

肥液浓度对膜孔单向交汇入渗 NO₃⁻-N 运移特性的影响

董玉云¹, 费良军², 穆红文³, 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;
3. 甘肃省电力设计院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 通过室内入渗试验, 研究了不同浓度的膜孔肥液单向交汇入渗 NO₃⁻-N 的分布特性。研究表明, 不同肥液浓度的膜孔入渗湿润体膜孔中心和交汇界面中心垂向土壤 NO₃⁻-N 的浓度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 NO₃⁻-N 浓度锋运移距离越大, 土壤 NO₃⁻-N 浓度最大值越大, 相同深度处土壤 NO₃⁻-N 浓度也越大。建立了肥液交汇入渗湿润体膜孔中心和交汇界面中心垂向土壤 NO₃⁻-N 浓度分布特征与湿润体深度之间的分段函数模型, 经实测资料验证表明, 该模型精度较高。入渗供水过程中, NO₃⁻-N 浓度锋运移距离和浓度最大值随时间的延长而增大; 再分布过程中, NO₃⁻-N 浓度前锋运移距离随时间延长而增大, 而 NO₃⁻-N 浓度最大值逐渐减小。

关键词: 膜孔灌; 单向交汇入渗; 肥液浓度; NO₃⁻-N 浓度分布
中图分类号: S158.3; S275.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)04-0038-05

氮肥利用率低和对环境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。据研究, NO₃⁻-N 污染地下水主要是由于农田大量施用氮肥的结果^[1~4]。土壤水、氮运移分布特性与灌溉入渗方式密切相关。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点源入渗。近年来, 国内对膜孔入渗土壤水分运移特性的研究已有一定进展, 王文焰、费良军、吴军虎、缴锡云等^[5~8]主要针对清水单膜孔入渗问题, 开展了单点源土壤水分运移特性、影响因素及数学模型等方面的试验研究工作, 李发文、费良军等^[9~11]对清水膜孔交汇入渗的土壤水分运移特性、影响因素进行了初探; 直至目前尚未见到国外有关方面的研究报导。关于施肥条件下膜孔灌土壤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导^[12~14]。膜孔交汇入渗是膜孔灌技术研究的基础。因此, 开展膜孔肥液交汇入渗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、膜孔仪和马氏瓶三部分组成。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关于图 1 中 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。试验过程中为防止土壤水分蒸发, 在土箱的上表面覆膜。

1.2 试验方法

供试土壤为塬土, 其土壤颗粒级配组成(中国土壤质地分类, 吸管法)见表 1。土壤容重为 1.30 g/cm³, 饱和重量含水率为 36.2%, 土壤初始硝态氮含量为 6.5 mg/kg, 试验分清水和浓度分别为 300、600 mg/L 和 1 000 mg/L 的肥液入渗 4 个处理, 3 个重复, 肥液采用 NH₄NO₃ 溶液。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 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, 并观测湿润锋运移分布。

试验连续供水时间为 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。各点取得土样中的 5 g 用以测定土壤硝态氮浓度,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:水为 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。

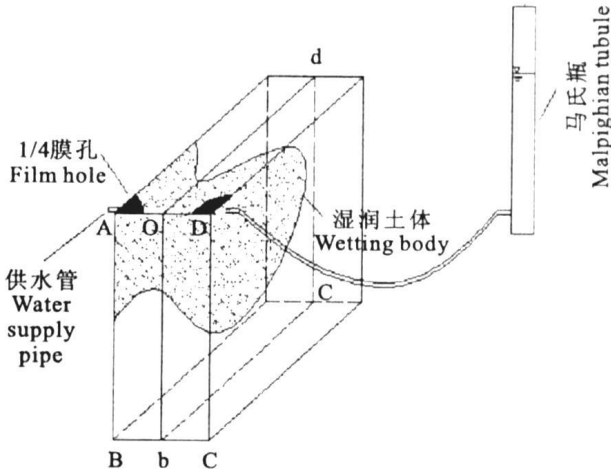


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

表 1 供试土样的颗粒级配组成

Table 1 Grain composition of experimental soil

项目 Items	粒径(mm) Diameter									
	<1.0	<0.5	<0.25	<0.1	<0.05	<0.025	<0.01	<0.005	<0.002	<0.001
含量(%) Content	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 分别为清水和肥液浓度为 300、600 mg/L 和 1 000 mg/L 的膜孔单向交汇入渗供水结

束时膜孔中心处和交汇界面中心处垂向土壤 NO₃⁻-N 的浓度分布。可以看出,供水结束时清水入渗上层土壤 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

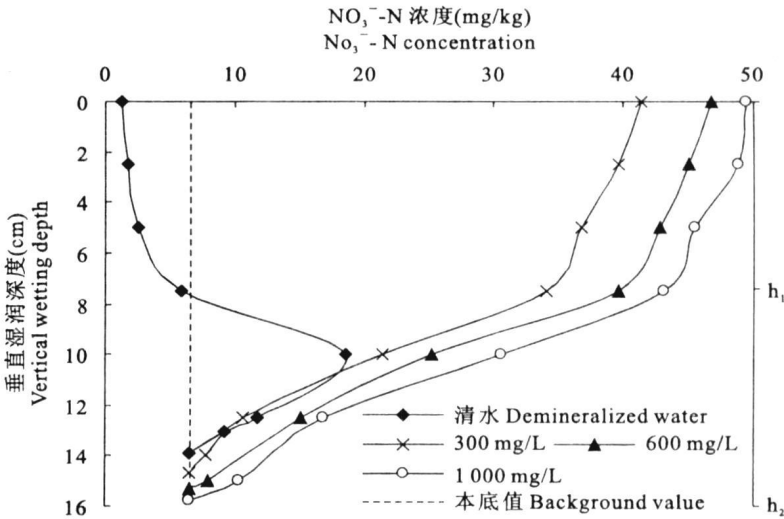


图 2 供水结束时膜孔中心垂向土壤 NO₃⁻-N 分布

Fig. 2 Distribution of NO₃⁻-N in the vertical soil of the wetting body by the of water supply

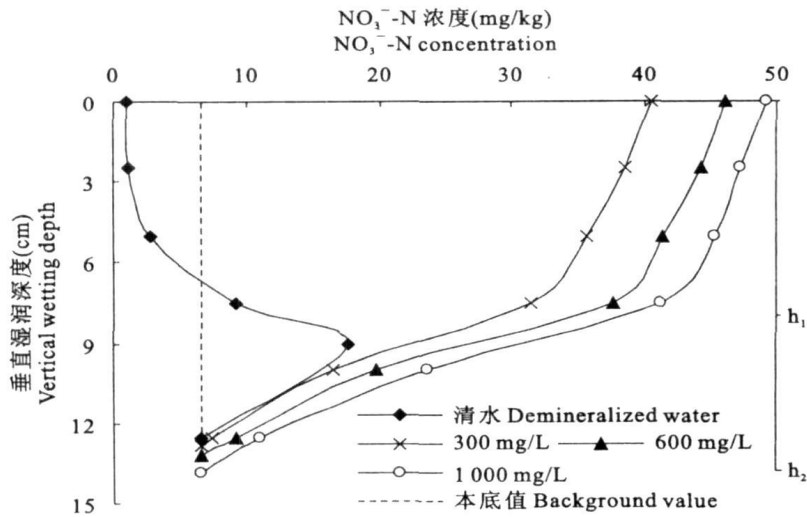


图 3 供水结束时交汇界面中心垂向土壤 NO₃⁻-N 分布

Fig. 3 Distribution of NO₃⁻-N in the vertical soil of the interference interface center by the end of water supply

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, 在本试验条件下, NO₃⁻-N 浓度在距湿润前锋约 4 cm 处达到最大值。对于肥液入渗, 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的膜孔入渗 NO₃⁻-N 浓度锋运移距离与土壤水分运动的湿润锋是一致的。

上述 4 个处理的单向交汇时间分别为 25、23、20 min 和 18 min, 入渗时间相同时, 不同肥液浓度的湿润体土壤 NO₃⁻-N 浓度分布不同, 供水停止时, 实测肥液浓度为 300、600 mg/L 和 1 000 mg/L 的膜孔中心 NO₃⁻-N 的浓度锋运移距离分别为 14.7、15.3 cm 和 15.8 cm, 表层土壤 NO₃⁻-N 的浓度分别为 41.5、46.9 mg/kg 和 49.6 mg/kg; 交汇界面 NO₃⁻-N 的浓度锋运移距离分别为 12.8、13.2 cm 和 13.8 cm, 表层土壤 NO₃⁻-N 的浓度分别为 40.6、46.1 mg/kg 和 49.2 mg/kg。表明, 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

肥液浓度为 300 mg/L:

$$c = \begin{cases} -h + 41.8 & (0 < h \leq 7.5 \text{ cm}) \\ -41.826 \ln(h) + 117.9 & (7.5 \text{ cm} < h \leq 14.7 \text{ cm}) \end{cases} \quad \begin{matrix} R^2 = 0.9905 \\ R^2 = 0.993 \end{matrix}$$

肥液浓度为 600 mg/L:

$$c = \begin{cases} -0.956h + 47.21 & (0 < h \leq 7.5 \text{ cm}) \\ -45.965 \ln(h) + 131.78 & (7.5 \text{ cm} < h \leq 15.3 \text{ cm}) \end{cases} \quad \begin{matrix} R^2 = 0.9853 \\ R^2 = 0.9982 \end{matrix}$$

肥液浓度为 1 000 mg/L:

$$c = \begin{cases} -0.904h + 50.19 & (0 < h \leq 7.5 \text{ cm}) \\ -49.319 \ln(h) + 142.92 & (7.5 \text{ cm} < h \leq 15.8 \text{ cm}) \end{cases} \quad \begin{matrix} R^2 = 0.9494 \\ R^2 = 0.9946 \end{matrix}$$

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 浓度也越高。

经分析, 膜孔肥液单向交汇入渗膜孔中心和交汇界面中心垂向土壤 NO₃⁻-N 浓度分布特征与肥液浓度有关, 设湿润体垂向某点土壤的 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, 可以将其分为两段, 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对数函数, 对其建立分段数学模型为:

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

式中, c 为 NO₃⁻-N 在土壤中的浓度; h 为膜孔肥液入渗膜孔中心垂向深度(cm); k_1 、 k_2 、 b_1 、 b_2 为拟合系数; h_1 为湿润体内含水量大于田间持水量的垂直深度(cm); h_2 为湿润体内含水量小于田间持水量的垂直深度(cm)。

利用式(1)对图 2 中不同肥液浓度的膜孔中心垂向土壤 NO₃⁻-N 浓度分布拟合得:

利用式(1) 对图 3 中不同肥液浓度的膜孔交汇界面中心垂向土壤浓度分布进行拟合得:

肥液浓度为 300 mg/L:

$$c = \begin{cases} -1.22h + 41.15 & (0 < h \leq 7.5 \text{ cm}) \\ -46.505 \ln(h) + 124.63 & (7.5 \text{ cm} < h \leq 12.8 \text{ cm}) \end{cases}$$

$R^2 = 0.9715$
 $R^2 = 0.9962$

肥液浓度为 600 mg/L:

$$c = \begin{cases} -1.136h + 46.61 & (0 < h \leq 7.5 \text{ cm}) \\ -54.712 \ln(h) + 147.14 & (7.5 \text{ cm} < h \leq 13.2 \text{ cm}) \end{cases}$$

$R^2 = 0.9758$
 $R^2 = 0.995$

肥液浓度为 1 000 mg/L:

$$c = \begin{cases} -1.044h + 49.64 & (0 < h \leq 7.5 \text{ cm}) \\ -57.436 \ln(h) + 156.5 & (7.5 \text{ cm} < h \leq 13.8 \text{ cm}) \end{cases}$$

$R^2 = 0.9647$
 $R^2 = 0.998$

从以上拟合结果可以看出,随着肥液浓度的增大,模型在 0~*h*₁ 段内的斜率和截距都有所增大,说明湿润体垂向单位土层的 NO₃⁻—N 浓度和表层土壤的浓度均随着肥液浓度的增大而增大;模型在 *h*₁~*h*₂ 段内的系数逐渐减小,截距逐渐增大,说明在 *h*₁~*h*₂ 段内湿润体垂向单位土层的 NO₃⁻—N 浓度随肥液浓度的增大而减小,而拐点处土壤 NO₃⁻—N 的浓度随肥液浓度的增大而增大。膜孔中心处的 *k*₁、*b*₁ 均比交汇界面中心处的大;*b*₂ 比交汇界面中

心处的小。
取显著性水平为 0.01,试验数据点的临界相关系数(*r*²)为 0.7646,以上拟合的相关系数 *R*² 均大于 0.94, *R*² 大于临界相关系数 *r*²,说明式(1)是描述不同肥液浓度的膜孔单向交汇入渗湿润体膜孔中心和交汇界面中心垂向土壤 NO₃⁻—N 浓度分布的有效模型。为验证模型的精度,采用该模型计算肥液浓度为 600 mg/L 的单向交汇入渗土壤 NO₃⁻—N 浓度分布的计算值与实测值,对比结果见表 2。

表 2 模型的拟合值与实测值对比
Table 2 Comparison table of simulated and measured values

项目 Items	湿润体深度(cm) Wetting body depth							
	15.3	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0
计算值(mg/kg) Calculated value	47.21	44.82	42.43	40.04	25.94	15.69	7.31	6.40
实测值(mg/kg) Measured value	46.9	45.10	42.80	39.70	25.30	15.10	7.90	6.50
相对偏差(%) Relative difference	0.66	-0.62	-0.87	0.85	2.47	3.76	-8.07	-1.56

由表 2 可知,模型拟合值与实测值相对偏差较小,说明采用该模型可以推求肥液膜孔单向交汇入渗湿润体垂向土壤 NO₃⁻—N 的浓度分布。

2.2 湿润体土壤 NO₃⁻—N 浓度分布随时间的变化

图 4、图 5 分别表示肥液浓度为 600 mg/L 的膜孔单向交汇入渗不同时刻湿润体膜孔中心和交汇界面中心垂向土壤 NO₃⁻—N 浓度的分布。可以看出,供水入渗过程中,膜孔中心和交汇界面中心垂向土壤 NO₃⁻—N 浓度锋运移距离和土壤剖面 NO₃⁻—N 浓度最大值均随入渗时间的延长而增大,相同深度处土壤 NO₃⁻—N 浓度随供水时间的延长而增加。进入再分布过程后,NO₃⁻—N 运移速度随水分运动速度的减缓而迅速减慢,并且扩散作用所占比重逐渐增加。再分布过程中,土壤 NO₃⁻—N 浓度锋运移距离随时间的延长而继续增大,上层土壤 NO₃⁻—N 浓度相应减少,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 浓度的分布变得相对均匀;土壤剖面 NO₃⁻—N 浓度最大值随再分

布时间的延长逐渐减小,且其位置随时间向下迁移。

2.3 膜孔肥液入渗土壤湿润体 NO₃⁻—N 浓度分布特性

图 6 为肥液浓度为 600 mg/L 的膜孔单向交汇入渗在入渗时间为 90 min 时图 1 中湿润体 ABba 界面 NO₃⁻—N 浓度等值线图。可以看出,在膜孔中心和交汇界面中心垂向土壤 NO₃⁻—N 浓度随距膜孔中心和交汇界面中心距离的增加而降低,并且距离中心越近,NO₃⁻—N 浓度越高,表明断面上过水越多,累积的 NO₃⁻—N 越多。在水平方向,由于膜孔直径为 4.0 cm,供水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 5 cm 范围内,水平方向的土壤 NO₃⁻—N 浓度大于垂直方向,5 cm 以外由于交汇后在交汇界面形成零通量面,因而又形成一个入渗源,由于总的入渗时间较膜孔中心处短,交汇界面中心垂向 NO₃⁻—N 浓度较膜孔中心处的低。由于重力势的作用,随着入渗时间的延长,膜孔中心和交汇界面中心的土壤 NO₃⁻—N 浓度逐渐接近于同一水平。

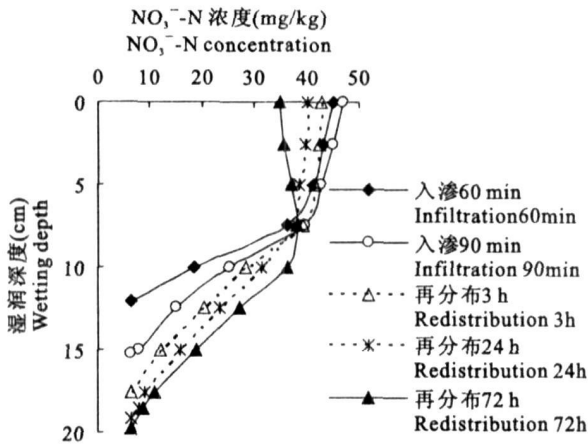


图 4 不同时刻湿润体膜孔中心垂向土壤 NO_3^- -N 分布

Fig. 4 Distribution of NO_3^- -N in the vertical soil of the film hole center at different moment

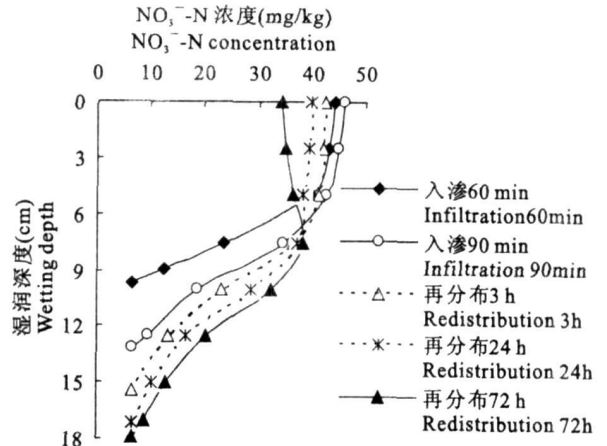


图 5 不同时刻湿润体交汇界面中心垂向土壤 NO_3^- -N 分布

Fig. 5 Distribution of NO_3^- -N in the vertical soil of the interference interface center at different moment

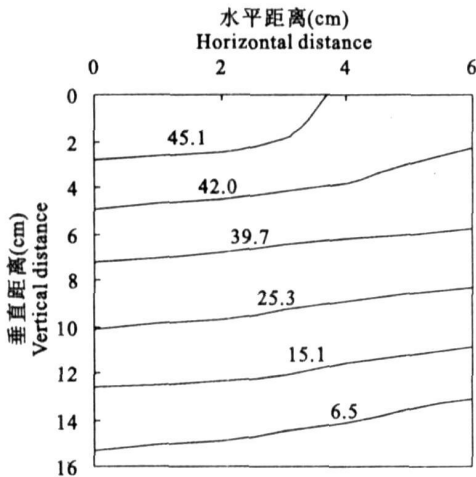


图 6 供水结束时湿润体土壤 NO_3^- -N 等浓度线(mg/kg)

Fig. 6 The same concentration line of NO_3^- -N in the vertical soil of the wetting body by the end of water supply

3 结 论

1) 不同浓度的膜孔肥液单向交汇入渗土壤 NO_3^- -N 的浓度锋运移距离均较清水的大, 且与水分运动的湿润锋一致。

2) 清水入渗土壤中 NO_3^- -N 是淋洗的过程, NO_3^- -N 浓度的最大值出现在距湿润锋约 4 cm 处; 肥液入渗 NO_3^- -N 最大值在土壤表层; 肥液浓度越大, 相同入渗时间的 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和交汇界面中心垂向土壤 NO_3^- -N 浓度与湿润深度符合分段函数关系。

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

5) 肥液入渗膜孔中心和交汇界面中心垂向土壤 NO_3^- -N 浓度随距膜孔中心和交汇界面中心距离的增加而降低, 随着入渗时间的延长, 膜孔中心和交汇界面中心的土壤 NO_3^- -N 浓度锋逐渐接近于同一水平。

参 考 文 献:

- [1] Flipse W J, Katr B G. Source of nitrate groundwater in a Sew-ered housing development [M]. 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, (4): 307-315.
- [3] 张国梁, 章 申. 农田氮素淋失研究进展 [J]. 土壤, 1998, (6): 291-297.
- [4] Randall G W, Iragavarapu T K. Impact of Long-term tillage systems for continuous corn on nitrate leaching to tile drainage [J]. Environ Qual, 1995, 24: 360-366.
- [5] 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.
- [6] 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, (9): 307-311.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.

(下转第 64 页)

Effects of different organic acids on maturity, physiological and nutrition metabolism of flue-cured tobacco

HUA Dang-ling¹, DU Jun¹, LIU Shi-liang¹, LIU Fang¹, WANG Wei-chao², WANG Xue-fen², JIE Xiao-lei^{1,3}

(1. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Xiangcheng Tobacco Company, Henan 461700, China; 3. Zhengzhou College of Animal Husbandry Engineering, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: A pot trial was conducted to systematically study the effects of malic acid, oleic acid and FA on maturity, physiological and nutrition metabolism of flue-cured tobacco. The main results were as follows: During the ripe harvesting time, the three organic acids could obviously reduce velum lipid peroxidation degree of tobacco leaves and could obviously improve the resistance of flue-cured tobacco, which was in favor of promoting the growth of flue-cured tobacco. Simultaneously the three organic acids could improve total sugar, reducing sugar and nicotine contents of tobacco leaves in different degree. Malic acid could obviously increase the K content of the middle and lower stalk position leaves. During the over-ripe harvesting time, in comparison with the ripe harvesting time, malic acid and FA could obviously increase the K content of the upper stalk position leaves. At the same time malic acid and oleic acid could obviously increase total sugar and reducing sugar contents of tobacco leaves. Oleic acid, however, could obviously reduce the starch and nicotine contents of tobacco leaves, and could remarkably strengthen the ability of resisting senescence and raise the ability of resisting adversity.

Key words: flue-cured tobacco; organic acids; maturity; physiological metabolism; nutrition metabolism

(上接第 42 页)

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

Influence of fertilizer solution concentration on $\text{NO}_3^- - \text{N}$ transport characteristics under single-line interference film hole infiltration

DONG Yu-yun¹, FEI Liang-jun², MU Hong-wen³, REN Jian-min¹

(1. Collge of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3. Gansu Design Institute of Electric Power, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on lab experiment, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration distribution characteristics under single-line interference film hole infiltration with different fertilizer solution concentration were studied. The concentration front transport distance of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ under single-line interference film hole infiltration had the same pattern as the movement of soil wetting front. The concentration front transport distance of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and the maximum value of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration in soil profile increased with the increase of the solution concentration in the same time. The $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration increased with the increase of the solution concentration at the same depth. The subsection function model for $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration distribution characteristics and wetting body depth of film hole center and interference interface center under fertilizer solution infiltration was developed, and the model was verified by measured data. The concentration front transport distance of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and the maximum value of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration increased with the increase of the time in the process of water supply. The concentration front transport distance of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ increased with the increase of the time in the process of redistribution but the maximum value of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration decreased.

Key words: film hole irrigation; single-line interference infiltration; fertilizer solution concentration; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration distribution