

改进暗管排水条件下氮素分布特性模拟分析

陶园^{1,2}, 许迪², 任贺静¹, 王少丽^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 为探究改进暗管排水的环境效应, 基于田间试验数据, 采用 HYDRUS 模型对模拟参数进行率定验证, 模拟分析长期排水条件下改进暗排与常规暗排的排水特征、排水中的氮素含量以及土壤氮素的分布情况。结果表明, 改进暗排作用下土壤硝化作用有所增强, 改进暗排具有快速降低地下水水位的作用; 与常规暗排相比, 改进暗排对于氨氮的削减具有较好作用, 可减少氨氮 46%, 但也增加了 17% 的硝态氮量; 对于土壤中氮素分布来说, 暗管排水长期作用下, 土层铵态氮和硝态氮含量最小值分别位于 40~60 cm 和 20~40 cm 土层, 模拟结束时土层铵态氮和硝态氮含量最小值仅分别为初始值的 5% 和 10% 左右, 常规暗排与改进暗排 40~60 cm 土层的铵态氮含量相差最小, 差值仅为 0.3 mg · kg⁻¹, 与二者暗管层上部土壤硝态氮含量相差不大。

关键词: 改进暗管排水; 氮素分布; 铵态氮; 硝态氮

中图分类号: S276 **文献标志码:** A

Simulation of nitrogen distribution characteristics under improved subsurface drainage

TAO Yuan^{1,2}, XU Di², REN Hejing¹, WANG Shaoli^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, 100048, China;

2. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research (Beijing), Beijing, 100048, China)

Abstract: In order to explore the environmental effect of the improved subsurface drainage, this project simulated the drainage discharge, nitrogen (N) concentration and the distribution of soil N content under long-term drainage by improved subsurface drainage system. HYDRUS has been used for parameter calibration and verification based on the field data. The results showed that the soil nitrification increased under improved subsurface drainage system and the improved subsurface drainage could lower groundwater table faster and has better effect on ammonia N reduction. Compared with conventional subsurface drainage, the improved subsurface drainage system made 46% decrease in ammonia N and 17% increase in nitrate N. For the distribution of soil N, under long-term drainage, the minimum soil ammonia N and nitrate N contents were in 40~60 cm and 20~40 cm soil layer, respectively. At the end of simulation, the minimum soil ammonia N and nitrate N were only at 5% and 10% of initial content, respectively. Compared with conventional subsurface drainage, the soil ammonia N content in 40~60 cm soil layer and soil nitrate N content above the pipe level had small difference of 0.3 mg · kg⁻¹.

Keywords: improved subsurface drainage; nitrogen distribution; ammonia N; nitrate N

农业面源污染对于农田水环境具有重要影响, 过多的氮磷污染物通过地表径流直接进入水体会导致地表水体富营养化^[1-3], 而入渗的氮磷进入含水层会引起地下水污染物超标, 很多地区出现地下水硝酸盐含量超标现象^[4-5]。农田排水是农业面源污染

进入水体的主要途径, 选择合理的农田排水技术, 营造良好的农田水环境是发展生态农业的重要步骤。

暗管排水作为具有较大发展潜力的农田排水方式, 其氮素淋失变化规律尚未有统一的结论。主要原因在于已有研究大多集中于试验分析, 土壤氮

素初始背景值存在差别,水流经过土壤进入暗管排出的过程中,土壤对氮素有吸附、转化等作用,同时水流对土壤中的氮素也具有淋洗的作用,每个环节均影响着暗管排水中的氮素含量^[6]。改进暗管排水作为一种新型的暗管排水方式,可以有效增大暗管排水流量、加速地表涝水排除以及快速降低地下水位^[7-9]。然而不同于常规暗管排水,改进暗管排水设置了大范围的反滤体,其可以有效改善土壤的理化性质,同时也会影响土壤中氮素的迁移、转化和吸附能力,已有试验研究初步表明改进暗管排水可以有效减少排水中氨氮浓度,但却增加硝态氮浓度^[10]。本研究基于田间试验分析,采用率定验证后的 HYDRUS 模型参数,考虑长期排水作用下,对比分析改进暗排与常规暗排作用下排水中的氮素含量以及土壤氮素分布情况,为改进暗管排水的推广应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验布设

田间试验于 2017 年在淮北平原新马桥农水综合试验站(117°22' E, 33°09' N)进行,设置了 5 个 18 m(宽度)×17 m(长度)的试验小区,包括卵石反滤体改进暗排小区、秸秆反滤体改进暗排小区、分层级配砂石反滤体改进暗排小区、混合级配砂石反滤体改进暗排小区以及常规暗排小区。为防止不同试验方案间的水流交互影响,每个试验小区铺设 3 根暗管,暗管间距 6 m,暗管长度 17 m。暗管采用

直径 75 mm、出厂前预包土工布的打孔波纹塑料管。考虑到当地农田排水的主要任务是除涝降渍,且耕地以旱作为主,在满足降渍设计要求的条件下,选择暗管埋深 0.8 m。为便于观测以及较小范围施工,反滤体的选择宽度为 0.4 m、高度为 0.5 m,回填表土厚度(耕作层厚度)为 0.3 m。所有暗管的排水均经由地下管道连接系统流入 2 个观测井。当降雨产生地表积水或地下水埋深小于 30 cm 时开展排水试验,每次排水试验通常持续 1 d。根据地下水位条件,2017 年 9 月 6 日和 12 日开展了 2 次排水试验,并进行了全要素监测,主要包括分别于排水开始后 60、220、380 min 以及 70、260、440 min 对排水中氮素浓度进行取样测量,包括暗管排水流量、排水前后土壤分层含水率、暗管中部氮素含量等。本文主要对卵石反滤体改进暗排和常规暗排进行对比分析,通过双环试验测定得到卵石和常规暗排小区渗透系数分别为 0.916 m·d⁻¹和 0.805 m·d⁻¹,土壤氮素背景值详见率定验证部分。

1.2 数值模拟

HYDRUS 可用于模拟非均质不规则结构,模型采用修正的 Richards 方程描述二维饱和及非饱和土壤水流运动,采用 VG 模型描述土壤水力运动特性^[11]。对于土壤氮素来说,在模拟过程中主要包括两个过程,一是铵态氮硝化反应成为硝态氮,土壤矿化固持作用以及表层蒸发作用产生的铵态氮量变化,二是硝态氮反硝化形成氮气。根据氮素循环过程,得到溶质运移方程如下:

$$\frac{\partial \theta c_{\text{NH}_4^+}}{\partial t} + \frac{\partial \rho s_{\text{NH}_4^+}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\theta D_{ij}^w \frac{\partial c_{\text{NH}_4^+}}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial q_i c_{\text{NH}_4^+}}{\partial x_i} - (\mu_w^{\text{NH}_4^+} + \mu_w'^{\text{NH}_4^+}) \theta c_{\text{NH}_4^+} - (\mu_s^{\text{NH}_4^+} + \mu_s'^{\text{NH}_4^+}) \rho s_{\text{NH}_4^+} + r_w^{\text{NH}_4^+} \theta + r_s^{\text{NH}_4^+} \rho - S c_r^{\text{NH}_4^+} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta c_{\text{NO}_3^-}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\theta D_{ij}^w \frac{\partial c_{\text{NO}_3^-}}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial q_i c_{\text{NO}_3^-}}{\partial x_i} + \mu_w^{\text{NH}_4^+} \theta c_{\text{NH}_4^+} + \mu_s^{\text{NH}_4^+} \rho s_{\text{NH}_4^+} - (\mu_w^{\text{NO}_3^-} + \mu_w'^{\text{NO}_3^-}) \theta c_{\text{NO}_3^-} - S c_r^{\text{NO}_3^-} \quad (2)$$

式中, θ 为土壤含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); $c_{\text{NH}_4^+}$ 、 $c_{\text{NO}_3^-}$ 分别为土壤溶质中铵态氮和硝态氮的浓度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); $s_{\text{NH}_4^+}$ 为吸附于土壤的铵态氮含量($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), $s_{\text{NH}_4^+} = K_d \cdot c_{\text{NH}_4^+}$, K_d 为吸附系数($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$); q_i 为 i 的水分通量($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); D_{ij} 为弥散系数($\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$); $\mu_w^{\text{NH}_4^+}$ 、 $\mu_s^{\text{NH}_4^+}$ 为一阶反应常数,此处为铵态氮挥发系数(min^{-1}); $\mu_w^{\text{NH}_4^+}$ 、 $\mu_s^{\text{NH}_4^+}$ 为类一阶反应常数,此处为氨氮硝化系数(min^{-1}); ρ 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); $r_w^{\text{NH}_4^+}$ 、 $r_s^{\text{NH}_4^+}$ 为零阶反应常数,此处为土壤的矿化固持作用系数(min^{-1}); S 为水流运动方程中的源汇项, c_r 为

源汇项的浓度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); $\mu_w^{\text{NO}_3^-}$ 为类二阶反应常数,此处为硝态氮反硝化系数(min^{-1})。

模型外边界设置为无流量边界,考虑到田间试验每次排水仅开启 1 d 时间,为了更好模拟 2 次排水暗管边界设置为变流量边界,当排水时设置流量边界压力水头为 0 cm,排水关闭时边界设置为压力水头 1 000 000 cm,模型上边界因需考虑日降雨条件所以设定为大气边界。

1.3 模拟情景

基于率定验证后的模型,进行模拟情景分析。参考现有土壤氮素水平的均值,取初始土壤铵态氮

和硝态氮含量分别为 $5.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $8.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。考虑到降雨大多发生在 6—9 月,因此模拟时段选择 2017 年 5 月至 10 月,涵盖南方旱作的整个生育期,降雨和蒸发量见图 1。

2 结果与分析

2.1 参数率定和验证

模型尺寸及参数表达详见文献[7],通过率定验证得到土壤水力参数 n 和 l 分别为 1.8 和 0.5,土层 0~10, 10~30, 30~1 000 cm 的 a 值分别为 0.01、0.016、0.014 cm^{-1} 。卵石对应的水力参数 θ_r 、 θ_s 、 a 、 n 、 l 、 K_s 值分别为 $0.005 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.42 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 0.16 cm^{-1} 、 $2.8 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $4 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。不同土层以及反滤体的参数,氮素在自由水中的扩散系数为 $1.52 \text{ cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ [12],土层矿化固持系数均为 0~10、10~20 cm 分别取 8.6×10^{-7} 、 $5.8 \times 10^{-7} \text{ d}^{-1}$,土壤和反滤体的纵向弥散度(D_L)分别为 12 cm 和 30 $\text{cm}^{[12-13]}$,横向弥散度(D_T)取 D_L 的 1/5,吸附系数(K_d)、硝化系数(K_n)和反硝化系数(K_{dn})见表 1。可以看到卵石改进暗排作用下的土壤硝化系数要大于常规暗排作用,得到累计排水量、土壤含水率、土壤铵态氮和土壤硝态氮含量的模拟值与实测值的对比图(图 2)。统计分析得到改进暗排作用下累计排水量、土壤含水率、土壤铵态氮和土壤硝态氮含量的相对误差普遍小于 15%,仅常规暗排作用下排水中氨氮和土壤硝态氮指标相对误差较大(27%),总体上可认为该模型参数合理。

2.2 情景模拟参数设定

基于率定验证后的结果,假定土壤为均质土,土壤和卵石水力特性参数 θ_r 、 θ_s 、 a 、 n 、 l 、 K_s 值分别为 $0.05 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.44 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 0.014 cm^{-1} 、 $1.8 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $0.0585 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $0.005 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.42 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 0.16 cm^{-1} 、 $2.8 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $4 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。考虑到情景模拟中为暗管长期作用,与田间试验的边界条件有所差别,情景模拟时暗管边界设定为渗流边界。

2.3 排水特性

由于暗管一直处于开启状态,因此一般情况下地下水水位位于暗管埋深以下,不发生大降雨或持续降雨时暗管并不产生排水。模拟时段内,单长(本文单长均指代 1 cm)常规暗排与改进暗排日主要排水时段排水情况如图 3 所示。2017 年 9 月 25 日降雨量达到 110 mm,暗管产生单日最大排水量,该日改进暗排的排水量约较常规暗排增大 17%,同时由图 3 可以看到 9 月 26 日和 27 日改进暗排的排水量较常规暗排有所减少,间接反映了改进暗排快速排除地下水的的作用,10 月 1 日和 10 月 11 日的两次降雨条件下也均反映了此规律。

2.4 氮磷排放效应

图 4 给出了常规暗排和改进暗排作用下排水中氨氮和硝态氮浓度。由图 4 可以看到改进暗排作用下的排水时间更少,10 月 1 日以及 10 月 11 日开始的连续降雨情况下,改进暗排均提前 1 d 结束排水,可以看出改进暗排较常规暗排具有更快的排水效率。此外,整个模拟时段内常规暗排氨氮和硝态氮排放量分别为 5.29 mg 和 91 mg,改进暗排对应的排放量分别为 2.7 mg 和 106 mg。与常规暗排相比,改进暗排对于氨氮具有较好的削减作用,可减少氨氮 46%,但增加了 17%的硝态氮。从排水浓度来看,硝态氮浓度较大的情况均出现在开始排水当日,主要原因在于降雨会加快土壤中硝态氮的运移。

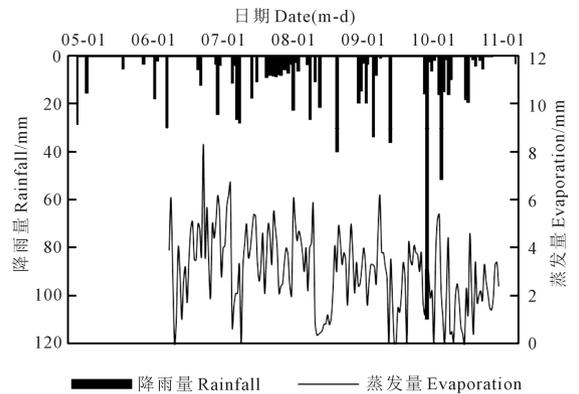
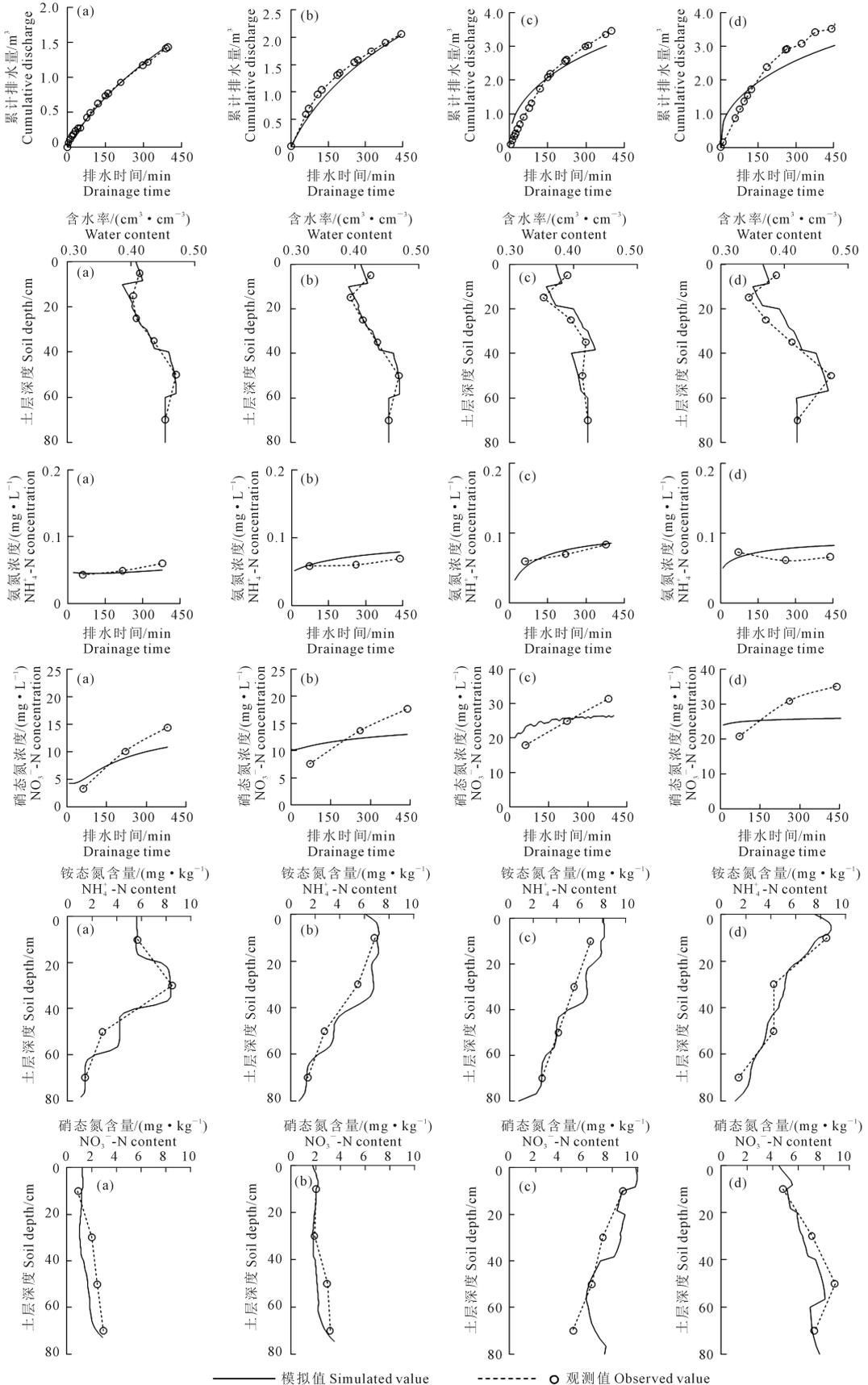


图 1 2017 年 5—10 月日降雨量和蒸发量
Fig.1 Rainfall and evaporation in May to October 2017

表 1 率定验证的氮素特性参数

Table 1 Parameters of nitrogen based on calibration and verification

土层/cm Soil layer	常规暗排 Conventional subsurface drainage			卵石改进暗排 Improved subsurface drainage with gravel filter		
	$K_d/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$K_n/(\text{d}^{-1})$	$K_{dn}/(\text{d}^{-1})$	$K_d/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$K_n/(\text{d}^{-1})$	$K_{dn}/(\text{d}^{-1})$
0~10	3.9	0.080	0.100	3.9	0.120	0.095
10~20	3.9	0.080	0.200	3.9	0.120	0.190
20~30	3.9	0.030	0.150	3.9	0.045	0.143
30~40	3.9	0.030	0.100	3.9	0.045	0.095
40~60	3.9	0.025	0.008	3.9	0.029	0.008
60~80	3.9	0.010	0.010	3.9	0.029	0.010
80~100	3.9	0.002	0.008	3.9	0.003	0.008
>100	3.9	0.002	0.007	3.9	0.003	0.007
反滤体 Filter				3.5	0.115	0.001



注：(a) 常规-率定期；(b) 常规-验证期；(c) 改进-率定期；(d) 改进-验证期。

Note: (a) Conventional-calibration; (b) Conventional-verification; (c) Improved-calibration; (d) Improved-verification.

图 2 常规暗排和改进暗排作用下土壤及排水中氮素含量实测值与模拟值对比

Fig.2 Comparison of simulated and observed N in soil and outflow under conventional and improved subsurface drainage

2.5 土壤氮素分布特性

图 5 给出了模拟结束时两暗管间不同土层深度的氮素分布,可以看到由于改进暗排作用下的土壤硝化作用大于常规暗排,导致改进暗排作用下的土壤铵态氮含量显著低于常规暗管排水作用。长期排水作用下土壤表层铵态氮含量最大,常规暗排与改进暗排土壤表层铵态氮差别最大,二者差值达到

$5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但在 40~60 cm 土层的铵态氮含量相差最小,二者仅相差 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对于土壤硝态氮含量来说,30 cm 左右土层的土壤硝态氮含量最小,仅为初始值的 10%,表层土壤由于铵态氮硝化作用的转化使得硝态氮含量较大,土壤硝态氮的迁移速率较大,常规暗排和改进暗排长期排水作用下暗管层上部的土壤硝态氮含量相差不大,该位置土壤硝

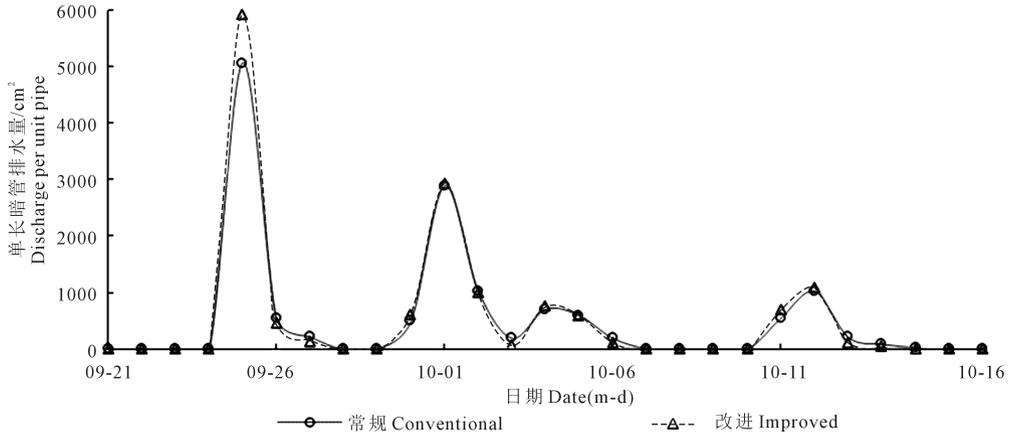


图 3 常规暗排和改进暗排作用下暗管排水量变化
Fig.3 Discharge under conventional and improved subsurface drainage

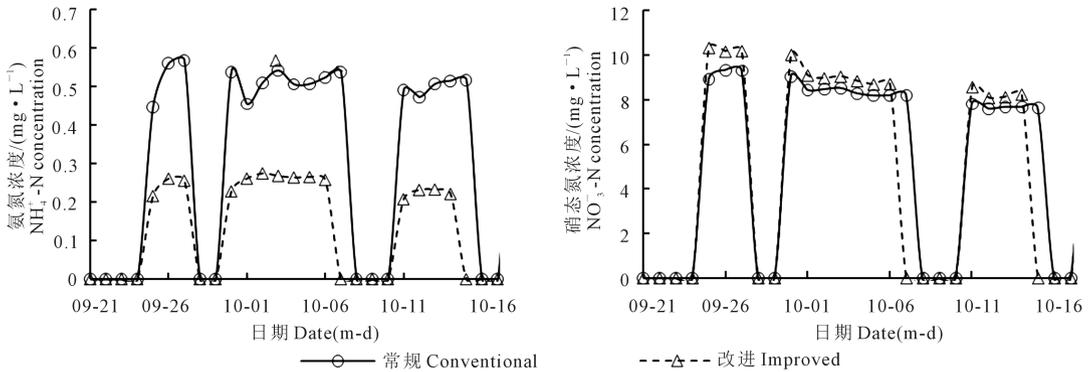


图 4 常规暗排和改进暗排作用下排水中氨氮和硝态氮浓度

Fig.4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration in drainage water under conventional and improved subsurface drainage

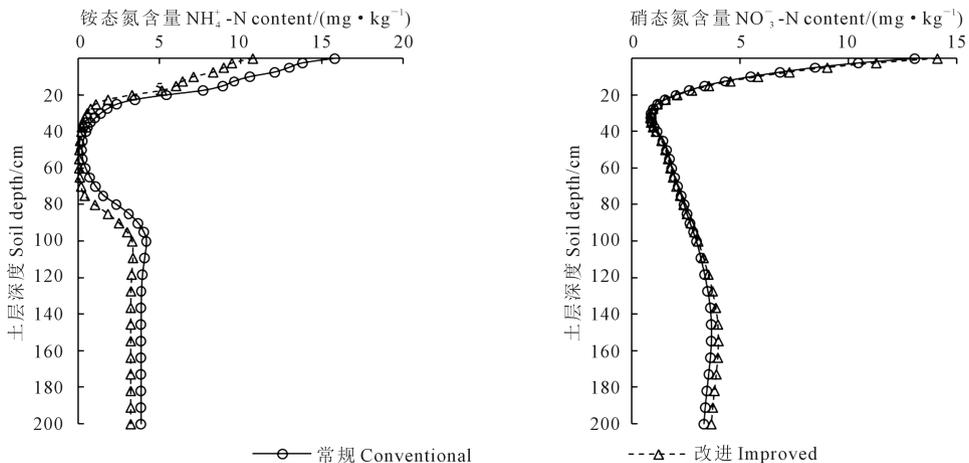


图 5 常规暗排和改进暗排作用下土壤铵态氮及硝态氮含量分布

Fig.5 The distributions of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content under conventional and improved subsurface drainage

态氮含量的主要影响因素为暗管排水,在土层 120 cm 以下,二者作用下的硝态氮含量差别逐步明显,说明此位置土壤硝态氮的含量主要受到土壤硝化和反硝化作用影响。

3 讨 论

改进暗管排水中硝态氮含量较常规暗管排水有所增加,对于该现象可以从两个角度进行理解,一方面确实增加了地表水中的硝态氮量,但另一方面也减少了地下水中的硝态氮含量,考虑到很多地区的地下水存在硝态氮含量过高的严峻威胁^[14-15],此时可以理解为排出更多的硝态氮对于缓解地下硝酸盐过高具有一定正向作用,通常地下水硝态氮超标难以处理,然而转移至地表后,处理相对容易,可采用物理、化学、生物等多种方法^[16-17]。

此外,根据上述分析可以看到模拟结束时土壤 20~40 cm 土层硝态氮含量最少、40~60 cm 铵态氮含量最少,硝态氮和铵态氮作为根系可利用的氮素,对于植物生长具有重要作用^[18]。目前,我国大田作物的主要施肥方式仍为地表施肥,然而由于地表氮素的矿化固持作用,地表土壤氮素含量已明显高于其他土层,肥料需经过一段时间运移至表层以下才可以被下层根系吸收,也导致肥料利用率不高。已有研究表明氮肥深层施用可增加作物深层土壤根系,利于氮素高效吸收以及作物产量提高^[19]。若暗管排水与深层施肥相结合,则对于作物生长会起到更加有效的作用,仍有待深入探讨,相同土壤背景值条件下土壤和排水中氮素的特性有待进一步分析。

4 结 论

基于率定验证后的 HYDRUS 模型,通过对比分析改进暗排与常规暗排长期作用下排水特性、排水中的氮素含量以及土壤氮素分布情况发现:

1)降雨量越大,改进暗排的排水作用越明显,相比于常规暗管排水,改进暗排具有好的排水能力。
2)长期排水作用下,与常规暗排相比,改进暗排对于氨氮的削减具有较好作用,可减少氨氮 46%,但同时也增加了 17%的硝态氮。

3)从土壤分布来看,与常规暗排相比,改进暗排作用下土壤铵态氮含量明显减少,二者土壤表层铵态氮差别最大,差值达到 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在 40~60 cm 土层的铵态氮含量相差最小,二者仅相差 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,暗管上部的土壤硝态氮含量差别很小,差值小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

参 考 文 献:

- [1] 焦平金,许迪,王少丽,等.自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究[J].农业环境科学学报,2010,29(3):534-540.
- [2] Grazhdani S, Jacquin F, Sulçe S. Effect of subsurface drainage on nutrient pollution of surface waters in south eastern Albania[J]. Science of the Total Environment, 1996,191(1-2):15-21.
- [3] Anderson D M, Glibert P M, Burkholder J M. Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences [J]. Estuaries, 2002, 25(4):704-726.
- [4] Thorburn P J, Biggs J S, Weier K L, et al. Nitrate in groundwaters of intensive agricultural areas in coastal Northeastern Australia[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003,94(1):49-58.
- [5] Gallardo M, Thompson R B, Rodríguez J S. Simulation of transpiration, drainage, N uptake, nitrate leaching, and N uptake concentration in tomato grown in open substrate[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(12):1773-1784.
- [6] Blackmer A M. losses and transport of nitrogen from soil[M]. Chelsea: Lewis Publishers, 1987:85-130.
- [7] Tao Y, Wang S L, Xu D, et al. Field and numerical experiment of an improved subsurface drainage system in Huaibei plain[J]. Agricultural water management, 2017,194:24-32.
- [8] Tao Y, Wang S L, Xu D, et al. Experiment and analysis on flow rate of improved subsurface drainage with ponded water[J]. Agricultural water management,2016,177:1-9.
- [9] 陶园,王少丽,许迪,等.改进暗管排水结构型式对排水性能的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):113-118.
- [10] Tao Y, Wang S L, Guan X Y, et al. Study on characteristics of nitrogen and phosphorus loss under an improved subsurface drainage[J]. Water, 2019,11(7):1467.
- [11] Šimunek J, van Genuchten M, Šejna M T. The HYDRUS software package for simulating two- and three dimensional movement of water, heat, and multiple solute in variably-saturated media[M]. Prague, PC Progress, 2006:7-20.
- [12] Li Y, Šimunek J J, Zhang Z T, et al. Evaluation of nitrogen balance in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D[J]. Agricultural Water Management,2015,148: 213-222.
- [13] Plumb O A, Whitaker S. Dispersion in heterogeneous porous media 1. local volume averaging and large-scale averaging[J]. Water Resources Research, 1988,24(7): 913-926.
- [14] 王庆锁,孙家宝,郝卫平,等.密云水库流域地下水硝态氮的分布及其影响因素[J].土壤学报,2011,48(1):141-150.
- [15] 肖亚奇,杨鹏年,吴彬,等.干旱绿洲区土壤氮素累积及冬灌效应分析[J].节水灌溉,2018,(2):71-76,82.
- [16] 叶舒帆,胡筱敏,张杨,等.一种新型电化学法处理硝态氮废水的初步研究[J].环境科学,2010,31(8):130-136.
- [17] 王晓璐,左剑恶,千里里,等.复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究[J].环境科学,2015,(7):2518-2524.
- [18] 门中华.冬小麦硝态氮利用的生理特征及其影响因素[D].杨凌:西北农林科技大学,2004.
- [19] 杜玉奎.施氮深度对夏玉米根系分布及产量形成的影响[D].泰安:山东农业大学,2015.