

膜孔直径对浑水膜孔灌土壤水氮运移特性的影响

刘利华, 费良军, 陈琳, 白瑞

(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 通过对西安粉壤土进行4种膜孔直径(6, 8, 10, 12 cm)的浑水膜孔肥液自由入渗室内试验, 观测并分析了湿润锋运移距离、累积入渗量、湿润体内水分分布以及 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 运移特性的变化规律。结果表明: 膜孔直径对浑水膜孔灌土壤水氮运移特性具有较为显著的影响。不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗累积入渗量符合 Philip 入渗模型; 湿润锋运移距离与入渗时间呈极显著的幂函数关系; 在相同的入渗时间内, 膜孔直径越大, 湿润锋运移距离越大, 单位膜孔面积累积入渗量越小, 同一位置处土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量越大。入渗400 min内, 在膜孔中心附近区域 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量较高, 湿润体内土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要集中在距膜孔中心15 cm范围内, 而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要集中在距膜孔中心8 cm范围内。

关键词: 膜孔直径; 浑水膜孔灌; 肥液入渗; 水氮运移

中图分类号: S275.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0126-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.020

Effect of Film Hole Diameter on Transport Characteristics of Water and Nitrogen in Soil Under Film Hole Irrigation with Muddy Water

LIU Lihua, FEI Liangjun, CHEN Lin, BAI Rui

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: The experiments of fertilizer infiltration through muddy water film hole with four diameters (6, 8, 10 and 12 cm) were carried out in lab using Xi'an silty loam soil. Migration distance of the wetting front, cumulative infiltration, soil water distribution in the wetted body and transport characteristics of and were observed and analyzed. The results showed that: The film hole diameter had a significant effect on transport characteristics of water and nitrogen under the muddy water film hole irrigation. The cumulative infiltration amount of fertilizer through muddy water film hole with different diameters conformed to Philip infiltration model. There was a significant power function relationship between migration distance of the wetting front and infiltration duration. Within the same infiltration time, cumulative infiltration volume of per unit area gradually decreased with the increasing of film hole diameter, while migration distance of the wetting front and contents of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the same position increased with the increasing of film hole diameter. Content $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ were both higher in the center of the film hole within 400 minutes of infiltration. The soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in the wetted body was mainly distributed in the range of 15 cm from the center of the film hole, and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the wetted body was mainly distributed in the range of 8 cm from the center of the film hole.

Keywords: film hole diameter; film hole irrigation with muddy water; fertilizer infiltration; water and nitrogen transport

膜孔灌溉是利用地膜输水并通过作物孔和专用灌水孔进行渗水的一种新型灌溉技术, 较传统地面灌具有节水、保肥、灌水质量及灌水利用率高等优点, 对于地面灌占总灌溉面积95%以上的我国, 膜孔灌溉作为地面灌的一种节水新技术将具有更加广阔的应用前景^[1]。结合我国黄河流域灌区农田施肥和浑水

灌溉实际, 研究浑水膜孔灌肥液入渗农田土壤氮素运移转化特性不仅对缓解我国北方地区水资源紧缺、扩灌增产、提高施肥利用率和灌溉质量等方面具有十分重要的现实意义, 而且在浑水膜孔灌施肥农田土壤点源入渗水氮运移转化、田间水氮分布特性具有十分重要的理论价值和实际生产意义^[2-4]。

关于浑水膜孔灌方面的研究,国内外诸多学者已做过大量的研究^[5-8]。国外针对大池塘渗漏问题,重点研究了浑水泥沙沉积中的泥沙颗粒运动状况对渗流的影响特性^[9];相对传统灌溉,膜孔灌能节水 37%~45%,可提高向日葵产量 23%~30%^[10]。国内学者分别从泥沙粒度组成^[11-12]、土壤初始含水率^[13]、土壤体积质量^[14-15]、肥液浓度^[16-17]以及土壤质地^[18]等方面开展了室内外浑水膜孔灌入渗试验,探究了浑水膜孔灌水分入渗特性及灌溉技术要素,认为这些因素对浑水膜孔灌自由入渗能力均有显著影响。迄今为止,尚未见到浑水膜孔肥液入渗条件下关于膜孔直径对土壤水氮运移分布特性的相关研究报道,而膜孔直径决定着膜孔灌的入渗界面,是影响膜孔入渗的关键因素。因此,本文通过不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗试验,重点研究膜孔直径对湿润锋运移距离、累积入渗量、湿润体内水分分布以及 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 运移的影响,以期为浑水膜孔灌肥液入渗的理论发展和推广应用提供一定的科学参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

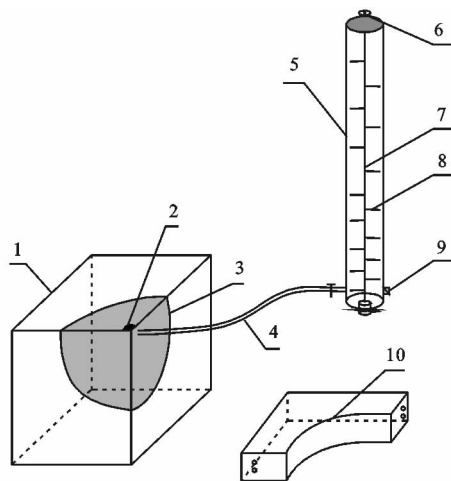
供试土壤取自西安北郊农田,取样时间为 2016 年 9 月,取样时将采样点处表层杂物去除后在 0—30 cm 深度范围内进行取样,取样后将供试土壤不同取样点的样品充分混合并带回实验室经自然风干、研磨后过 2 mm 土筛。采用激光粒度分析仪(Mastersizer-2000 型,马尔文仪器有限公司,英国)对土壤进行粒径分析,粒径为 $0 < d \leq 0.002$, $0.002 < d \leq 0.02$, $0.02 < d \leq 0.2$ mm 的颗粒分别占 9.78%, 56.59%, 33.63%(体积分数),根据国际制土壤质地分类标准,供试土壤为粉壤土。该土的饱和含水率约为 38.0%,物理性黏粒含量 $d_{0.01}$ 为 40.75%。将泾惠渠渠道泥沙取样风干后过 1 mm 土筛后按质量比配置含沙率为 2% 的浑水。采用硝酸铵钙作肥料,肥液浓度为 600 mg/L,供试土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 本底值为 6.25 mg/kg, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 本底值为 15 mg/kg。在其他条件一定的情况下,按照膜孔直径 D 分别为 6, 8, 10, 12 cm 共 4 种处理进行浑水膜孔灌肥液入渗试验,每个处理 3 次重复。

1.2 试验装置与方法

为了研究膜孔直径对浑水膜孔灌肥液入渗土壤水氮运移特性的影响,于 2017 年 3 月 20 日至 5 月 10 日利用西安理工大学水资源研究所研制的膜孔灌入渗装置^[2],在室内进行不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗试验。试验装置示意图图 1。

试验前用烘干法测定土壤初始含水率,根据土壤初始含水率,按预定容重(1.30 g/cm^3)分层(每层 5

cm)夯入 20 mm 厚的用有机玻璃制成的长×宽×高为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$ 的土箱中,层间打毛,装土高度为 40 cm。利用 1/4 膜孔面积的水室模拟膜孔,紧贴土面固定在试验土箱的一角,以便于观测湿润锋的运移过程,水室高度为 4 cm。利用马氏瓶向膜孔装置自动供水,以保证恒定的入渗水头(4 cm)。为尽可能减少浑水中泥沙的沉淀,对马氏瓶进行改造,加装了机械自动搅拌系统,通过电动机带动叶片的转动来搅动浑水。经计算,叶片体积仅为马氏瓶体积的 2%,可忽略不计。试验过程中为防止土壤水分蒸发,在土表面覆膜,按照先密后疏的时间间隔记录入渗时间和马氏瓶水位,同时观测入渗湿润体的变化过程。入渗结束后,分别在膜孔中心水平和垂直方向每间隔 5 cm 用土钻取土,每次取土厚度 5 cm,每份土样分 2 份,其中一份采用烘干法测定土壤质量含水率,另一份土样经自然风干后,采用美国 HACH 公司 DR/4000 型紫外分光光度计测定土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量。



注:1 为土箱;2 为膜孔;3 为湿润锋;4 为供水管;5 为马氏瓶;6 为电动机;7 为转轴;8 为叶片;9 为进气口;10 为 1/4 膜孔。

图 1 试验装置示意

2 结果与分析

2.1 膜孔直径对湿润锋运移特性的影响

由图 2 可知,不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗水平及垂直湿润锋运移距离均随着入渗时间的延长而增大,湿润锋推进的速度随着入渗时间的延长而逐渐减小。在开始供水瞬间膜孔装置立即被水充满,因此在入渗初期,水平湿润锋运移距离以很快速度增大至膜孔半径,明显大于垂直湿润锋运移距离。在相同的入渗时间内,膜孔直径越大,膜孔侧渗量在整个入渗量中所占比重越小;另外,由于在垂直方向入渗的水分除了受到基质势的作用外还受到重力势的作用,因而随着入渗时间的延长,不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗垂直湿润锋运移距离逐渐接近并在 180 min 前后大于水平湿润锋运移距离。

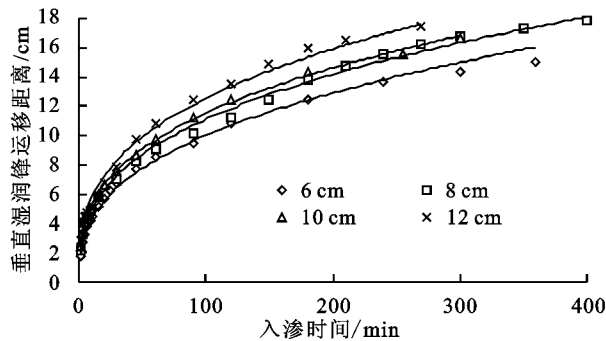
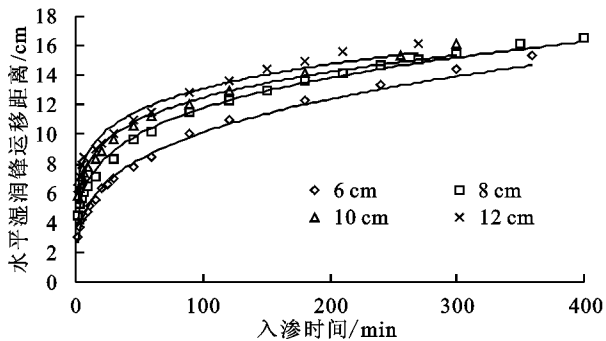


图 2 不同膜孔直径条件下各向湿润锋运移特性曲线

经研究分析,不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗水平及垂直湿润锋运移距离与入渗时间 t 呈极显著的幂函数关系,公式为:

$$F_x = at^b \quad (1)$$

$$F_z = ct^d \quad (2)$$

式中: F_x 、 F_z 分别为水平和垂直湿润锋运移距离 (cm); t 为入渗时间 (min); a 、 b 、 c 、 d 为拟合参数。

利用公式(1)、公式(2)对图 2 中的实测资料进行拟合(表 1)。

表 1 湿润锋运移距离与入渗时间关系的拟合参数

膜孔直径/cm	a	b	R^2	c	d	R^2
6	2.6712	0.2898	0.9904	1.8319	0.3686	0.9965
8	4.0266	0.2331	0.9924	2.2169	0.3519	0.9996
10	5.2476	0.1883	0.9870	2.3637	0.3418	0.9918
12	5.9386	0.1719	0.9816	2.6011	0.3439	0.9996

由表 1 可以看出,对于不同膜孔直径条件下的浑水膜孔灌肥液自由入渗水平及垂直湿润锋运移距离与入渗时间 t 的拟合结果,其决定系数 R^2 均大于 0.981 6,说明幂函数可以很好地描述不同膜孔直径下的湿润锋运移距离。此外,拟合参数 a 、 c 随着膜孔直径的逐渐增大而增大且变化较为明显,表明膜孔直径越大,湿润锋运移距离越大,而 b 、 d 逐渐减小,这是因为湿润锋运移速率随着膜孔直径的增大逐渐减小,与图 2 所示曲线吻合。通过分析发现拟合参数 a 、 b 、 c 、 d 与膜孔直径 D (cm)符合下列关系:

$$a = 0.3884D^{1.1721}, R^2 = 0.9820 \quad (3)$$

$$b = 1.1625D^{-0.7770}, R^2 = 0.9912 \quad (4)$$

$$c = 0.7746D^{0.4898}, R^2 = 0.9764 \quad (5)$$

$$d = 0.4430D^{-0.1070}, R^2 = 0.8721 \quad (6)$$

取显著性水平为 0.10,对于含有 4 个数据点的系列,其临界相关系数 $r_d = 0.9000$,而拟合参数 a 、 b 、 c 、 d 与膜孔直径 D 的相关系数 R 均大于 0.933 8,相关关系显著。以上结果说明,由模型(1)、模型(2)确定的不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗湿润锋运移距离与入渗时间 t 、膜孔直径 D 的关系与实测资料相符合,可靠性较高。

2.2 膜孔直径对浑水膜孔灌肥液入渗能力的影响

2.2.1 膜孔累积入渗量变化 由图 3 可知,4 种膜孔直径条件下,膜孔累积入渗量均随着入渗时间的延长而增大;同一入渗时刻,膜孔直径越大,累积入渗量越大。在其他条件一定的情况下,膜孔累积入渗量随膜孔直径的增大而增大,这是由于膜孔大小直接决定着入渗面积,膜孔直径越大,入渗面积越大,从而造成累积入渗量随着膜孔直径增大而增大的现象。

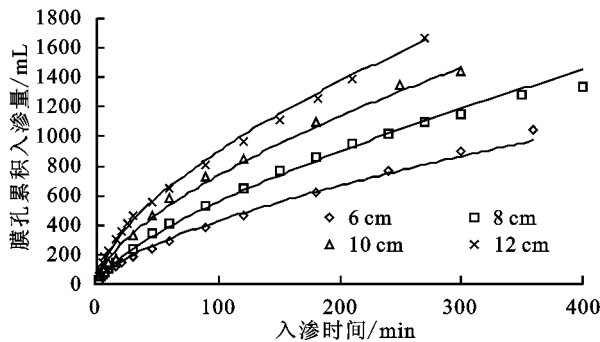


图 3 不同膜孔直径条件下累积入渗量曲线

2.2.2 单位膜孔面积累积入渗量 膜孔入渗为充分供水条件下的空间三维入渗,包括垂直入渗和侧渗两部分,垂直入渗量由膜孔面积决定;侧渗量通过膜孔周长与面积的比值决定,膜孔直径越大,该比值越小,即侧渗量所占比重越小。图 4 为不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗的单位膜孔面积累积入渗量与入渗时间的关系曲线。

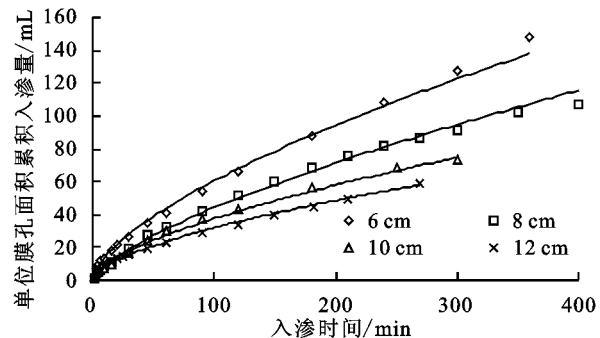


图 4 单位膜孔面积累积入渗量曲线

对图 4 中不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗的单位膜孔面积累积入渗量进行曲线拟合,拟合过程采用 Philip 入渗模型,公式为:

$$I(t)=St^{0.5}+At \tag{7}$$
式中: $I(t)$ 为单位膜孔面积累积入渗量(cm); S 为吸渗率($\text{cm}/\text{min}^{1/2}$); A 为稳定入渗率(cm/min)。利用式(7)对图 4 中的实测资料进行拟合(表 2)。

表 2 单位膜孔面积累积入渗量与入渗时间拟合参数			
膜孔直径/cm	S	A	R^2
6	3.6527	0.2300	0.9999
8	3.4234	0.1047	0.9949
10	2.8972	0.0871	0.9943
12	2.4137	0.0683	0.9988

取显著性水平为 0.01,则对于含有 14 个数据点的系列,其临界相关系数 $r_d=0.661\ 0$,由表 2 可知,不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗的单位膜孔面积累积入渗量 Philip 入渗模型拟合的相关系数均大于临界相关系数,说明利用 Philip 入渗模型确定的相关关系显著。同时还可以看出,随着膜孔直径的增大,吸渗率 S 和稳定入渗率 A 逐渐减小。因此,在相同的入渗时间内,其他条件一定的情况下,随着膜孔直径的增大,单位膜孔面积累积入渗量逐渐减小,并且入渗时间越长,减小趋势越明显。通过进一

步分析发现 Philip 模型拟合参数吸渗率 S 和稳定入渗率 A 与膜孔直径 D 呈显著幂函数关系,公式为:
$$S=10.7570D^{-0.5840},R^2=0.941\ 7 \tag{8}$$
$$A=3.7539D^{-1.6360},R^2=0.962\ 3 \tag{9}$$
将公式(8)、公式(9)代入公式(7),可以得到不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗单位膜孔面积累积入渗量模型为:

$$I(t,D)=10.7570D^{-0.5840}t^{0.5}+3.7539D^{-1.6360}t \tag{10}$$

对公式(10)进行求导可得不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗的入渗率模型,即:

$$i(t,D)=5.3785D^{-0.5840}t^{-0.5}+3.7539D^{-1.6360} \tag{11}$$

利用公式(10)计算膜孔直径为 10 cm 的浑水膜孔灌肥液自由入渗的入渗量,并与实测值进行对比(表 3)。由表 3 可知,不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗的入渗量实测值与模型拟合值的的相对误差均在 $\pm 10\%$ 范围内,说明利用公式(11)对西安粉壤土不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗的入渗量预测精度符合要求。

参数	入渗时间 t/min							
	30	45	60	90	120	180	250	300
实测值/cm	17.17	23.65	29.81	37.20	43.31	56.05	68.79	73.38
计算值/cm	17.96	22.71	26.92	34.41	41.13	53.23	66.02	74.59
相对误差/%	4.58	-3.98	-9.68	-7.50	-5.05	-5.02	-4.02	1.66

2.3 膜孔直径对湿润体内土壤含水率的影响

为了研究不同膜孔直径的浑水膜孔灌肥液自由入渗所得出的湿润体内水分分布以及变化规律,以膜孔中心为原点,规定水平向左和垂直向下为正方向,根据实测试验数据,采用 Surfer11 分别绘制供水结束时在不同膜孔直径条件下所得出的湿润体内土壤含水率分布等值线图。由图 5 可知,不同膜孔直径条件下的湿润体内水分分布等值线均呈半椭圆

形,土壤含水率分布等值线均随着到膜孔中心距离的由近到远而从疏到密分布,即土壤含水率随着到膜孔中心距离的增加由大到小变化,膜孔中心处因其直接与浑水肥液接触,土壤含水率最大,基本达到饱和含水率,此处土壤水分主要在膜孔水室水头的作用下向下入渗,可视为饱和区;而湿润锋附近区域的含水率迅速减小至初始含水率,在图中表现为含水率等值线越密集。

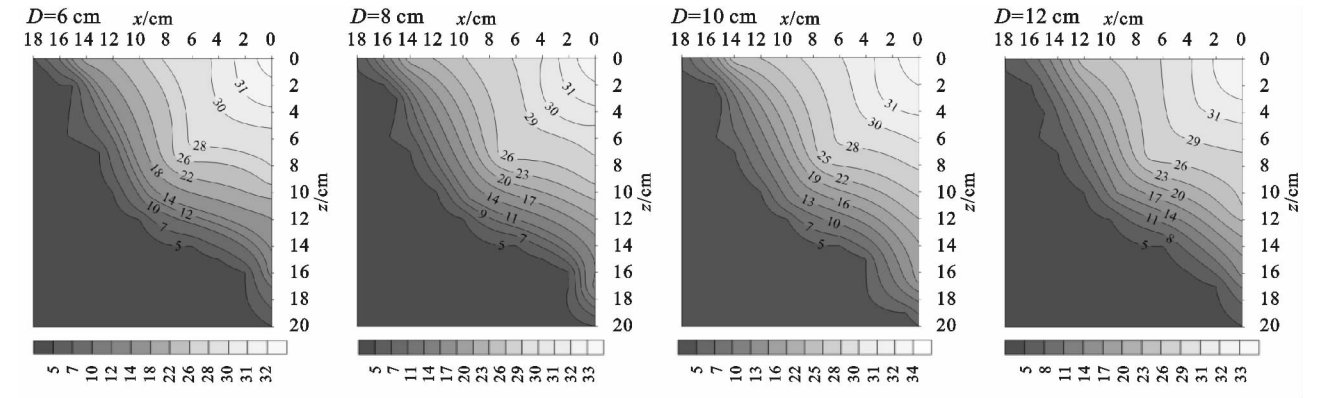


图 5 湿润体内土壤含水率分布等值线

此外,膜孔直径越大,湿润体范围越大,高含水率区域越大,湿润体内同一位置处的含水率也越大。随着膜孔直径的增大,同一深度处的土壤含水率增大,以膜孔中心垂向 10 cm 处为例,膜孔直径 6,8,10,12 cm

的土壤含水率依次为 23.73%, 24.50%, 25.58%, 26.50%, 以膜孔直径 6 cm 为基准, 增幅依次为 3.3%, 7.8%, 11.7%。这主要是由于累积入渗量随着膜孔直径的增大而增加的同时, 而膜孔侧渗量在整个入渗量中所占比重减小, 则垂直入渗量逐渐增大, 致使同一时间入渗到同一深度处的水分越多。该结果也体现出膜孔直径对浑水膜孔灌肥液自由入渗湿润体内水分分布影响的显著性, 因此在浑水膜孔灌溉过程中, 适当增加膜孔直径有助于土壤水分的下渗并提高土壤中的含水率。

2.4 膜孔直径对浑水膜孔灌氮素运移的影响

2.4.1 NO_3^- -N 运移特性 由图 6 可知, 不同膜孔直径条件下浑水膜孔灌肥液自由入渗试验停止供水时实测的湿润体内土壤 NO_3^- -N 含量分布等值线形状与土壤含水率等值线形状相似, 均为半椭圆形。结合图 5 湿润体内土壤含水率分布规律, 可以看出, NO_3^- -N 在湿润体内分布规律与水分分布相似, 湿润体内土壤 NO_3^- -N 随着湿润锋运移, 在膜孔中心附近区域保持较高含量, 这个区域随着入渗时间的延长而增大, 在图中表现为等值线图较密集, 这体现出

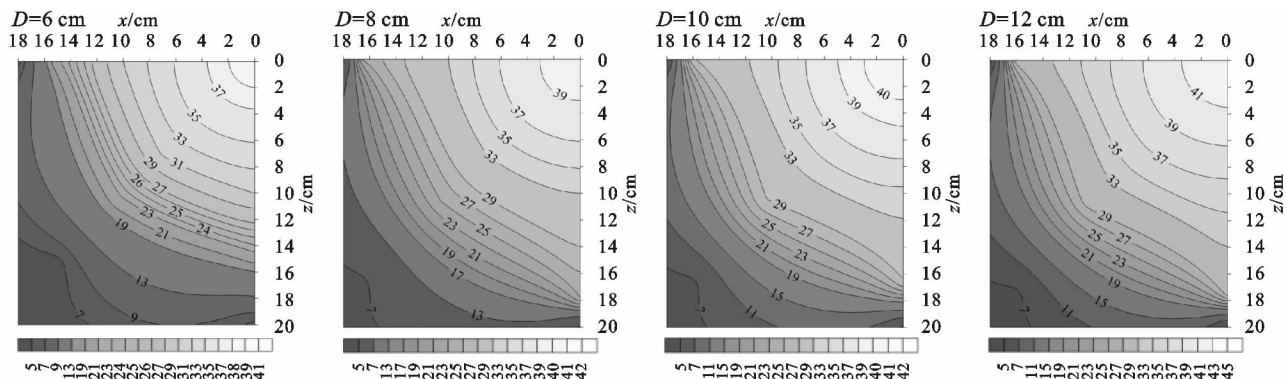


图 6 湿润体内土壤 NO_3^- -N 含量分布等值线

2.4.2 NH_4^+ -N 运移特性 由图 7 可知, 不同膜孔直径条件下浑水膜孔灌肥液自由入渗试验停止供水时实测的湿润体内土壤 NH_4^+ -N 含量主要集中在湿润半径 $r \leq 8$ cm 范围内, 膜孔中心附近 NH_4^+ -N 分布等值线最为密集, NH_4^+ -N 含量最高, 在湿润半径 $r > 8$ cm 以外的土壤里 NH_4^+ -N 含量明显减少, 在 15—20 cm, 尽管有湿润锋到达, 但 NH_4^+ -N 含量相比本底值无明显变化。这说明湿润体内土壤 NH_4^+ -N 分布并不像 NH_4^+ -N 那样随着水分不断向下运移, 即不符合“盐随水来, 盐随水去”的溶质迁移一般性规律。这是因为带正电荷的 NH_4^+ -N 与主要带负电荷的土壤胶体接触后被大量吸附, 导致土壤溶液中的 NH_4^+ -N 含量快速减小, 使得通过扩散迁移的 NH_4^+ -N 减少, 从而阻滞了 NH_4^+ -N 在土壤中的迁移。 NH_4^+ -N 在进入土壤后, 除部分直接被作物吸收利用外, 其

NO_3^- -N 易随水分运移的特性, 与“盐随水来, 盐随水去”的溶质运移一般规律相符。其主要原因在于, NO_3^- 和土壤胶体同样带有负电荷, 不易被土壤胶体所吸附, 会随着水分的扩散而迁移。在水分入渗过程中, 湿润体内的含水率随着到膜孔中心距离的增大而逐渐减小, 在湿润锋处含水率骤减, 在这个范围内土壤 NO_3^- -N 含量迅速减小, 与本底值接近。

此外, 湿润体内同一位置处, NO_3^- -N 含量随着膜孔直径的增大而增大, 膜孔中心处实测 NO_3^- -N 含量依次为 39.30, 40.88, 41.50, 43.63 mg/kg, 以膜孔直径 6 cm 为基准, 增幅依次为 4.0%, 5.6%, 11.0%。这是由于膜孔直径增大后同一时间从膜孔入渗到土壤中的肥液增多所致。在入渗 400 min 内, 不同膜孔直径条件下浑水膜孔灌肥液自由入渗湿润体内土壤 NO_3^- -N 主要集中在分布在距膜孔中心 15 cm 范围内, 且变化范围不大, 这也进一步体现了膜孔灌溉的优势, 即膜孔肥液入渗可将养分保留在作物根区集中分布的浅层土壤中, 有利于作物的吸收, 可提高氮肥利用率, 且水分不易发生深层渗漏, 同时可减小 NO_3^- -N 对地下水的污染。

余部分主要通过土壤吸附、 NH_4^+ -N 硝化、挥发等过程进行转化或损失。由于本试验研究时间较短, 忽略有机氮的矿化、植物吸收等作用, 主要研究 NH_4^+ -N 在土壤中的吸附作用和硝化过程, 二者对 NH_4^+ -N 在土壤剖面中的转化迁移起决定性作用。

此外, 在湿润体内同一位置处, NH_4^+ -N 含量随着膜孔直径的增大而增大。膜孔直径 6, 8, 10, 12 cm 条件下, NH_4^+ -N 含量峰值依次为 400.4, 444.2, 460.4, 470.4 mg/kg, 以膜孔直径 6 cm 为基准, 增幅依次为 10.94%, 14.99%, 17.48%。这是由于膜孔直径越大, 相同时间条件下入渗到土壤中的肥液越多, 当土壤胶体对带正电荷的 NH_4^+ -N 吸附达到饱和状态时, NH_4^+ -N 便会依附于水流进行运移^[19], 进而使得在湿润体同一位置处, 出现 NH_4^+ -N 含量随着膜孔直径的增大而增大的现象。

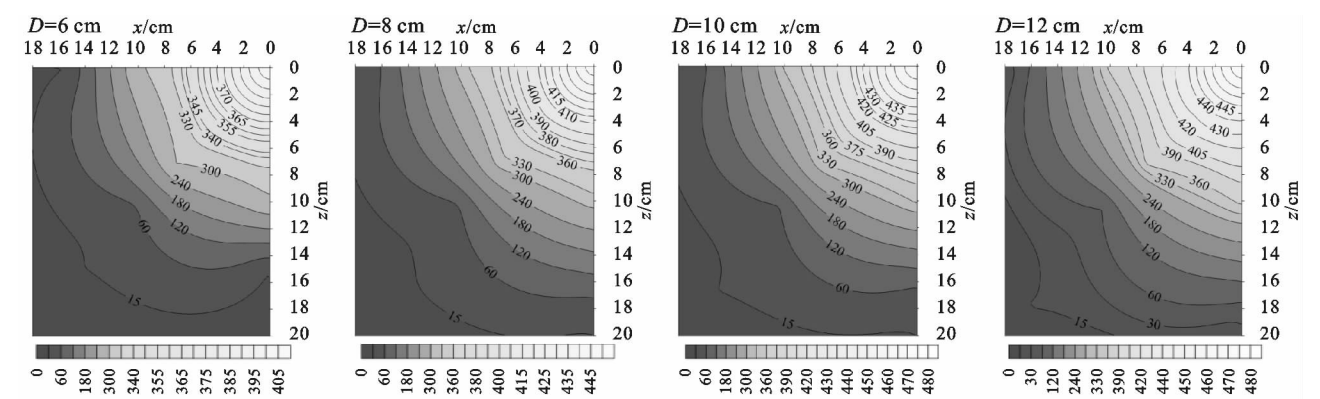


图 7 湿润体内土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量分布等值线

3 结论

(1) 膜孔直径越大,湿润锋运移距离越大,湿润锋运移距离与入渗时间呈极显著的幂函数关系。膜孔直径对浑水膜孔灌肥液自由入渗湿润体内水分分布影响显著,膜孔直径越大,湿润体范围越大,高含水率区域越大,湿润体内同一位置处的含水率也越大。

(2) 膜孔直径对浑水膜孔灌肥液入渗能力有较大影响。单位膜孔面积累积入渗量与入渗时间符合 Philip 入渗模型;相同入渗时间内,膜孔直径的越大,单位膜孔面积累积入渗量越小。随着膜孔直径的增大,吸渗率 S 和稳定入渗率 A 逐渐减小。

(3) 膜孔直径越大,相同时间内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度锋运移距离越大,同一位置处 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量越大。在入渗 400 min 内,在膜孔中心附近区域 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量较高,湿润体内土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要集中分布在距膜孔中心 15 cm 范围内,而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要集中分布在距膜孔中心 8 cm 范围内。

参考文献:

[1] 董玉云. 膜孔入渗土壤水氮运移特性试验与数值模拟[D]. 西安:西安理工大学,2007.

[2] 费良军,程东娟,雷雁斌,等. 膜孔灌单点源入渗特性与数学模型研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(5):212-216.

[3] 王锦辉,费良军,聂卫波. 浑水灌溉入渗特性研究进展与展望[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(2):265-270.

[4] 董玉云,王宝成,费良军. 膜孔肥液单向交汇入渗水氮运移特性试验研究[J]. 中国农村水利水电,2015(6):91-94.

[5] 钟韵,费良军,傅渝亮,等. 浑水膜孔灌入渗影响因素[J]. 排灌机械工程学,2017,35(2):178-184.

[6] 林晓康. 不同因素对微咸水膜孔灌水氮盐运移影响[D]. 河北 邯郸:河北工程大学,2015.

(上接第 119 页)

[17] Aeby P, Forrer J, Steinmeier C, et al. Image analysis for determination of dye tracer concentrations in sand columns [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 33-35.

[18] 牛健植. 长江上游暗针叶林生态系统优先流机理研究

[7] 刘利华,费良军,朱红艳,等. 含沙率对浑水膜孔灌单孔自由入渗特性的影响[J]. 灌溉排水学报,2017,36(12):62-67.

[8] Li Y, Fan Y, Liu Y, et al. Influencing factors and simplified model of film hole irrigation [J]. Water, 2017, 9(7): 543.

[9] Bouwer H, Ludke J, Rrice R C. Sealing pond bottoms with muddy water [J]. Ecological Engineering, 2001, 18(2): 5-8.

[10] Saeed M, Mahmood S. Application of film hole irrigation on borders for water saving and sunflower production [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2013, 38(6): 1347-1358.

[11] 费良军,王锦辉. 泥沙粒度组成对浑水膜孔灌单向交汇入渗特性的影响[J]. 农业机械学报,2016,47(4):105-112.

[12] 费良军,王锦辉,金世杰. 不同膜孔直径的浑水膜孔灌自由入渗特性研究[J]. 农业机械学报,2016,47(2):172-178.

[13] 金世杰,费良军,傅渝亮,等. 土壤初始含水率对浑水膜孔灌自由入渗特性影响[J]. 水土保持学报,2016,30(5):235-239.

[14] 钟韵,费良军,傅渝亮,等. 土壤容重对浑水膜孔灌单点源自由入渗特性的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(2):88-91,96.

[15] 脱云飞,费良军,董艳慧,等. 土壤容重对膜孔灌水氮分布和运移转化的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(2):6-11.

[16] 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,2006.

[17] 董玉云,费良军,穆红文. 肥液浓度对单膜孔入渗 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 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.

[18] 董玉云,费良军,任建民. 土壤质地对单膜孔肥液入渗水分及氮素运移的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(4):30-34.

[19] 费良军,刘显,王佳,等. 土壤容重对涌泉根灌土壤水氮运移特性的影响[J]. 农业机械学报,2017,48(8):219-228.

[D]. 北京:北京林业大学,2003.

[19] 李伟莉,金昌杰,王安志,等. 土壤大孔隙流研究进展[J]. 应用生态学报,2007,18(4):888-894.

[20] 陈效民,黄德安,吴华山. 太湖地区主要水稻土的大孔隙特征及其影响因素研究[J]. 土壤学报,2006,43(3): 181-183.