单点源肥液入渗湿润体特性试验研究

费良军^{1,2}, 董玉云¹, 朱兴华¹

(1. 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 该文通过室内试验, 研究了单点源肥液入渗的湿润体特性。研究表明: 湿润锋的纵剖面形状曲线符合椭圆方程; 湿润锋运移距离随时间的变化符合幂函数方程; 建立了湿润体纵剖面动态变化的数学模型和膜孔肥液入渗累积入渗量的经验模型以及湿润体平均含水率随时间变化的关系。在此基础上, 研究了湿润体内土壤水分的分布特性。该研究为进一步进行膜孔灌溉技术研究奠定了基础。

关键词: 膜孔灌; 肥液入渗; 湿润体特性

中图分类号: S152.72

文献标识码: B

文章编号: 1002-6819(2006)12-0078-04

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.

Fei Liangjun, Dong Yuyun, Zhu Xinghua. Wetting front characteristics under film single hole point source infiltration of fertilizer solution [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12): 78-81. (in Chinese with English abstract)

0 引言

氮肥利用率低及对环境造成的严重污染与农田灌溉关系密切, 落后的灌水技术和超定额灌水, 不但造成大量水的深层渗漏, 且使农田养分大量流失, 污染地下水。其中硝态氮的淋失是农田氮素损失的主要途径, 同时也是引起地下水污染的一个重要原因^[1-3]。因此, 寻求一种合理的施肥灌溉方法, 对于提高氮肥利用率及保护环境具有非常重要的意义。

膜孔灌是充分供水条件下的空间三维入渗, 它不同于滴灌条件下的非充分供水点源入渗。关于膜孔灌水分入渗方面已有一定研究: 谭奇林、缴锡云等人对膜孔灌溉点源入渗数值模拟和灌水技术进行了初步研究^[4,5]; 吴军虎、费良军等人研究了膜孔入渗特性、膜孔灌溉特点和田面水流运动特性及灌水技术要素等^[6,7]; 费良军、李发文等人研究了膜孔单向和多向交汇入渗特性及其影响因素和数学模型^[8-10]。以上研究均是针对清水条件下膜孔入渗问题开展的, 国外鲜见有关方面的研究报道。目前关于施肥条件下膜孔灌农田养分运移方面的研究国内外尚未见报道。因此, 开展膜孔灌肥液入渗试验, 对于膜孔施肥灌溉技术要素研究具有十分重要的意义。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

膜孔入渗室内试验装置如图 1 所示。试验土箱采用 10 mm 厚有机玻璃板制作, 长×宽×高为 24 cm×20 cm×30 cm。为便于观测点源入渗湿润锋形状及其变化过程, 根据点源入渗湿润体的对称性, 点源采用 1/4 膜孔面积的方形水室置于土箱的一角, 膜孔直径为 6 cm。试验利用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, 在土箱上表面覆膜。

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, 饱和和质量含水率为 36.2%, 初始硝态氮含量为

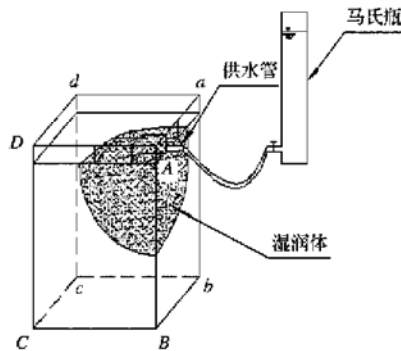


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

6.5 mg/kg, 试验分清水和浓度分别为 300、600、1000 mg/L 的肥液入渗 4 个处理, 3 次重复, 试验肥液采用 NH₄NO₃ 作为肥料。土料经风干、碾细、过筛(筛孔径为 2 mm), 设定初始质量含水率分别为 6%、10%、14%, 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。试验中发现不同浓度及初始质量含水率的肥液入渗规律相同, 因此本文以浓度 600 mg/L、初始质量含水率 10% (试验实测配土后的初始质量含水率为 10.21%) 的肥液入渗为例, 阐明膜孔单点源肥液入渗的湿润体特性。

试验连续灌水时间为 150 min, 供水结束时取土, 按 3 cm×3 cm×3 cm 的网格取样。各点取 5 g 土样测定硝态氮浓度, 剩余土样用烘干法测定土壤含水率。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 DR/4000 型紫外分光光度计测定硝态氮浓度。

2 结果与分析

2.1 湿润锋运移特性

图 2 为膜孔单点源入渗湿润锋随时间的变化过程线, 图中实线部分为清水入渗, 虚线部分为肥液入渗。由图 2 可知, 在入渗初期, 水平方向湿润锋的推进速度比垂直方向的快, 这是因为入渗开始时水平湿润半径由 0 瞬时增至膜孔半径, 湿润体近似于扁椭球体; 随着入渗时间的延长, 垂直湿润锋运移速率比水平湿润锋运移速率加快, 这是因为在水平向水分运动的作用力主要是基质势, 垂直方向水分运动的动力除基质势外, 还有重力势。试验发现, 清水入渗到 60 min 时垂直湿润锋运移距离超过水

收稿日期: 2005-12-19 修订日期: 2006-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(50679064, 50179030); 陕西高校省级重点实验室重点科研项目(03JS041); 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室基金项目

作者简介: 费良军(1963-), 男, 陕西蓝田人, 博士, 教授, 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。西安 西安理工大学水资源所 748 信箱, 710048。Email: feiliangjun@sohu.com

表 1 粉土颗粒组成

Table 1 Grain composition of mealy soil

颗粒粒径/mm	< 1.0	< 0.5	< 0.25	< 0.1	< 0.05	< 0.025	< 0.01	< 0.005	< 0.002	< 0.001
颗粒百分含量/%	99.60	99.20	98.87	98.60	89.15	56.58	28.02	11.34	2.88	0.90

平湿润锋的运移距离(水平为 8.8 cm,垂直为 9.0 cm),肥液入渗到 90 min 时垂直湿润锋超过水平湿润锋的运移距离(水平为 10.5 cm,垂直为 10.6 cm),供水入渗结束时两种处理的湿润体均为纵向大于横向的椭球体。经分析,膜孔点源入渗土壤湿润体中心纵剖面形状可用椭圆方程表示

$$\frac{x_f^2}{A^2} + \frac{z_f^2}{B^2} = 1 \quad (1)$$

式中 x_f, z_f ——湿润锋上任一点的坐标值, cm; A, B ——椭圆方程的长轴和短轴, 即湿润锋的运移距离, cm。

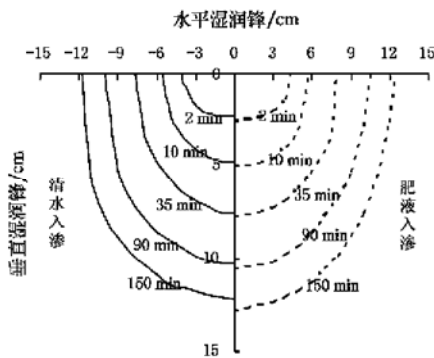


图 2 膜孔单点源入渗湿润锋运移曲线

Fig.2 Wetting front transport curves under film hole point source infiltration

图 3 为膜孔单点源清水和肥液入渗湿润锋运移距离随时间的变化曲线,湿润锋运移距离均随着时间的延长而增大,但湿润锋推进速度随入渗时间的延长而逐渐减小,且垂直湿润锋随着时间的延长运移速率比水平湿润锋快。

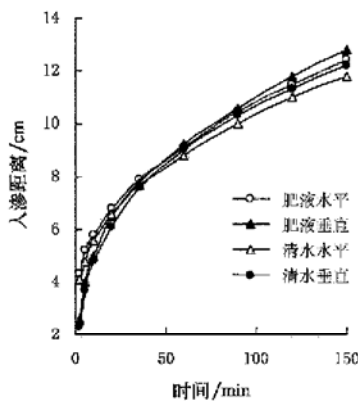


图 3 膜孔单点源入渗的水平 and 垂直湿润锋

Fig.3 Horizontal and vertical wetting front under film hole point source infiltration

经分析,膜孔单点源入渗水平和垂直湿润锋运移距离与入渗时间之间均符合幂函数关系,对图 3 实测资料拟合得

清水入渗 $A = 3.2561t^{0.2487} \quad R^2 = 0.9915 \quad (2)$

$B = 1.9376t^{0.3739} \quad R^2 = 0.9937 \quad (3)$

肥液入渗 $A = 3.4358t^{0.2457} \quad R^2 = 0.9869 \quad (4)$

$B = 2.1563t^{0.3574} \quad R^2 = 0.9966 \quad (5)$

式中 A, B ——水平和垂直湿润锋运移距离, cm; R^2 ——相关系数。

从式(2)~式(5)可以看出,肥液点源入渗的拟合系数较清水的大,而指数较清水的稍小。

试验条件下,膜孔入渗湿润体中心处纵剖面随时间的变化方程为

清水入渗 $\frac{x_f^2}{(3.2561t^{0.2487})^2} + \frac{z_f^2}{(1.9376t^{0.3739})^2} = 1 \quad (6)$

肥液入渗 $\frac{x_f^2}{(3.4358t^{0.2457})^2} + \frac{z_f^2}{(2.1563t^{0.3574})^2} = 1 \quad (7)$

由式(6)、式(7)即可算出膜孔入渗某一时刻的湿润锋曲线。

2.2 膜孔肥液入渗累积入渗量数学模型

图 4 为膜孔入渗的累积入渗量曲线。由图 4 可知,入渗时间相同时,肥液入渗的累积入渗量大于清水入渗的累积入渗量,关于肥液较清水入渗量增加的机理在文献[11]中已有分析。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,本文对单点源膜孔肥液入渗采用 Kostiakov 入渗模型对图 4 中肥液入渗的实测资料进行拟合,结果为

清水入渗 $I = 3.2563t^{0.8246} \quad R^2 = 0.9997 \quad (8)$

肥液入渗 $I = 4.1123t^{0.8013} \quad R^2 = 0.9977 \quad (9)$

可以看出,肥液入渗模型的系数比清水的大,而指数略有减小。

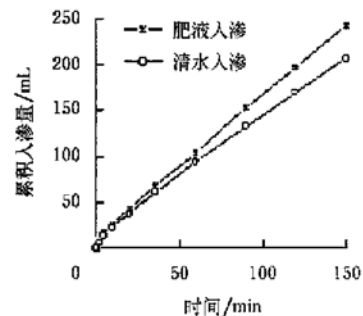


图 4 肥液与清水入渗累积入渗量

Fig.4 Cumulative infiltration amount under fertilizer solution and demineralized water infiltration

2.3 湿润体平均体积含水率变化特性

膜孔单点源入渗湿润土体为半椭球体,其体积为

$$V = 2\pi r^2 h / 3 \quad (10)$$

式中 r ——水平方向湿润距离; h ——垂直方向湿润距离。

湿润体平均含水率增量为某一时刻的累积入渗量与相应的湿润体体积的比值。

湿润体平均含水率增量与时间的关系如图 5 所示。可以看出,肥液入渗湿润体的土壤含水率增量较清水的大,随着入渗时间的延长,入渗量增加,湿润体增大,湿润体的平均体积含水率逐渐减小。由式(10)得

$$\Delta\theta = \frac{I}{V} = \frac{Kt^a}{2/3\pi(at^b)^2(ct^d)} \quad (11)$$

式中 $\Delta\theta$ ——湿润体平均含水率增量; I ——累积入渗量; V ——湿润体的体积; a, b, c, d ——湿润锋运移距离的拟合参数。

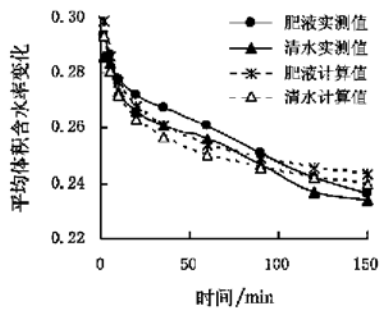


图5 膜孔入渗土壤平均含水率变化

Fig. 5 Changes of average soil water content under film hole infiltration

因本试验所用为 1/4 膜孔, 所以湿润体为 1/4 半椭球体, 将

实测资料代入式(11), 可得某一时刻膜孔入渗湿润体平均含水率增量的计算模型为

$$\Delta\theta = \frac{I}{V} = \frac{3.2563t^{0.8246}}{2/3\pi(3.2561t^{0.2487})^2(1.9376t^{0.3739})/4} = 0.3029t^{-0.0467} \quad (12)$$

$$\Delta\theta = \frac{I}{V} = \frac{4.1123t^{0.8013}}{2/3\pi(3.4358t^{0.2457})^2(2.1563t^{0.3574})/4} = 0.3087t^{-0.0475} \quad (13)$$

湿润体内的平均体积含水率为

$$\theta_a = \Delta\theta + \theta_0 \quad (14)$$

式中 θ_a ——湿润体平均体积含水率; θ_0 ——初始体积含水率。

为验证模型的精度, 采用该模型计算清水和肥液入渗的湿润体平均体积含水率的计算值与实测值的相对误差结果见表2。

表2 平均体积含水率计算值与实测值的误差

Table 2 Error of calculated and measured values of average soil water content

时间/min	0	2	5	10	20	35	60	90	120	150
清水入渗/%	0	2.55	-0.88	-0.33	-1.13	-1.54	-2.38	-0.61	2.11	2.52
肥液入渗/%	0	1.84	-0.21	-0.43	-1.62	-2.43	-2.64	-0.64	1.57	2.92

由表2可知, 肥液入渗的最大误差为2.92%, 清水入渗的最大误差为2.55%, 说明模型的精度高。

2.4 膜孔入渗湿润体土壤含水率的分布特性

图6为清水和肥液入渗供水结束时湿润体土壤含水率等值线图。供水结束时, 两种处理的入渗均是膜孔中心处的含水率最大, 湿润体含水率自膜孔中心由近到远的位置上, 含水率由大到小变化, 湿润锋附近的含水率变化梯度最大; 入渗时间相同时, 膜孔肥液入渗的湿润体土壤含水率分布等值线值大于清水入渗的含水率分布等值线值, 这是因为入渗时间相同时, 肥液入渗的累积入渗量比清水入渗的大, 其平均体积含水率增量也比清水的大。

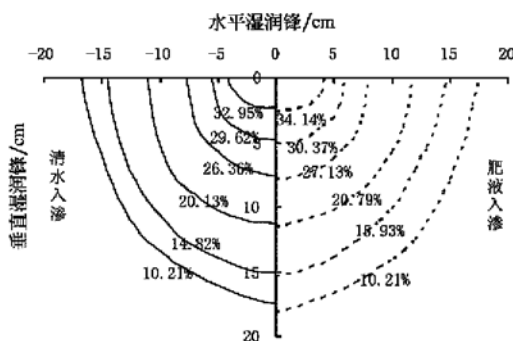


图6 清水与肥液入渗含水率等值线图

Fig. 6 Contour map of soil water content under fertilizer solution and demineralized water infiltration

3 结论

1) 膜孔肥液入渗的湿润锋运移距离与入渗时间之间为幂函数关系, 且入渗基本稳定后垂直的湿润锋运移速率大于水平的

运移速率。

2) 水肥耦合利于土壤水分的下渗, 相同入渗时间内肥液比清水的累积入渗量增加, 同一位置处的湿润体剖面含水率肥液入渗比清水入渗的大。

3) 建立了湿润体平均含水率增量与入渗时间的理论模型, 经实测资料验证, 模型精度较高。

[参考文献]

- [1] 张国梁, 章申. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998, (6): 291-297.
- [2] 吕殿青, 杨进荣, 马林英. 灌溉对土壤硝态氮淋吸效应影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, (4): 307-315.
- [3] Randall G W, Iragavarapu T K. Impact of long-term tillage systems for continuous corn on nitrate leaching to tile drainage[J]. J Environ Qual, 1995, 24: 360-366.
- [4] 谭奇林. 充分供水条件下的点源入渗实验研究[D]. 西安: 西安理工大学水利水电学院, 1998.
- [5] 缴锡云. 膜孔灌溉理论及实用技术初步研究[D]. 西安: 西安理工大学水利水电学院, 1999.
- [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.
- [7] 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, (4): 105-109.
- [8] 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.
- [9] 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, 19(3): 68-71.
- [10] 董玉云, 费良军. 膜孔灌充分供水点源入渗研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 200-203.
- [11] 董玉云, 费良军, 程东娟. 肥液浓度对膜孔入渗水分运移特性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2006, 29(3): 95-99.

Wetting front characteristics under film single hole point source infiltration of fertilizer solution

Fei Liangjun^{1,2}, Dong Yuyun¹, Zhu Xinghua¹

(1. *Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;*

2. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semi-arid Area,*

Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: Based on the laboratory experiments, the wetting front characteristics under film hole single point source infiltration of fertilizer solution were studied. Results show that the vertical profile curve of wetting front follows elliptical equation. The transport distance of wetting front with time follows the exponential function equation. Mathematical models for the dynamic movement of wetting front vertical profile and exponential model for cumulative infiltration were developed. The relationships between the change of average soil water content of wetting front and time were established. Moreover, the distribution characteristics of soil water were studied. The study supplies scientific foundation for further study of film hole irrigation.

Key words: film hole irrigation; fertilizer solution infiltration; characteristics of wetting front