

膜孔灌溉施尿素条件下氮素转化和分布室内模拟试验

程东娟¹, 赵新宇², 费良军³

(1. 河北工程大学水电学院, 邯郸 056021; 2. 南昌工程学院水利工程系, 南昌 330099;
3. 西安理工大学水资源所, 西安 710048)

摘要: 为了提高膜孔灌氮肥利用率, 减少氮肥损失, 通过室内膜孔灌施尿素模拟试验, 研究了膜孔灌施尿素条件下氮素转化和分布规律, 结果表明: 灌施 600 mg/L 尿素溶液后, 转化生成的铵态氮主要分布在膜孔中心附近, 随着距离膜孔中心的增大而减小, 0~5 d 时铵态氮含量逐渐增大, 5 d 后逐渐减小。在 7 d 前, 硝化作用微弱, 上层土壤硝态氮含量低于本底值, 7 d 后, 硝化作用增强, 上层土壤硝态氮含量明显增大, 远高于本底值, 且水平方向转化生成的硝态氮含量大于垂直方向。在尿素转化过程中, 铵态氮减少量远大于硝态氮增加量, 表明尿素转化过程中氮素损失较大。以上成果为进一步研究膜孔灌施氮肥技术提供了参考。

关键词: 灌溉, 肥料, 尿素, 氮肥, 转化, 分布

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.012.010

中图分类号: S175.9, S143.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0058-05

程东娟, 赵新宇, 费良军. 膜孔灌施尿素条件下氮素转化和分布室内模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 58—62.
Cheng Dongjuan, Zhao Xinyu, Fei Liangjun. Laboratory simulation experiment on nitrogen transformation and distribution under condition of film hole irrigation with urea solution[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(12): 58—62. (in Chinese with English abstract)

0 引言

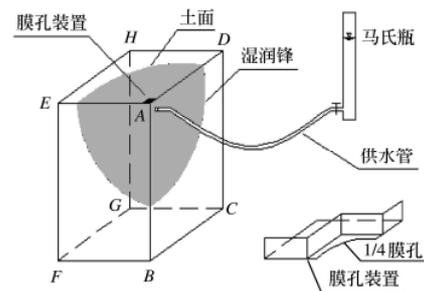
膜孔灌是在农业地膜覆盖栽培的基础上, 利用膜上输水并通过作物孔和专用灌水孔渗水的地面灌溉技术, 它具有节水、保肥、保墒、提高灌水质量和增产等特点, 适用于干旱和半干旱地区农田地面灌溉^[1-2]。

农田施肥方式主要有灌施、表施和深施 3 种, 氮肥种类主要有尿素、硝酸铵、硝酸钾等, 其中尿素施用量在所施氮素总量中占 50%, 且尿素溶解度高, 是适宜灌溉施肥的氮肥品种。生产上习惯采取施肥后立即灌溉, 或将肥料溶于水中, 通过灌溉使用肥料等方法, 其优点是有益于肥料中养分的吸收, 省工省力^[3]。

迄今为止, 国内外主要是西安理工大学水资源所对膜孔灌进行了研究, 研究内容多关于膜孔灌水氮运移方面^[4-11], 涉及肥料主要为硝态氮^[12-15], 对膜孔灌施肥料条件下氮素转化和分布规律研究较少^[16], 而灌施肥料条件下氮素的转化和分布特性对于减少氮肥损失, 提高氮肥利用率具有重要的理论价值和生产实际意义。因此, 本文研究膜孔灌施尿素条件下氮素在土壤中转化和分布规律, 为膜孔灌施肥料这一有效的水肥调控技术在中国的应用提供理论依据。

1 材料与方法

为了研究灌施尿素条件下氮素转化和分布规律, 利用自行研制的膜孔点源入渗装置(见图 1)在室内进行灌施条件下的尿素入渗试验。试验土箱采用 10 mm 厚的有机玻璃板制作, 为使试验过程不产生交汇, 试验土箱尺寸为 24 cm×24 cm×30cm, 入渗点源采用 1/4 膜孔面积的方形水室, 并置于土箱的一角。试验利用带有刻度的截面积为 30.5 cm²的透明有机玻璃制作的马氏瓶进行自动供水。灌施尿素肥液含质量浓度 600 mg/L 的纯氮。



注: A—H 为土箱的各项点

图 1 膜孔自由入渗装置

Fig.1 Equipment for film hole free infiltration

试验土样采用西安粉土, 初始质量含水率为 9.17%, 体积质量为 1.30 g/cm³, 初始铵态氮质量分数为 3.3 mg/kg, 初始硝态氮质量分数为 6.4 mg/kg, 饱和含水率为 36.2%。土壤颗粒组成见表 1, 土样经过风干、粉碎、过 2 mm 筛子按照预定的土壤体积质量和含水率分层(5 cm 厚)装入试验土箱, 对试验土样在膜孔直径为 6 cm 情况下进行灌施尿素的膜孔入渗试验。

收稿日期: 2008-12-14 修订日期: 2009-08-19

基金项目: 河北省教育厅科学研究计划项目(2008111); 国家自然科学基金项目(50579064, 50179030)

作者简介: 程东娟(1975—), 河北唐山人, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 节水灌溉、农业水资源利用与水土环境。邯郸 河北工程大学水电学院, 056021。Email: handanchengdongjuan@126.com

表 1 试验土样的颗粒级配组成
Table 1 Particle composition of experimental soil

粒径/mm	<1.000	<0.500	<0.250	<0.100	<0.050	<0.025	<0.010	<0.005	<0.002	<0.001
质量分数/%	99.60	99.20	98.87	98.60	89.15	56.58	28.02	11.34	2.88	0.90

试验结束后，在膜孔中所在垂直剖面上按 2.5 cm×2.5 cm×2.5 cm 切割土样，每份土样分 4 份，两份用于烘干法测定土壤含水率，另外两份土样用于测定土壤硝态氮和铵态氮。土壤铵态氮和硝态氮采用美国 HACH 公司 DR/4000 型紫外分光光度计测定，铵态氮用钠氏试剂比色法在 420 nm 波长下测定，硝态氮用 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液进行浸提后在 210 nm 波长下测定，结果取两份土样测定结果的平均值。

2 结果与分析

2.1 水分迁移分布规律

图 2 中 a、b 分别表示膜孔灌施尿素条件下水平方向和垂直方向土壤含水率在不同时间的分布曲线。可以看出，当供水停止后，水分进入再分布过程，在 24 h 内，水

分再分布剧烈，24 h 后，水分再分布缓慢，土壤水分继续向远离膜孔中心的地方运移，膜孔中心附近的土壤含水率减小，远离膜孔中心处的土壤含水率增大，湿润范围进一步增大，整个湿润土体内的含水率分布更加均匀。

土壤初始含水率为 9.17%，在田间条件下偏低，但膜孔灌为局部灌溉，灌施尿素溶液后，水分由膜孔渗入土壤，湿润体呈椭球体形状，湿润体之外的土壤没有被湿润，土壤含水率为初始含水率，而湿润体内的土壤含水率较高，由图 2 中水平方向和垂直方向土壤含水率在不同时间的分布曲线可以看出，灌施肥料结束后，距膜孔中心 0~12.5 cm 的范围内土壤含水率在 32.96%~17.74%，再分布 17 d 后，湿润体土壤含水率在 14.0% 左右，明显高于土壤初始含水率。可见，膜孔灌是节水高效的局部灌溉，湿润体内土壤含水率在长时间内保持较高。

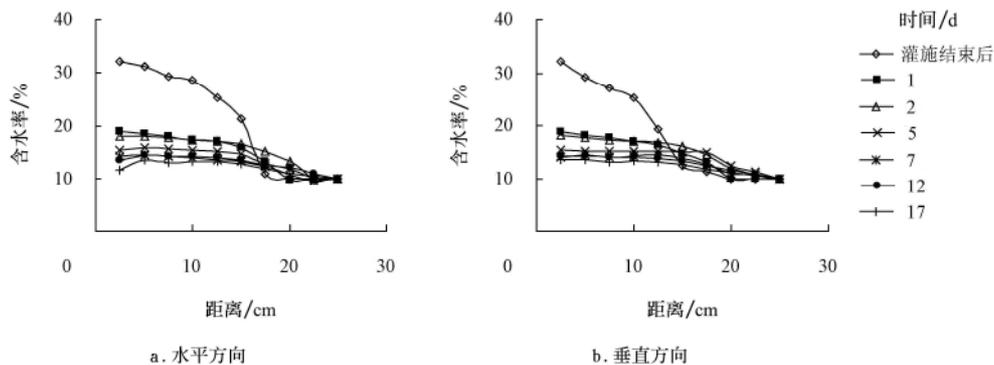


图 2 土壤含水率在水平方向和垂直方向分布曲线
Fig.2 Curves of soil water content distribution in horizontal and vertical direction

2.2 尿素转化规律

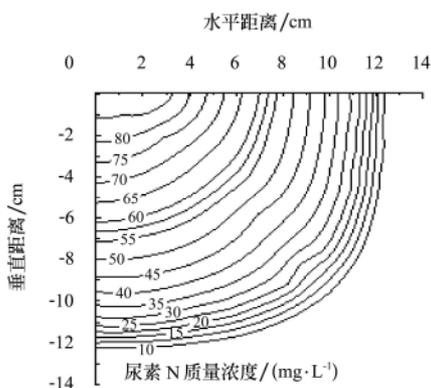
2.2.1 灌施结束后尿素分布规律

图 3 为灌施尿素 N 质量浓度为 600 mg/L 情况下膜孔肥液自由入渗 180 min 时土壤尿素含量等值线图。由图可以看出，湿润土体的尿素含量随距膜孔中心距离的增大

而逐渐减小，等值线沿着远离膜孔中心的方向由疏到密分布，在距膜孔中心 0~10 cm 的范围内均匀减小，在湿润锋附近等值线分布变密，这说明尿素分子随灌溉水进入土壤以后存在被土壤吸附的现象。

2.2.2 尿素转化过程中铵态氮含量随时间变化和分布规律

图 4 中 a、b 分别表示膜孔灌施尿素条件下水平方向和垂直方向铵态氮含量在不同时间的分布曲线。由图可以看出，铵态氮含量在水平方向和垂直方向随时间的变化基本相同，随着时间的延长，相同位置处的铵态氮含量先增大后减小。灌施尿素后 1~5 d 内，铵态氮含量逐渐增大，5 d 后，铵态氮含量逐渐减小。灌施尿素后第 5 天，尿素大量转化，铵态氮含量急剧增多，膜孔附近铵态氮含量明显大于湿润体边缘铵态氮含量，且在距离膜孔中心 12.5 cm 附近处含量明显减小。这是因为灌施尿素条件下，尿素分子和土壤水分运移保持同步，土壤剖面均有尿素分子分布，但膜孔附近含量更大，当尿素分解转化后，膜孔附近铵态氮含量大于湿润体边缘的含量。转化 17 d 时，铵态氮含量仅在膜孔附近有少量存在，远



注：入渗时间 180 min

图 3 湿润体土壤尿素含量等值线图
Fig.3 Isolines of urea content in wetting body of soil

离膜孔处下降至灌施尿素前水平，这是因为在尿素水解转化成铵态氮的同时，还存在铵态氮的硝化作用和氮素挥发损失，从而使铵态氮含量减小，表明膜孔灌施尿素条件下 17 d 基本转化完全。

图 5 分别为转化 7 d 和 12 d 时铵态氮含量在土壤剖面分布的立体图。由图可以看出，转化 7 d 和 12 d 时，

铵态氮含量在膜孔中心最大，随着距膜孔中心距离的增大而减小，且转化 7 d 时的铵态氮含量大于 12 d 时的铵态氮含量。铵态氮在剖面分布呈椭球形状，这与根系分布特点相同，铵态氮在土壤中的这种分布特点将有利于根系对铵态氮的吸收。

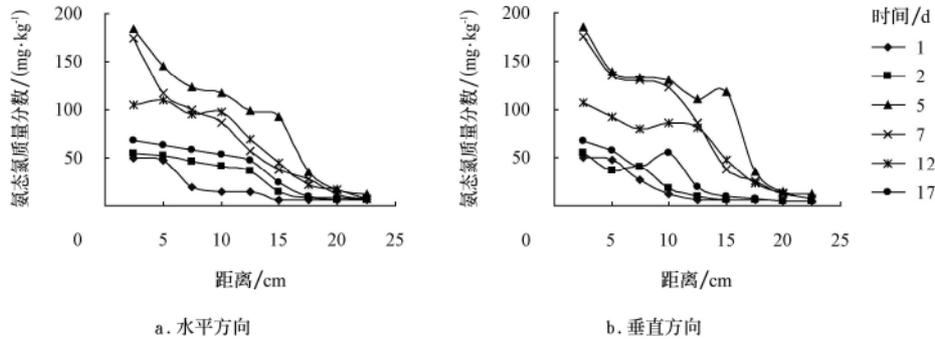


图 4 灌施尿素后土壤铵态氮含量在水平方向和垂直方向分布曲线

Fig.4 Curves of ammonium nitrogen content distribution in horizontal and vertical direction after infiltration with urea solution

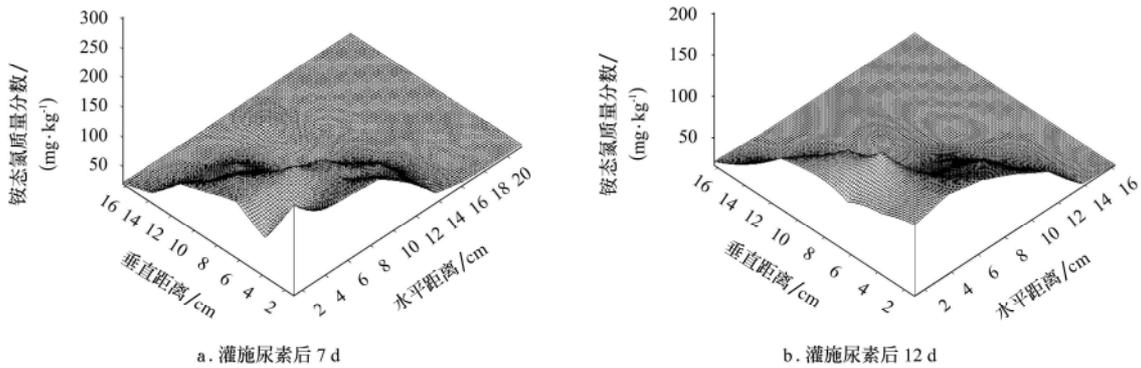


图 5 灌施尿素后 7 d 和 12 d 时土壤铵态氮含量分布立体图

Fig.5 Three-dimensional chart of ammonium nitrogen content distribution after infiltration with urea solution for seven and twelve days

2. 2. 3 尿素转化过程中硝态氮含量随时间变化和分布规律

图 6 为膜孔灌施尿素条件下水平方向和垂直方向土壤硝态氮含量在不同时间的分布曲线。可以看出，硝态氮含量在水平方向和垂直方向随时间的变化基本相同，随着时间的延长，相同位置处的硝态氮含量增大。1~7 d 内，土壤中硝态氮含量增加不大，湿润体边缘处土壤硝态氮含量大于膜孔附近的硝态氮含量，这是因为 1~7 d 内

尿素转化微弱，土壤中硝态氮含量增加较小，而在灌施尿素过程中，上层溶液在向下运移时对原有土壤中的硝态氮具有淋洗作用，将上层土壤中原有固体硝态氮溶解并带到下层，导致下层硝态氮含量增大。7 d 后，土壤中硝态氮含量明显增加，上层土壤硝态氮含量明显高于湿润体边缘含量。这是因为灌施尿素条件下，土壤剖面均有尿素分子分布，但表层含量更大，当尿素分解转化后，上层土壤硝态氮含量大于值湿润体边缘的硝态氮含量。

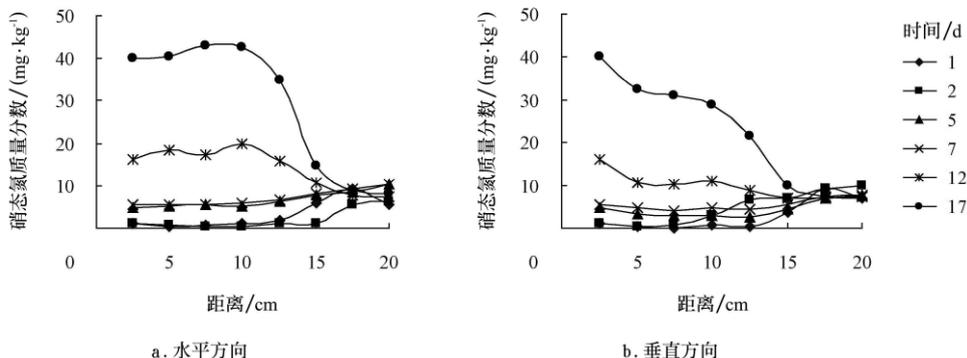


图 6 灌施尿素后土壤态硝态氮含量在水平方向和垂直方向分布曲线

Fig.6 Curves of nitric nitrogen content distribution in horizontal and vertical direction after infiltration with urea solution

图 7 中 a、b 分别为转化 7 d 和 12 d 时硝态氮含量在土壤剖面分布的立体图。由图可以看出, 转化 7 d 时, 膜孔附近的硝态氮含量低于本底值, 在湿润体边缘, 硝态氮因淋洗累积而高于本底值, 转化 12 d 时, 在整个湿润

体范围, 硝态氮含量均大于本底值, 表明转化 12 d 时硝化作用较强。由图 7 还可以看出, 水平方向的含量大于垂直方向的含量, 这是因为水平方向通气状况好, 硝化作用强。

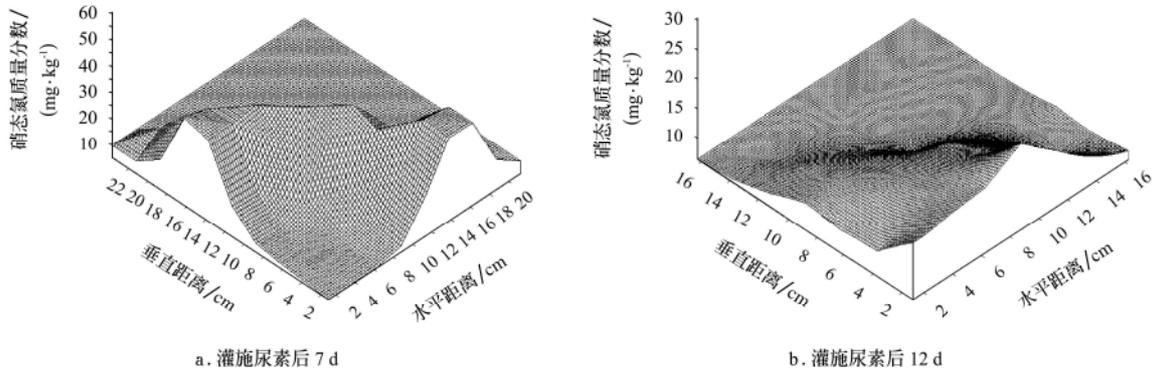


图 7 灌施尿素后 7 d 和 12 d 时土壤硝态氮含量分布立体图

Fig.7 Three-dimensional chart of nitric nitrogen content distribution after infiltration with urea solution for seven and twelve days

通过以上分析表明, 膜孔灌溉施尿素肥液后, 铵态氮和硝态氮在土壤中分布呈椭球体, 与根系分布特点相同, 这将有利于作物根系吸收氮素。转化生成的铵态氮主要分布在膜孔附近, 易造成氨化挥发损失, 但是有利于硝化作用, 生成的硝态氮主要存在膜孔附近, 有利于移动性较强的硝态氮的保存, 减小其淋溶损失。在尿素转化过程中, 土壤中同时存在铵态氮和硝态氮, 但转化生成的硝态氮含量最大值明显小于铵态氮含量最大值, 由图 4 水平方向和垂直方向土壤铵态氮含量在不同时间的分布曲线可知, 土壤铵态氮质量分数最大为 183.0 mg/kg, 由图 6 水平方向和垂直方向土壤硝态氮含量在不同时间的分布曲线可知, 土壤硝态氮质量分数最大值为 44.1 mg/kg, 表明尿素转化过程中氮素损失较大, 但是利用率低是施用尿素的普遍问题, 本文研究中尿素为普通尿素, 未加脲酶抑制剂, 如果添加尿酶抑制剂, 在减少尿素中氮素损失上会收到一定的效果, 且发挥膜孔灌溉施尿素的优点, 但尚需进一步研究验证。

3 结论与讨论

1) 膜孔灌溉施尿素后, 转化生成的铵态氮含量随转化时间先增大后减小, 铵态氮主要分布在膜孔中心附近, 随着距离膜孔中心的增大而减小。

2) 膜孔灌溉施尿素后, 硝态氮含量随转化时间的延长逐渐增多, 在 7 d 前上层土壤硝态氮含量低于本底值, 7 d 后, 硝化作用增强, 上层土壤硝态氮含量明显增大, 高于本底值。

3) 本试验是在室内无作物条件下进行的, 在田间有作物根系吸收情况下, 尿素转化和分布规律会发生变化, 今后应进行这方面的研究。

[参 考 文 献]

[1] 徐首先, 梁军. 膜孔灌简介[J]. 节水灌溉, 1999, (5): 34—36.
Xu Shouxian, Liang Jun. Introduction on film hole

irrigation[J]. Water Saving irrigation, 1999, (5): 34—36. (in Chinese with English abstract)

[2] 徐首先, 魏玉强, 聂新山, 等. 膜孔灌理论及实用技术初步研究[J]. 水土保持研究, 1996, 3(3): 23—29.
Xu Shouxian, Wei Yuqiang, Nie Xinshan, et al. Theory of film hole irrigation and practical technology research[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1996, 3(3): 23—29.

[3] 习金根. 滴灌施肥条件下氮素在土壤中迁移转化及其生物效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
Xi Jingen. Study on the Movement and Transformation of N in Soil under Fertigation and Their Effects on Crop Growth[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2003. (in Chinese with English abstract)

[4] 朱兴华, 费良军, 吴军虎. 单膜孔肥液点源入渗水分特性研究[J]. 灌溉排水, 2005, 24(6): 6—9.
Zhu Xinghua, Fei Liangjun, Wu Jinhua. Analysis of the water characteristic in film hole fertilizer solution infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 23(3): 88—90. (in Chinese with English abstract)

[5] 费良军, 程东娟, 赵新宇. 由膜孔灌田面灌水参数推求基于 Kostiakov 模型的点源入渗参数[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 88—90.
Fei Liangjun, Cheng Dongjuan, Zhao Xinyu. Determination of point source infiltration parameters based on Kostiakov model with field irrigation data in film hole irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3): 88—90. (in Chinese with English abstract)

[6] 费良军, 李发文. 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.
Fei Liangjun, Li Fawen. Mathematical models of single-line interference infiltration from film holes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(3): 68—71. (in Chinese with English abstract)

[7] 程东娟, 费良军, 尹娟. 膜孔灌单向交汇入渗减渗量和交汇界面面积试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23 (6): 105—108.
Cheng Dongjuan, Fei Liangjun, Yin Juan. Reduction volume

- and interference interface area under film hole unilateral interference infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(6): 105—108. (in Chinese with English abstract)
- [8] 费良军, 程东娟, 朱兴华. 单膜孔点源肥液入渗水氮分布特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 12—15.
Fei Liangjun, Cheng Dongjuan, Zhu Xinghua. Water and NO_3^- -N distribution characteristics in single film hole point source fertile solution infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 12—15. (in Chinese with English abstract)
- [9] 费良军, 脱云飞, 穆红文. 膜孔肥液自由入渗土壤铵态氮运移和分布特性试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(3): 490—494.
Fei Liangjun, Tuo Yunfei, Mu Hongwen. Experimentation study on transports and distribution characteristic of without restrict fertile solution infiltration under film hole irrigation [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(3): 490—494. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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.
Zhu Xinghua. Water and Nitrogen Transport Characteristics' Research under Different Fertilization in the Film Hole Infiltration[D]. Xi'an: Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [11] 穆红文. 膜孔灌自由入渗氮素运移转化特性试验与数值模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学水利水电学院, 2007.
Mu Hongwen. Water and Nitrogen Transport and Translation Characteristics Research and Numerical Simulation under Film Hole Free Infiltration[D]. Xi'an: Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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.
Dong Yunyun, Fei Liangjun, Mu Hongwen. Laboratory experimental study on effects of fertilizer solution concentration on transport characteristics of NO_3^- -N under single film hole infiltration[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2006, 22(5): 204—206. (in Chinese with English abstract)
- [13] 董玉云, 费良军, 穆红文, 等. 肥液浓度对膜孔单向交汇入渗 NO_3^- -N 运移特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 92—97.
Dong Yunyun, Fei Liangjun, Mu Hongwen, et al. Influence of fertilizer solution concentration on NO_3^- -N transport characteristics under single-line interference film hole infiltration[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, (4): 92—97. (in Chinese with English abstract)
- [14] 程东娟, 费良军, 雷雁斌, 等. 膜孔灌施条件下硝态氮迁移分布规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 237—241.
Cheng Dongjuan, Fei Liangjun, Lei Yanbin, et al. Study on the rule of nitric nitrogen movement and distribution under film hole irrigation with fertilizer[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(4): 92—97. (in Chinese with English abstract)
- [15] 穆红文, 费良军, 雷雁斌. 膜孔灌肥液自由入渗硝态氮运移特性试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 64—68.
Mu Hongwen, Fei Liangjun, Lei Yanbin. Characteristics of nitrate-N movement under film hole infiltration with fertilizer [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(2): 64—68. (in Chinese with English abstract)
- [16] 费良军, 程东娟, 贾丽华. 现代农业水土资源高效利用理论与实践[M]. 北京: 中国科学出版社, 2008: 81—86
Fei Liangjun, Cheng Dongjuan, Jia Lihua. Theory and Practice About Water and Soil Resource of Modern Agriculture[M]. 2008: 81—86. (in Chinese with English abstract)

Laboratory simulation experiment on nitrogen transformation and distribution under condition of film hole irrigation with urea solution

Cheng Dongjuan¹, Zhao Xinyu², Fei Liangjun³

(1. Hydropower College, Hebei Engineering University, Handan 056021, China;

2. Department of Hydraulic Engineering, Technology College of Nanchang, Nanchang 330099, China;

3. Water Resource Research Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstracts: For improving the use efficiency of nitrogen fertilizer and decreasing the losses of nitrogen fertilizer, the rules of nitrogen transformation and distribution under film hole irrigation with urea solution were studied through laboratory simulation experiment. The results showed that the ammonium nitrogen mainly distributed around film hole and decreased with the increasing of distance from film hole. The ammonium nitrogen content increased gradually in the early 0-5 d and decreased subsequently after the fifth day. The nitrification was weak before the seventh day and the nitrate nitrogen content in the top soil layer was lower than background value. The nitrification was enhanced after the seventh day. The nitrate nitrogen content in the top soil layer was more than background value; the nitrate nitrogen content in the horizontal direction was more than in the vertical direction after the seventh day. During the course of urea transformation, the decrement of ammonium nitrogen was far more than the increment of nitrate nitrogen. The research results provide reference for further study of film hole irrigation and fertilizer application.

Key words: irrigation, fertilizers, urea, nitrogen fertilizers, transformation, distribution