

不同暗管布置下棉田排水的硝态氮流失量分析

曾文治, 黄介生*, 谢华, 吴谋松, 彭振阳, 徐驰

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 为了研究不同暗管控制水深、暗管间距和暗管埋深条件下暗管排水中硝态氮流失量的变化规律, 将暗管控制水深、暗管间距和暗管埋深的变化范围分别设为 30~80 cm、8~40 m 和 80~120 cm, 采用通用旋转组合设计确定试验方案, 并利用 DRAINMOD 模型对不同试验方案下暗管排水中硝态氮的流失量进行数值模拟。模拟结果表明: 单一增加暗管出口控制水深或暗管埋深以及单一减小暗管间距都会使暗管排水中硝态氮流失量增加。暗管间距和暗管埋深对暗管排水中硝态氮流失量的影响要比暗管出口控制水深的影 响大, 当暗管出口控制水深小于 40 cm 时, 暗管埋深对其影响大于暗管间距; 而当暗管出口控制水深大于 70 cm 时, 暗管间距对其影响大于暗管埋深。当暗管埋深不变时, 增大暗管间距的同时减小暗管出口控制水深有助于减小暗管排水中的硝态氮流失量。

关键词: 氮素, 数值方法, 模型, 暗管布置, 硝态氮流失量, DRAINMOD

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.04.014

中图分类号: S227.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-04-0089-05

曾文治, 黄介生, 谢华, 等. 不同暗管布置下棉田排水的硝态氮流失量分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 89-93.

Zeng Wenzhi, Huang Jiasheng, Xie Hua, et al. Analysis of nitrate-nitrogen loss under different underground pipe layout[J].

Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 89-93. (in Chinese with English abstract)

0 引言

在农业生产活动中, 氮素等营养物质、农药以及其他有机或无机污染物通过农田的地表径流和农田渗漏常常造成对水环境的污染^[1-4]。大量研究表明^[5-7], 地下排水能够有效减少农田排水量及营养元素钾和磷的损失, 但是地下排水中的硝态氮流失在一定程度上造成了地表水和地下水水质的恶化。与传统的自由排水不同, 暗管控制排水条件下, 地下水位抬高, 土壤的湿度与厌氧条件加强, 有利于微生物的反硝化作用, 因此可以降低排水中的氮素流失^[8-11]。在这一方面, 我国学者也进行了一定的研究, 温季等^[12]采用 DRAINMOD 模型对淮北砂姜黑土区暗管排水氮素流失模拟得出暗管排水强度增大会增加氮肥的淋失量。罗绮等^[13]在银南灌区通过稻田明沟控制排水试验得出, 提高田间沟渠的排水深度能够有效减小排水量。张瑜芳等^[14]在上海青浦地区进行田间试验和数值模拟, 研究了排水条件下氮素的转化、运移, 得出暗管排水中的硝态氮流失量与暗管排水量之间存在线性关系。王友贞等^[15]通过在平原区农田排水大沟设置控制设施, 研究其对地下水的调控效果, 得出利用农田排水大沟进行控制排水可以有效避免因排水造成的地下水

资源流失。但现有的研究或偏重于农田内部, 或模型局限性较大或只是单一考虑了暗管布置的某一个因素的影响, 尚无有关旱地地下控制排水的暗管出口水深、暗管间距、暗管埋深三者交互作用对暗管排水中硝态氮流失量的研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选在荆州市四湖工程管理局丫角排灌试验站。试验站位于四湖水系中区, 东经 112°31', 北纬 30°21', 海拔高程 29.4 m。试验场地势平坦, 土壤肥沃, 土质为中粘壤土, 比重为 2.85 g/cm³, 孔隙率为 65%, 田间持水量 0~15 cm 内为 47.3%, 16~40 cm 内为 30.7%。多年平均气温 16.5℃, 多年平均降雨量 1 122 mm, 多年平均水面蒸发量 977.4 mm, 多年平均日照时数 1 552 h, 无霜期约 280 d, 具有典型的平原湖区特性, 适合种植多种农作物。

试验区面积 3 800 m², 为一长 76 m, 宽 50 m 的矩形田块, 沿长度方向将其分为 5 个相邻的小区(如图 1 所示), 相邻小区之间用深 1.2 m, 宽 0.2 m 的硬化水泥田埂加防渗膜分隔开, 在田块的南端有一条深 1.5 m 的排水沟。试验田块 1 m 深处理深暗管排水, 暗管间距为 8 m, 在暗管出口处设置如图 2 所示的水位控制装置, 根据连通器原理通过改变各个小区的暗管出口高程来起到控制排水的作用。

1.2 DRAINMOD 模型基本原理及输入参数

DRAINMOD 模型以排水管(沟)中部从地表到不透水层的单位面积土体作为水量平衡的均衡体^[16-17], 在给 定模拟时段内, 其地下水平衡方程为

$$\Delta V = D + ET + DS - F \quad (1)$$

收稿日期: 2011-05-11 修订日期: 2011-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目“不同尺度条件下考虑多致灾因子的洪涝灾害工程标准研究”资助(50909074)

作者简介: 曾文治(1989-), 男, 博士生, 主要研究方向为水土资源高效利用。武汉 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 430072。

Email: zengwenzhi1989@126.com.

※通信作者: 黄介生(1962-), 男, 教授, 主要从事水土资源高效利用、农村水环境管理和灌区用水研究。武汉 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 430072. Email: jshuanga@public.wh.hb.cn.

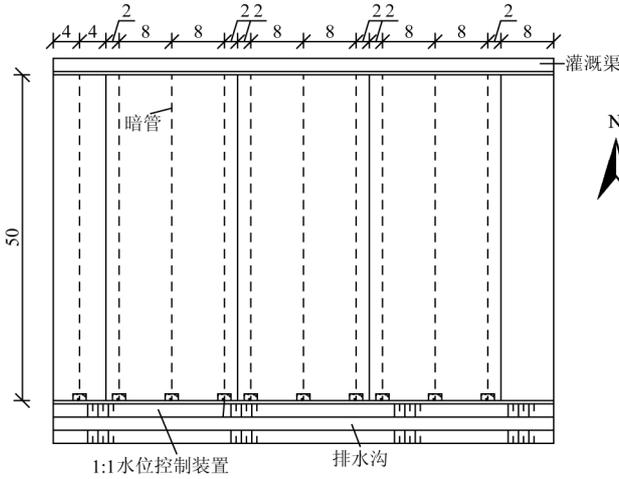
其中, ΔV 为土体中的水量变化, cm; D 为水平方向的排水量, cm; ET 为腾发量, cm; DS 为深层渗漏量, cm; F 为地表入渗量, cm。

式中, c 为土壤溶液中硝态氮的浓度, kg/m^3 ; θ 为土壤体含水率, m^3/m^3 ; q 为垂向土壤水通量, m/s ; z 为沿着水流运动方向的垂直坐标, m ; t 为时间, s ; Γ 为源汇项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; D 为溶质的弥散系数, m^2/s 。

模型的主要输入参数如表 1 所示。

表 1 模型主要输入参数

项目	参数	数值
排水系统	暗管有效半径/cm	4.00
	不透水层埋深/cm	215
	饱和含水量/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	0.55
土壤特性	凋萎点含水量/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	0.16
	饱和水力传导率/ $(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	1.35
	体积质量/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.85
作物参数	棉花种植日期	4 月 15 日
	生长期/d	199



注: 单位为 m。

图 1 试验区布置简图
Fig.1 Schematic layout of the test area

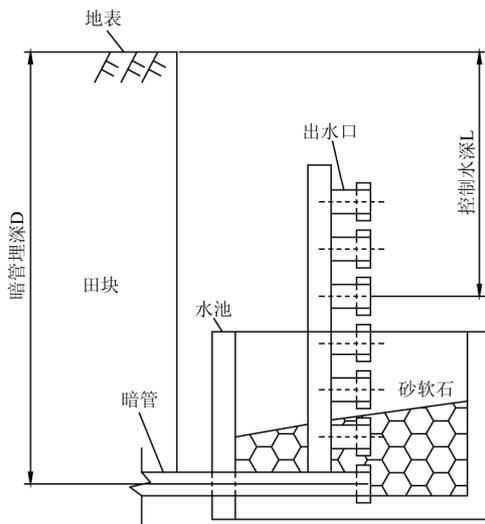


图 2 水位控制装置
Fig.2 Schematic of water table controlling device

在给定模拟时段内, 均衡体的地表水平衡方程为

$$\Delta S = P - F - RO \quad (2)$$

其中, P 为降雨量, cm; F 为入渗量, cm; ΔS 为地表蓄水量的变化量, cm; RO 为地表径流量, cm。

模型中的降雨入渗量采用 Green-Ampt 入渗方程计算, 地下排水量采用胡浩特稳定流^[17]公式计算, 通过输入气象、土壤、作物和排水系统设计与管理等参数, 进行一个水均衡系统长期的水动态模拟, 并输出地下水位的动态过程、土壤含水率和蒸腾蒸发量的变化、地表径流和地下排水的水量等水均衡计算结果. 将水均衡结果作为氮运移的输入, 假定非饱和区为垂向一维运动, 则土壤溶液中硝态氮的运移方程可以用对流—弥散方程描述为

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(\theta D \frac{\partial c}{\partial z}) - \frac{\partial(qc)}{\partial z} + \Gamma \quad (3)$$

1.3 试验设计

模拟试验设置采用暗管出口控制水深 (L)、暗管间距 (S)、暗管埋深 (D) 三因素五水平通用旋转组合设计^[18], 由于试验区的暗管控制水深的变化范围为 30~80 cm, 暗管间距为 8 m, 地下水位为 1 m 左右, 为更好的体现试验区的实际情况, 模拟中将控制水深的变化范围设为 30~80 cm, 将暗管间距的变化范围设为 8~40 m, 将暗管埋深的变化范围设为 80~120 cm, 具体的试验方案见表 2。根据表 2 确定的试验方案, 对 2008 年 8 月 15 日的降雨过程采用 DRAINMOD 模型进行数值模拟, 并对降雨后 24 h 内暗管排水中硝态氮流失量的情况进行分析, 其中硝态氮的流失量由降雨后 24 h 内暗管排水中硝态氮的平均浓度与相应排水量的乘积确定。

表 2 控制排水方案设计
Table 2 Design of controlled drainage

处理	水平因子			实际距离		
	X_1	X_2	X_3	L/cm	S/m	D/cm
1	1	1	1	70	34	112
2	1	1	-1	70	34	88
3	1	-1	1	70	14	112
4	1	-1	-1	70	14	88
5	-1	1	1	40	34	112
6	-1	1	-1	40	34	88
7	-1	-1	1	40	14	112
8	-1	-1	-1	40	14	88
9	-1.628	0	0	30	24	100
10	1.628	0	0	80	24	100
11	0	-1.628	0	55	8	100
12	0	1.628	0	55	40	100
13	0	0	-1.628	55	24	80
14	0	0	1.628	55	24	120
15	0	0	0	55	24	100
16	0	0	0	55	24	100
17	0	0	0	55	24	100
18	0	0	0	55	24	100
19	0	0	0	55	24	100
20	0	0	0	55	24	100

注: X_1 为控制水深因子; X_2 为暗管间距因子; X_3 为暗管埋深因子; L 为控制水深, cm; S 为暗管间距, m; D 为暗管埋深, cm。下同。

2 结果与分析

2.1 单一暗管布置方式对暗管排水中硝态氮流失量的影响

2.1.1 暗管出口控制水深的影响

从表 3 可以看出，暗管排水中硝态氮流失量随着暗管出口控制水深的减小而减小。一方面是由于控制水深减小，排水在田间的滞留时间加大，从而降低了排水中氮素以及沉淀物的流失；另一方面，随着控制水深的减小，暗管排水量也呈现出减小的规律。已有的研究表明^[19-20]，在排水条件下暗管出流的氮素含量与其流量过程总体上有着较好的相关一致性。其中处理 9(L₃₀S₂₄D₁₀₀)与处理 15(L₅₅S₂₄D₁₀₀)的硝态氮流失量相比，降低幅度不大的原因主要是 30 cm 处恰好是土壤的耕作层，其中氮素的含量较其他土层高，将排水水位控制在这一深度使得土壤的干湿交替变化频繁，有利于氮素的硝化，因此，排水冲刷淋洗使得硝态氮更易流失。

表 3 控制水深的影响
Table 3 Effects of controlled water depth

处理方式	控制水深/cm	暗管排水量/(m ³ ·hm ⁻²)	NO ₃ -N 流失量/(g·hm ⁻²)
处理 9/L ₃₀ S ₂₄ D ₁₀₀	30	4.22	347.03
处理 15/L ₅₅ S ₂₄ D ₁₀₀	55	4.72	348.56
处理 10/L ₈₀ S ₂₄ D ₁₀₀	80	5.01	390.83

2.1.2 暗管间距的影响

从表 4 得出，随着暗管间距的增大，暗管排水量和硝态氮的流失量都显著降低，处理 12(L₅₅S₄₀D₁₀₀)与处理 11(L₅₅S₈D₁₀₀)相比，暗管排水量降低了 89.2%，硝态氮流失量降低了 39.69%。这主要是因为随着暗管间距的增加，水分从土壤流向暗管的坡降变缓，更多的水分滞留在土壤中没有从暗管排出。表 4 的结果说明，在满足作物生长对排涝排渍要求的前提下，通过适当增加暗管间距，可以起到降低氮素流失量的效果。

表 4 暗管间距的影响
Table 4 Effects of underground pipe space

处理方式	暗管间距/m	暗管排水量/(m ³ ·hm ⁻²)	NO ₃ -N 流失量/(g·hm ⁻²)
处理 11/L ₅₅ S ₈ D ₁₀₀	8	27.88	496.02
处理 15/L ₅₅ S ₂₄ D ₁₀₀	24	4.72	348.56
处理 12/L ₅₅ S ₄₀ D ₁₀₀	40	3.01	299.16

2.1.3 暗管埋深的影响

在暗管出口控制水深，暗管间距等其他因素相对一致的情况下，硝态氮的流失量随着暗管埋深的增大而增大(表 5)。当暗管埋深大于 100 cm 时，硝态氮的流失量增加明显，表现为处理 14(L₅₅S₂₄D₁₂₀)的硝态氮流失量比处理 15(L₅₅S₂₄D₁₀₀)增大 29.06%，而处理 15 与处理 13(L₅₅S₂₄D₈₀)相比，其增幅仅为 11.93%。但是随着暗管埋深的增大，暗管排水量呈现出减小的规律，这与硝态氮流失量的变化规律相反，原因可能是本次模型模拟的只是降雨后 24 h 的暗管排水情况，在模拟时间内，埋深较深的暗管排水过程还没有全部完成所致，对于长时间尺

度上，暗管埋深变化引起的排水与氮素流失规律还有待进一步研究。

表 5 暗管埋深的影响
Table 5 Effects of depth of underground pipe

处理方式	暗管埋深/cm	暗管排水量/(m ³ ·hm ⁻²)	NO ₃ -N 流失量/(g·hm ⁻²)
13	80	6.03	311.42
15	100	4.72	348.56
14	120	3.44	449.86

2.2 2 种暗管布置方式交互作用对暗管排水中硝态氮流失量的影响

从图 3 可以看出，暗管排水中硝态氮流失量处理 1(L₇₀S₃₄D₁₁₂) < 处理 4(L₇₀S₁₄D₈₈)，处理 5(L₄₀S₃₄D₁₁₂) > 处理 8(L₄₀S₁₄D₈₈)，因此根据模拟结果，当暗管出口控制水深大于 70 cm 时，暗管间距对硝态氮流失量的影响大于暗管埋深，当暗管出口控制水位小于 40 cm 时，暗管埋深对硝态氮流失的影响大于暗管间距。而当暗管出口控制水深为 40~70 cm 时，暗管间距和暗管埋深交互作用对硝态氮流失量的影响程度还有待进一步研究。此外，处理 2(L₇₀S₃₄D₈₈)与处理 3(L₇₀S₁₄D₁₁₂)、处理 6(L₄₀S₃₄D₈₈)与处理 7(L₄₀S₁₄D₁₁₂)相比，硝态氮流失量降幅分别高达 32.45%和 40.58%，可知同时改变暗管间距和埋深可以较大程度的减少暗管排水中硝态氮的流失量。

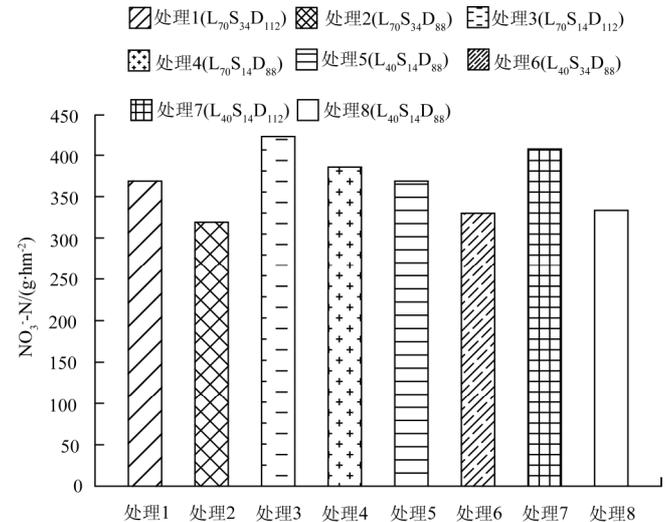


图 3 暗管出口控制水深与暗管间距交互作用
Fig.3 Interaction between controlled water depth and underground pipe space

由暗管排水中硝态氮的流失量处理 2(L₇₀S₃₄D₈₈) < 处理 5(L₄₀S₃₄D₁₁₂)、处理 4(L₇₀S₁₄D₈₈) < 处理 7(L₄₀S₁₄D₁₁₂)可知，当暗管间距保持不变时，暗管埋深对硝态氮流失量的影响大于暗管出口控制水深。而当暗管埋深和暗管出口控制水深同时减小或者同时降低时，暗管排水中硝态氮流失量也呈现出减小的规律，这与单一减小暗管埋深或单一降低暗管出口控制水深对暗管排水中硝态氮流失量的影响是一致的。

由暗管排水中硝态氮流失量处理 1(L₇₀S₃₄D₁₁₂) < 处

理 7(L₄₀S₁₄D₁₁₂)、处理 2(L₇₀S₃₄D₈₈) < 处理 8(L₄₀S₁₄D₈₈) 可以认为, 当暗管埋深保持不变时, 暗管间距对硝态氮流失量的影响大于暗管出口控制水深。而在减小暗管出口控制水深的同时增加暗管间距, 暗管排水中硝态氮流失量的变化规律是减小的, 这与单一减小暗管出口控制水深或是单一增加暗管间距对其的影响是一致的; 当增加暗管出口控制水深的同时减小暗管间距, 暗管排水中硝态氮流失量呈现出增大的规律, 这同样与单一增加暗管出口控制水深或是单一减小暗管间距对暗管排水中硝态氮流失量的影响是一致的。

2.3 三种暗管布置方式交互作用对暗管排水中硝态氮流失量的影响

从图 4 可知, 暗管出口控制水深、暗管间距、暗管埋深这 3 个因素高低的不同组合, 将影响暗管排水中的硝态氮流失量。处理 4(L₇₀S₁₄D₈₈) 比处理 5(L₄₀S₃₄D₁₁₂) 增加了 4.58%, 可见暗管出口控制水深和暗管埋深增大, 暗管间距减小的情况下, 暗管排水中的硝态氮流失量略有增加, 再次说明随着控制水深的增大, 暗管间距对硝态氮流失量的影响逐渐强于暗管埋深。硝态氮流失量处理 6(L₄₀S₃₄D₈₈) < 处理 3(L₇₀S₁₄D₁₁₂) 可知, 当暗管出口控制水深 L、暗管间距 S、暗管埋深 D 都朝着增大硝态氮流失量的方向变化时, 即在增大暗管出口控制水深、减小暗管间距的同时, 增大暗管埋深, 暗管排水中硝态氮流失量显著增加。具体而言, 暗管排水中硝态氮的流失量处理 3(L₇₀S₁₄D₁₁₂) 比处理 6(L₄₀S₃₄D₈₈) 增加了 45.76%, 这说明了在暗管排水系统设计时, 同时改变暗管出口控制水深、暗管间距、暗管埋深这三个因素对暗管排水中硝态氮流失量的影响要大于单一改变其中一个或两个因素。而硝态氮流失量处理 2(L₇₀S₃₄D₈₈) < 处理 7(L₄₀S₁₄D₁₁₂), 则进一步说明了暗管埋深和暗管间距对硝态氮流失量的影响强于暗管出口控制水深。

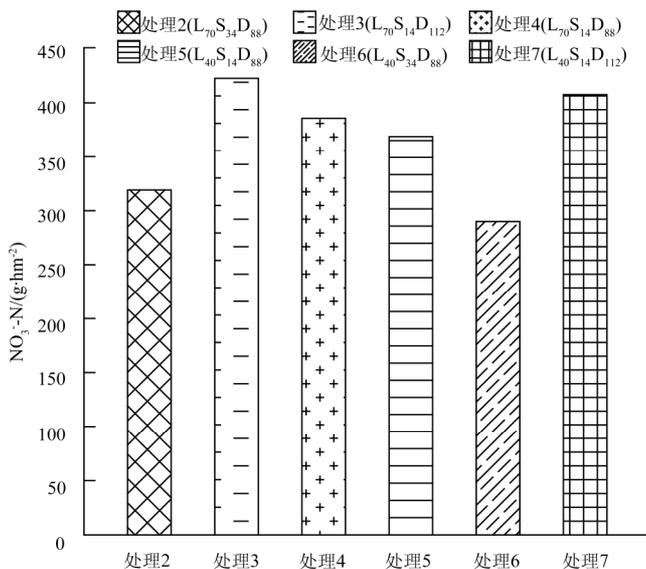


图 4 暗管埋深、间距、出口控制水深三者交互作用

Fig.4 Interaction of underground pipe, pipe space and controlled water depth

3 结论

1) 暗管排水中硝态氮的流失量随着暗管间距的增大而减小, 随着暗管埋深的增加而增大, 随着暗管出口控制水深的增加而增大, 但是当暗管控制水深设定在作物耕作层时, 暗管排水中硝态氮的流失量减小得不明显。

2) 在气象、土壤以及作物等因素一致的情况下, 暗管埋深和暗管间距对暗管排水中硝态氮流失量的影响都大于暗管出口控制水深对其的影响; 在暗管出口控制水深小于 40 cm 时, 暗管埋深对暗管排水中硝态氮流失量的影响大于暗管间距; 在暗管出口控制水深大于 70 cm 时, 暗管间距对暗管排水中硝态氮流失量的影响大于暗管埋深。

3) 当暗管埋深不变时, 增大暗管间距的同时减小暗管出口控制水深有助于减小暗管排水中的硝态氮流失量。

[参 考 文 献]

- [1] 吕殿清, 同延安, 孙本华. 氮肥施用对环境影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 8—15.
- [2] 李贵宝, 尹澄清, 单宝庆. 面源污染控制与管理研究的概况与展望[J]. 农业环境保护, 2001, 20(3): 190—193.
- [3] 黄满湘, 章申, 张国梁, 等. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 147—154. Huang Manxiang, Zhang Sheng, Zhang Guoliang, et al. Losses of Nitrogen Nutrient in Overland Flow from Farmland in Beijing under Simulated Rainfall Conditions[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(1): 147—154. (in Chinese with English abstract)
- [4] 华小梅, 江希流. 我国农药环境污染与危害的特点及控制对策[J]. 环境科学研究, 2000, 13(3): 56—61. Hua Xiaomei, Jiang Xiliu. Characteristics and Control Countermeasures of Pesticide Pollution and Its Damage on Environment in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(3): 56—61. (in Chinese with English abstract)
- [5] Logan T J, Eckert D J, Beak D G. Tillage crop and climate effects on runoff and tile drainage losses of nitrate and four herbicides[J]. Soil tillage res, 1993, 30(1): 75—103.
- [6] Randall G W, Huggins D R, Russell M P, et al. Nitrate losses through subsurface tile drainage in conservation reserve program, alfalfa, and row crop systems[J]. J. Environ. Qual., 1997, 26(5): 1240—1247.
- [7] Bengtson R L, Carter C E, Morris H F, et al. Reducing water pollution with subsurface drainage[J]. Trans. ASAE, 1984, 27(1): 80—83.
- [8] Drury C E, Tan C S, Gaynor J D, et al. Optimizing corn production and reducing nitrate losses with water bable control-subirrigation[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1997, 61(3): 889—895.
- [9] Cooper R L, Fausey N R, Streeter J G. Yield potential of soybean grown under a subirrigation/drainage water management system[J]. Agron. J, 1991, 83(5): 884—887.
- [10] 冯绍元, 郑耀泉. 农田氮素的转化与损失及其对水环境的影响[J]. 农业环境保护, 1996, 15(6): 277—280.

- Feng Shaoyuan, Zheng Yaoquan. Transformations and Losses of the Agricultural Nitrogen and Its Effects on Water Quality[J]. *Agro-environmental Protection*, 1996, 15(6): 277—280. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张荣社, 周琪, 李旭东, 等. 自由表面人工湿地脱氮效果中试研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3(12): 9—11. Zhang Rongshe, Zhou Qi, Li Xudong, et al. Pilot study on nitrogen removal in surface constructed wetland[J]. *Techniques and Equipment For Environ. poll. cont*, 2002, 3(12): 9—11. (in Chinese with English abstract)
- [12] 温季, 宰松梅, 郭树龙, 等. 淮北砂姜黑土区暗管排水氮素流失模拟研究[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(5): 104—106. Wen Ji, Zai Songmei, Guo Shulong, et al. Simulation of Nitrogen Outflow in Huaibei Shajiang Black Soil with Underground Drainage[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(5): 104—106. (in Chinese with English abstract)
- [13] 罗纨, 贾忠华, R W Skaggs, 等. 利用 DRAINMOD 模型模拟银南灌区稻田排水过程[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(9): 53—57. Luo Wan, Jia Zhonghua, R W Skaggs, et al. Rice fields drainage process simulation in Yinnan irrigation district with DRAINMOD model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(9): 53—57. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张瑜芳, 张蔚榛, 沈荣开, 等. 排水农田氮素运移转化及流失规律的研究[J]. *水动力学研究与进展 (A 辑)*, 1996, 11(3): 251—260. Zhang Yufang, Zhang Weizhen, Shen Rongkai, et al. The Study of the Transport, Transformation and Losses of Nitrogen in Drained Agricultural Lands[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1996, 11(3): 251—260. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王友贞, 王修贵, 汤广, 等. 大沟控制排水对地下水水位影响研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 74—77. Wang Youzhen, Wang Xiugui, Tang Guang, et al. Effects of controlled drainage of main ditch on groundwater table[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(6): 74—77. (in Chinese with English abstract)
- [16] Skaggs R W. Field evaluation of a water management simulation model[J]. *Trans. ASAE*, 1982, 25(3): 667—674.
- [17] Helwig T G, Madramootoo C A, Dodds G T. Modelling nitrate losses in drainage water using DRAINMOD 5.0[J]. *Agric Water Manage*, 2002, 56(2): 153—168.
- [18] 李志西, 杜双奎, 等. 试验优化设计与统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 212—242.
- [19] Kanwar R S, Johnson H P, Baker J L. Comparison of simulated and measured nitrate losses in tile effluent[J]. *Trans. of ASAE*, 1983, 26(5): 1451—1457.
- [20] Kanwar, R S. Simulated effects of fertilizer management on nitrate loss with tile drainage water for continuous corn[J]. *Trans. of ASAE*, 1984, 27(5): 1396—1399.
- [21] 高允彦. 正交及回归试验设计方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988: 129—180.

Analysis of nitrate-nitrogen loss under different underground pipe layout

Zeng Wenzhi, Huang Jiesheng^{*}, Xie Hua, Wu Mousong, Peng Zhenyang, Xu Chi

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to simulate the law of nitrogen loss under different weir depths, drainage spaces and drainage depths in underground pipes, field experiment was conducted and nitrogen loss was simulated by DRAINMOD 6.0. The ranges for three factors were set to be 30-80 cm, 8-40m, and 80-120 cm respectively, and the values of three experimental parameters in each simulation were determined with the method of General Rotation Design. The results indicated that the amount of nitrogen loss in drainage tended to be larger as the weir depth or the drainage depth increased, or the drainage space decreased alone. The effects of drainage space and drainage depth on nitrogen loss were greater than those of weir depth. The weir depth was less than 40 cm, drainage depth had greater influence on nitrogen loss than drainage space, and there was an opposite result when the weir depth was deeper than 70 cm. If the drainage depth was the same, the effective way to reduce the nitrogen loss in drainage was to expand the drainage space and decrease the weir depth at the same time.

Key words: nitrogen, numerical methods, models, pipe layout, Nitrate-nitrogen loss, DRAINMOD