

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

董玉云¹, 费良军^{1,2}, 穆红文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: 该文通过室内入渗试验, 研究了不同浓度的单膜孔肥液入渗 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的分布特性。研究表明: 不同浓度的膜孔肥液入渗土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度的湿润锋运移距离与土壤水分运动的湿润锋一致; 肥液浓度越大, 相同入渗时间的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度锋运移距离越大, 土壤剖面 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度最大值越大, 相同深度处土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度也越大。肥液入渗土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度分布特征与湿润体深度符合分段函数模型。供水入渗过程中, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度锋运移距离和浓度最大值均随时间的延长而增大; 再分布过程中, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度锋运移距离继续增大, 而 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度最大值逐渐减小。

关键词: 膜孔灌; 点源入渗; 肥液浓度; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度分布

中图分类号: S152.72 **文献标识码:** B **文章编号:** 1002-6819(2006)05-0204-03

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.

Dong Yuyun, Fei Liangjun, Mu Hongwen. Laboratory experimental study on effects of fertilizer solution concentration on transport characteristics of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ under single film hole infiltration[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 204-206. (in Chinese with English abstract)

0 引言

农田土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 淋失是土壤氮素损失的一个主要途径, 这不仅浪费大量肥力和资金, 而且污染环境, 危害人畜健康, 破坏水域中的生态平衡。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 污染地下水主要是由于农田大量施用氮肥的结果^[1,2]。土壤水、氮运移分布特性与灌溉入渗方式密切相关, 研究灌溉入渗方式对水、氮运移分布规律的影响, 对于提高水、肥利用率, 降低农业成本与氮肥对地下水的污染具有重要意义。膜孔灌条件下的土壤入渗为充分供水条件下的空间三维入渗, 具有节水、保肥、灌溉质量高和灌溉水利用率高等特点, 不同于滴灌条件下的非充分供水点源入渗。目前, 国内对膜孔灌土壤水分运移和分布规律的研究已有一定进展^[3-7], 而关于膜孔灌农田氮素运移特性的研究国内外尚未见报导。施肥条件下传统地面灌和滴灌方面国内外已开展了初步的研究。Pier 等研究了滴灌的土壤水分和氮素耦合问题^[8]; 吴军虎研究了波涌灌间歇入渗土壤氮素运移特性、水肥耦合规律及技术要素等问题^[9]; 李久生等人研究了滴灌施肥条件下氮素的分布规律和数值模拟^[10]。因此, 开展膜孔灌施肥条件下的土壤水分和氮素运移特性研究具有重要的意义。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

膜孔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 24 cm×20 cm×30 cm。膜孔仪由有机玻璃制成, 由底座和方形水室组成, 根据不同的试验情况, 底座上预留不同直径的水分入渗通道, 与土壤接触的底座面涂抹凡士林, 以防止“板下径流”, 底座上方为方形水室, 储存有薄层积

水, 用来模拟大田的充分供水入渗情况。马氏瓶可进行自动供水, 其横截面积为 30.5 cm², 为膜孔仪提供恒定的水层厚度。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, 试验点源采用 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。试验过程中为防止土壤水分蒸发, 在土箱的上表面覆膜。

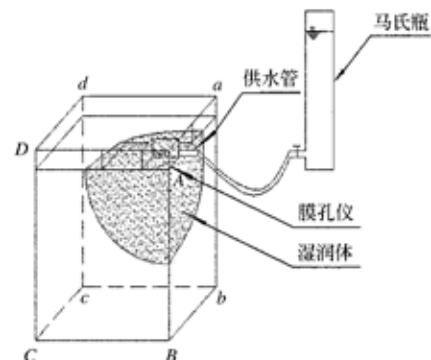


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

1.2 试验方法

供试土壤为西安粉壤土, 其土壤颗粒级配组成见表 1。土壤容重为 1.30 g/cm³, 饱和质量含水率为 36.2%, 初始硝态氮含量为 6.5 mg/kg。试验清水入渗和浓度分别为 300、600 和 1000 mg/L 的肥液入渗 4 个处理, 3 次重复, 试验肥液采用 NH_4NO_3 作为肥料。土料经风干、碾细、过筛(筛孔径为 2 mm), 按预定初始质量含水率 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。

试验连续供水时间为 180 min。由于点源入渗的对称性, 取湿润土体表层径向向下按 2.5 cm×2.5 cm×2.5 cm 的网格取样, 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率。土样以 0.01 mol/L CaCl_2 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。

收稿日期: 2005-09-19 修订日期: 2006-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(50579064, 50179030); 陕西省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: 董玉云(1975-), 女, 河北任丘人, 博士生, 主要从事水资源规划和农田水、肥运移特性研究。西安市 西安理工大学水资源所 748#, 710048。Email: dongyuyun2003@163.com

表 1 粉壤土颗粒组成

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

2 结果与分析

2.1 肥液浓度对土壤 NO₃-N 浓度分布的影响

图 2、图 3 分别表示清水和肥液浓度分别为 300、600 和 1000 mg/L 的单膜孔供水入渗结束时和再分布 24 h 时膜孔中心处垂向土壤 NO₃-N 的分布。从图 2 中可以看出, 供水结束时清水入渗的上层土壤 NO₃-N 浓度低于土壤 NO₃-N 的本底值, 而下层土壤 NO₃-N 浓度高于土壤 NO₃-N 的本底值, 这是因为 NO₃-N 带负电荷, 不易被土壤颗粒吸附, 主要通过对流作用随土壤水分运动。因此, 清水入渗将上层土壤中的 NO₃-N 淋洗到了下层土壤中, 在本文试验条件下, NO₃-N 浓度在距湿润锋 2 cm 处达到最大值。在同一位置, 土壤 NO₃-N 浓度随肥液浓度的增大而增大, 除湿润锋附近外, 肥液入渗的土壤 NO₃-N 浓度均高于清水入渗的浓度。因此, 可以认为不同肥液浓度膜孔入渗土壤 NO₃-N 的浓度锋运移距离与土壤水分运动的湿润锋是一致的。

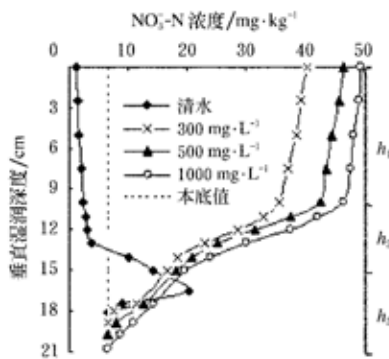


图 2 供水结束时湿润体垂向土壤 NO₃-N 分布
Fig. 2 Distribution of NO₃-N in the vertical soil of the wetting front by the end of water supply

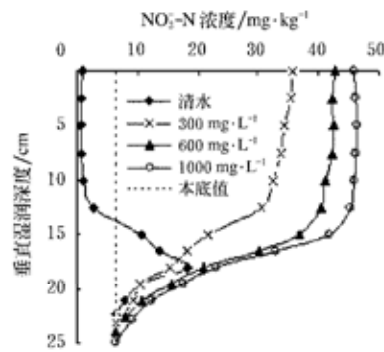


图 3 再分布 24 h 时湿润体垂向土壤 NO₃-N 分布
Fig. 3 Distribution of NO₃-N in the vertical soil of the wetting front after 24h redistribution

入渗时间相同时, 不同肥液浓度的土壤 NO₃-N 浓度分布不同, 供水停止时, 实测肥液浓度为 300、600 和 1000 mg/L 的膜孔入渗土壤 NO₃-N 的浓度锋运移距离分别为 18.9、19.7 和 20.8 cm, 表层土壤 NO₃-N 的浓度分别为 40.5、46.5 和 49.7 mg/kg, 本文中土壤 NO₃-N 主要集中分布在由表层土壤至向下 10~15 cm 深度范围内。说明膜孔肥液入渗利于将养分保存在浅层土

壤中, 集中在作物的主根区, 利于作物吸收, 提高肥料的利用率, 且水分不易发生深层渗漏, 因 NO₃-N 随水分运动, 因而不会污染地下水。

从图 2 中还可看出, 肥液浓度越大, 相同入渗时间的土壤 NO₃-N 浓度锋运移距离越大, 土壤剖面 NO₃-N 浓度最大值越大, 相同深度处土壤 NO₃-N 浓度也越大。这主要是由于肥液浓度越大, 土壤溶液中 NO₃-N 浓度越高, 因而相应该点的土壤 NO₃-N 浓度越高。进入再分布过程后(图 3), 由于土壤水分运动速度迅速减小, NO₃-N 运移的扩散作用所占比重逐渐增加, 时间相同时土壤 NO₃-N 浓度锋运移距离的位置随肥液浓度增大而增大。这是由于入渗肥液浓度越大, 土壤肥液浓度梯度越大, 扩散作用越明显。

膜孔肥液入渗膜孔中心垂向土壤的 NO₃-N 浓度分布特征与肥液浓度相关, 设湿润体膜孔中心垂向某点土壤的 NO₃-N 浓度是湿润深度的函数, 即 $c = f(h)$, 根据土壤 NO₃-N 浓度随湿润深度的分布特征, 可以将其分为 3 段: 第一段为土壤 NO₃-N 浓度分布比较均匀的线性函数; 第二段为土壤 NO₃-N 浓度变化梯度较大的线性函数; 第三段为土壤 NO₃-N 浓度锋处的抛物线函数, 对其建立分段数学模型为

$$c = \begin{cases} k_1 h + b_1 & (0 < h \leq h_1) \\ k_2 h + b_2 & (h_1 < h \leq h_2) \\ k_3 h^2 + k_4 h & (h_2 < h \leq h_3) \end{cases} \quad (1)$$

式中 c ——NO₃-N 在土壤中的浓度; h ——膜孔肥液入渗膜孔中心垂向湿润深度, cm; $k_1, k_2, k_3, k_4, b_1, b_2$ ——拟合系数; h_1, h_2, h_3 ——湿润体垂直深度, cm。

2.2 土壤 NO₃-N 浓度分布随时间的变化

图 4 表示浓度为 600 mg/L 的膜孔点源入渗在不同入渗时刻湿润体膜孔中心垂向土壤 NO₃-N 浓度分布图。从图 4 中可以看出, 肥液入渗过程中膜孔中心垂向土壤 NO₃-N 浓度锋运移距离和土壤剖面 NO₃-N 浓度最大值均随时间延长而增大, NO₃-N 浓度最大值的位置随时间下移, 相同深度处土壤 NO₃-N 浓度也随时间而增加。进入再分布过程后, NO₃-N 运移速度随水分运动速度而迅速减缓, 并且扩散作用所占比重逐渐增加; 再分布过程中膜孔肥液入渗土壤 NO₃-N 浓度锋运移距离随时间而继续增大, 上层土壤 NO₃-N 相应减少, 下层新湿润段土壤的 NO₃-N 浓度不断增加, 整个湿润土体内 NO₃-N 浓度的分布相对均匀。土壤剖面 NO₃-N 浓度最大值逐渐减小, 且其位置随时间向下迁移。

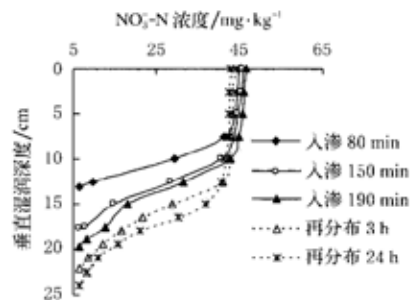


图 4 不同时刻湿润体膜孔中心垂向土壤 NO₃-N 分布
Fig. 4 Distribution of NO₃-N in the vertical soil of the wetting front at different moments

2.3 膜孔肥液入渗土壤湿润体 NO_3^- -N 浓度分布特性

图5表示浓度为600 mg/L的膜孔点源入渗在入渗时间为180 min时湿润体 NO_3^- -N浓度等值线图。从图5中可以看出,水平和垂直方向的 NO_3^- -N浓度均随距膜孔中心距离的增加而降低,并且无论是水平方向还是垂直方向,距离膜孔中心越近, NO_3^- -N浓度越高,表明断面上过水越多,累积的 NO_3^- -N越多,这与一维情况下 NO_3^- -N浓度随位置变化趋势类似。但由于膜孔直径为6 cm,供水后瞬间水平方向湿润锋达到膜孔直径长度。因此,在距膜孔中心10 cm范围内,受膜孔面积的影响,水平方向的土壤 NO_3^- -N浓度锋运移距离较垂直方向的大;10 cm以外膜孔面积的影响减小,主要受水势的影响,由于水平方向只受基质势的作用,垂直方向受基质势和重力势的共同作用,因而垂直湿润锋运移距离较水平湿润锋的大,垂直方向的 NO_3^- -N浓度锋运移距离较水平方向的大。

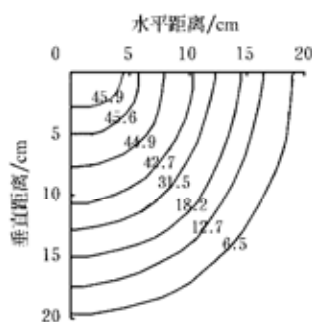


图5 供水结束时湿润体土壤 NO_3^- -N等浓度线

Fig. 5 Contour lines of the concentration of NO_3^- -N in the vertical soil of the wetting front by the end of water supply

3 结论

1) 不同浓度的膜孔肥液入渗 NO_3^- -N的浓度锋运移距离较清水的大,且与水分运动的湿润锋一致。

2) 清水入渗 NO_3^- -N是淋洗的过程, NO_3^- -N浓度的最大值

出现在湿润锋附近;肥液入渗 NO_3^- -N最大值在土壤表层;肥液浓度越大,相同时间的 NO_3^- -N浓度锋运移距离越大,土壤剖面 NO_3^- -N浓度最大值越大,相同深度处土壤 NO_3^- -N浓度也越大。

3) 肥液入渗湿润体膜孔中心垂向土壤 NO_3^- -N浓度与湿润深度成分段函数关系。

4) 入渗过程中的土壤 NO_3^- -N浓度锋运移距离和最大值随时间的延长而增大;再分布过程的土壤 NO_3^- -N浓度锋运移距离继续增大,而 NO_3^- -N浓度最大值逐渐减小。

5) 膜孔肥液入渗土壤水平和垂直方向的 NO_3^- -N浓度均与一维情况下的 NO_3^- -N浓度随位置变化趋势类似。距膜孔中心10 cm范围内,水平方向的土壤浓度锋运移距离较垂直方向的大;距膜孔中心10 cm范围以外,垂直方向的土壤 NO_3^- -N浓度锋运移距离较水平方向的大。

[参考文献]

- [1] Flipse W J, Katr B G. Source of nitrate groundwater in a sewerage housing development [Z]. Central Long Island. New York, Groundwater, 1984, 22: 57- 65.
- [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, 5(4): 307- 315.
- [3] 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, 1999.
- [4] 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, 2000.
- [5] 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, 17(4): 105- 109.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Pier J W, Doerge T A. Nitrogen and water interaction in trickle irrigation watermelon[J]. Soil Sci J Am, 1995, 59(1): 145- 150.
- [9] 吴军虎. 波涌灌间歇入渗土壤氮素运移特性试验与数值模拟研究[D]. 西安理工大学, 2004.
- [10] 李久生, 张建君, 薛克宗. 滴灌施肥灌溉原理与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2003.

Laboratory experimental study on effects of fertilizer solution concentration on transport characteristics of NO_3^- -N under single film hole infiltration

Dong Yuyun¹, Fei Liangjun^{1,2}, Mu Hongwen¹

(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 Areas, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: Based on indoor experiment, NO_3^- -N concentration distribution characteristics under single point source infiltration with different fertilizer solution concentrations were studied. The wetting front distance of NO_3^- -N concentration under film hole infiltration has the same pattern as the movement of soil wetting front. The concentration front distance of NO_3^- -N and the maximum value of NO_3^- -N concentration in soil profile increase with the increase of the solution concentration at the same time. The NO_3^- -N concentration increases with the increase of the solution concentration at the same depth. The NO_3^- -N concentration distribution characteristics and wetting front depth under fertilizer solution infiltration satisfy the subsection function model. The concentration front distance of NO_3^- -N and the maximum value of NO_3^- -N concentration increase with the increase of the time in the process of water supply. The concentration front distance of NO_3^- -N increases with the increase of the time in the process of redistribution and the maximum value of NO_3^- -N concentration decreases.

Key words: film hole irrigation; point source infiltration; fertilizer solution concentration; NO_3^- -N concentration distribution