

# 减氮配施有机物质对土壤氮素淋失的调控作用

舒晓晓<sup>1,2,3</sup>, 门杰<sup>1</sup>, 马阳<sup>1</sup>, 薛澄<sup>1</sup>, 彭正萍<sup>1</sup>, 雷光宇<sup>2,3</sup>

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北省农田生态环境重点实验室, 河北保定 071001;

2. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075; 3. 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 西安 710075)

**摘要:** 采用室内土柱模拟试验方法, 研究不同氮肥施用下 1 m 土体中氮素的分布和移动特征, 揭示土壤氮素动态变化规律。结果表明: FN(农民习惯施无机氮用量)、RN(根据土壤养分供应和作物需求确定的推荐无机氮用量)显著增加了土壤上层  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  向下层淋失。RN+HA(与推荐无机氮纯养分相等的锌腐酸尿素)和 RN40%+OMB(推荐无机氮肥减 60%基础上配施自制有机调理物质)可延长上层土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  峰值出现时间, 降低下层  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。淋溶结束后, 等氮量下增施 HA 较 RN 降低 60 cm 以下  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  残留 29.7%~54.2%; 降低 60—80 cm  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  累积 17.4%。RN40%+OMB 处理无机氮肥用量最小, 0—20 cm 的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  最高, 40—100 cm 稳定在 2.0 mg/kg 左右; 0—20, 20—40 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  较 RN+HA 增加 12.3%和 2.0%, 显著降低 40 cm 以下  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  残留。RN+HA 和 RN40%+OMB 较 RN 的土壤总无机氮残留分别减少 7.4%和 20.2%, 降低表观淋失率。因此, RN40%+OMB 可较好地抑制氮素下移, 降低氮素淋失风险, 为减少氮素淋失、明确合理氮肥施用方式提供科学依据。

**关键词:** 氮素减施; 有机调控;  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ;  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ; 氮素平衡

中图分类号: S143.1; S521.1; S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0186-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.01.030

## Regulation of Reduced Nitrogen and Organic Matter Application on Nitrogen Leaching

SHU Xiaoxiao<sup>1,2,3</sup>, MEN Jie<sup>1</sup>, MA Yang<sup>1</sup>, XUE Cheng<sup>1</sup>, PENG Zhengping<sup>1</sup>, LEI Guangyu<sup>2,3</sup>

(1. Hebei Key Laboratory of Farmland Eco-Environment, College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001;

2. Shannxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075; 3. Institute of Land Engineering and Technology, Shannxi Provincial Land Engineering Construction Group, Co., Ltd., Xi'an 710075)

**Abstract:** The distribution and movement features of nitrogen in 1 m soil layer under different nitrogen fertilizer application were studied through artificial soil column simulation experiment in laboratory to reveal the dynamic changes of nitrogen in farmland soil. Results indicated that FN (the amount of inorganic nitrogen used by farmers) and RN (inorganic nitrogen dosage recommended by soil nutrient supply and crop demand) significantly increased the leaching of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  from upper soil layer to lower soil layer. The treatments of RN+HA (zinc humic acid urea equivalent to the recommended inorganic nitrogen with RN) and RN40%+OMB (60% inorganic nitrogen fertilizer of RN with homemade organic substances) could prolong the peak time of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the upper soil layer and reduce the  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the lower soil layer. At the end of leaching experiment, comparing with RN, the application of humic acid (HA) decreased the  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  residue by 29.7%~54.2% in the soil layer below 60 cm under the same amount of nitrogen, and reduced the accumulation of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  by 17.4% in 60—80 cm soil layer. In RN 40%+OMB treatment, the dosage of inorganic nitrogen fertilizer was the minimum, and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  was the highest in 0—20 cm soil layer and it was stable at 2.0 mg/kg in 40—100 cm soil layer. Comparing with RN+HA,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in 0—20 cm and 20—40 cm soil layer in this treatment increased by 12.3% and 2.0%, respectively, and the  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  residue in the soil layer lower than 40 cm was significantly reduced. Contrasted with RN, the total inorganic nitrogen residue of RN+HA and RN40%+OMB decreased by 7.4% and 20.2%, respectively, and the apparent leaching rate was decreased. Therefore, RN40%+OMB could inhibit the downward movement of nitrogen and re-

收稿日期: 2018-07-23

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300905)

第一作者: 舒晓晓(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事植物营养与生态环境研究。E-mail: shuxiaoxiao789@163.com

通信作者: 彭正萍(1974—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事植物营养与生态环境研究。E-mail: pengzhengping@sina.com

duce the risk of nitrogen leaching, and these results provide a scientific basis for reducing the nitrogen leaching.

**Keywords:** reduced nitrogen application; organic regulation;  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ;  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ; nitrogen balance

氮是植物生长和产量形成的关键因素。施用氮肥提高粮食作物单产 55%~57%，增加总产 30%~31%<sup>[1]</sup>。为获高产，华北高产区小麦纯氮施用量 301.5 kg/hm<sup>2</sup>，玉米季 417.0 kg/hm<sup>2</sup>，远超过作物生长需求，并有逐年递增趋势<sup>[2]</sup>。过量氮肥造成农田土壤氮素盈余<sup>[3]</sup>，一部分氮通过硝化和反硝化进入大气，造成  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{NH}_3$  挥发损失；同时也会随降雨或灌溉淋失，累积在土层深处，造成地下和地表水污染，危害人类健康，引发一系列环境问题<sup>[4-5]</sup>。

肥料施用量与土壤剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量紧密相关<sup>[6-7]</sup>，在华北平原的小麦/玉米轮作体系中，长期施用无机氮肥可使氮素在土壤中大量残留，改变土壤理化性质，不利于土壤质量改善<sup>[8]</sup>。我国农业生产中普遍存在重化肥轻有机肥的现象，朱兆良<sup>[9]</sup>采用无机配施有机肥改善土壤，降低农田氮素淋失，提高氮肥利用率。宁建凤等<sup>[10]</sup>指出单施无机氮肥淋失较高，有机肥配施可明显降低土壤氮淋失，保证华北平原小麦/玉米轮作体系的作物稳产<sup>[11]</sup>。目前关于无机氮肥添加有机肥、生物菌剂和氨基酸类有机物质对土壤氮素淋失规律的影响研究尚少。

因此，本文采用自制土柱进行室内淋溶模拟试验，设置不施氮肥、农民习惯施无机氮用量、根据土壤养分供应和作物需求确定的推荐无机氮用量、与推荐无机氮纯养分量相等的锌腐酸尿素、推荐无机氮肥减量基础上配施有机复合调理剂等处理。施入后不同时期监测土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的垂直运移和累积规律，研究不用氮肥下土壤中氮素的垂直运移规律，为减少氮素淋失、明确合理氮肥施用方式提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

本试验在河北农业大学资源与环境科学学院实验室内进行，室温 25.0 °C。供试土壤为粉砂质轻壤土，有机质 16.7 g/kg，全氮 1.1 g/kg， $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  12.1 mg/kg， $\text{NO}_3^- - \text{N}$  31.6 mg/kg，有效磷 14.8 mg/kg，速效钾 174.0 mg/kg。供试尿素含 N 46.4%，锌腐酸尿素含 N 46%，过磷酸钙含  $\text{P}_2\text{O}_5$  16%，氯化钾含  $\text{K}_2\text{O}$  54%，鸡粪有机肥含 N 4.48% 和有机质 38.2%。

### 1.2 试验处理

共设 5 个处理，分别为：不施氮肥(CK)、农民习惯施无机氮用量(FN)、根据土壤养分供应和作物需求确定的推荐无机氮用量(RN)、与推荐无机氮纯养分量相等的锌

腐酸尿素(RN+HA)、推荐无机氮肥减 60%基础上配施自制有机调理物质(含有机肥、复合菌、植物氨基酸及营养调理剂液肥)(RN40%+OMB)，各处理养分投入量见表 1，每个处理重复 3 次。

表 1 各处理养分投入量 单位:g/柱

| 处理        | N     | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{K}_2\text{O}$ | 有机肥投入 N | 复合菌   | 营养调理剂 |
|-----------|-------|------------------------|----------------------|---------|-------|-------|
| CK        | 0     | 0.704                  | 1.173                |         |       |       |
| FN        | 3.051 | 0.704                  | 1.173                |         |       |       |
| RN        | 2.347 | 0.704                  | 1.173                |         |       |       |
| RN+HA     | 2.347 | 0.704                  | 1.173                |         |       |       |
| RN40%+OMB | 0.939 | 0                      | 1.030                | 1.051   | 0.235 | 1.760 |

采用自制土柱淋溶模拟试验，土柱为 PVC 管，长 110 cm，内径 10 cm，土柱底部用 200 目尼龙布和铁丝网筛封口，并在最底部装入 2 cm 厚洗净的小砾石承托土壤，为尽可能消除土柱的边际效应，装土前柱壁涂凡士林。将 8.8 kg 土壤逐层装入土柱并压实，同时将包有尼龙的导流装置逐层插入柱中，密封；然后 1.7 kg 土壤与各处理的肥料充分混匀后装入土柱 20 cm。土壤表面铺盖 2 cm 小砾石，在距离土壤表面 10 cm 设置滴水点滴灌溉水以避免浇水对土壤的扰动。

首次每柱中加 2.35 L 蒸馏水使土壤水饱和，室温下培养 1 天后，每柱添加 300 mL 蒸馏水，打开水龙头，收集 0—20，20—40，40—60，60—80，80—100 cm 土层淋溶液约 50 mL；培养第 4 天再加入 300 mL 水进行第 2 次淋溶，收集不同土层淋溶液。3 天重复 1 次，之后逐渐减少测定频率，直到前后 2 次淋溶液浓度差异不显著为止。试验持续 65 天，淋溶结束后每层 20 cm 取 0—100 cm 土样。

### 1.3 测定方法

新鲜土样采用 1 mol/L KCl 浸提，与试验期间收集到的土壤淋溶液均采用靛酚蓝比色法测定  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ <sup>[12]</sup>，同时测定新鲜土样含水量。

### 1.4 数据处理

氮素表现淋失率(%) = 氮素淋失量(mg)/肥料氮输入量(mg) (1)

朱兆良等<sup>[13]</sup>、辛思颖等<sup>[14]</sup>认为，因加入化肥氮所增加的土壤氮矿化量与被土壤中生物固定的化肥氮在数量上基本相当，本次模拟试验中未种作物，可忽略环境输入及作物带走 N。土壤氮素的表观盈亏量为：

氮盈余(mg) = N 输入(mg) - N 输出(mg) = (土壤起始 N 肥料 N) - (土壤残留 N + 淋失 N) (2)

采用 Excel 2003 软件分析数据，Orgin 8.0 软件

绘制图表, ANOVA 进行统计分析并用 SPSS 17.0 软件进行显著性检验, 显著性水平为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤淋溶液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的动态变化规律

2.1.1 0—20 cm 土壤淋溶液中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  动态变化规律 由图 1 可知, 培养 3 天时, CK 的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  略有增加, 可能是土壤中部分有机氮转化为  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , 也可能灌水后短暂厌氧环境导致部分  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  反硝化转

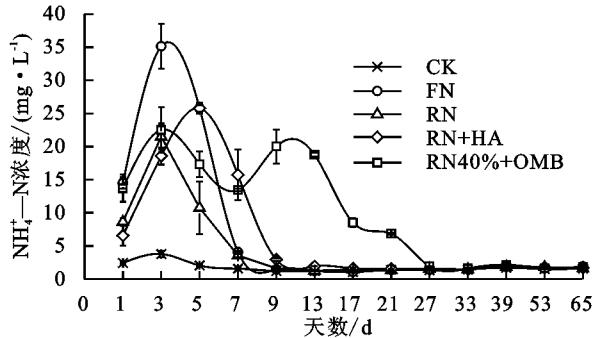


图 1 0—20 cm 土层  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的动态变化

各处理第 1 天  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  差异不大, 说明淋溶初期主要为土壤自身残留。CK 的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  缓慢降低, 各施肥处理变化明显,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  随培养时间先增后缓慢降低, 最后趋于稳定, 且浓度峰值随施肥量逐渐递增, 出现时间不一。FN、RN 在第 3 天骤增至最高, 第 9 天降至 17 mg/L 左右, 而后趋于稳定; RN+HA 的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  峰值在第 7 天最高, 13 天降至最低, 培养 17 天后稳定在 15.0 mg/L 左右; RN40%+OMB 第 9 天出现  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  峰值, 峰值升降缓慢, 明显高于同时期的其他处理, 之后浓度大多处于 20.0 mg/L 之上。说明自制有机调理物质有助于抑制硝化, 保持上层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

2.1.2 20—40 cm 土壤淋溶液中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$

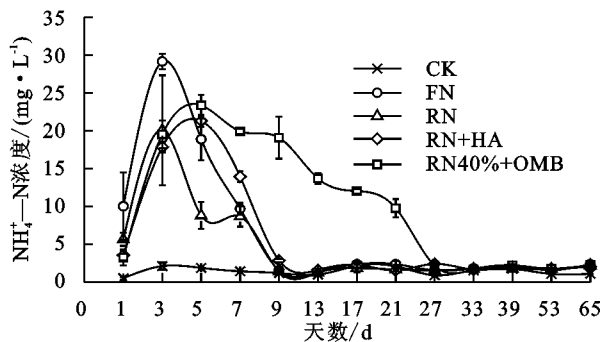
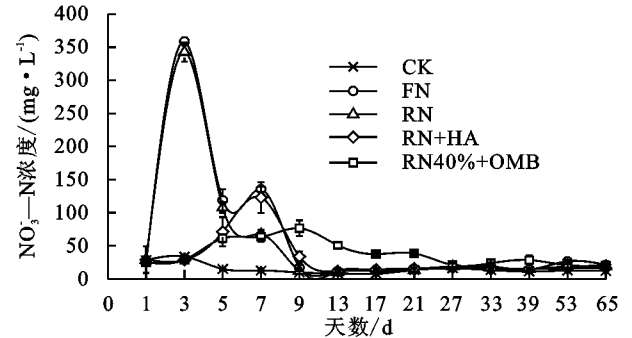


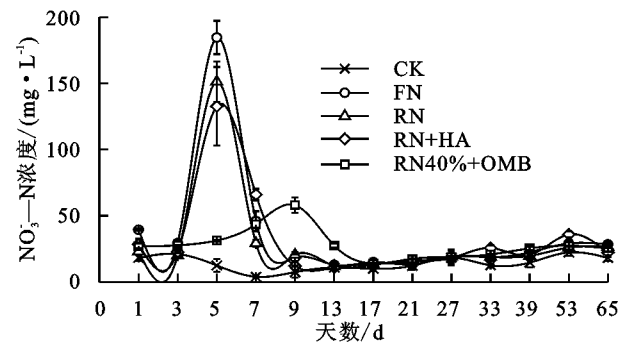
图 2 20—40 cm 土层  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的动态变化

2.1.3 40—60 cm 土壤淋溶液  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  动态变化规律 40—60 cm 土层  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  变化类似于 20—40 cm, 由于灌水, 各处理相比 20—40 cm 峰值延后至第 5 天, 且所有施氮处理 17 天后变化不显著, 在 0.8~2.3 mg/L 内波动(图 3)。FN、RN 的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  于第 7 天骤降

化为  $\text{NH}_4^+ - \text{N}^{[15]}$ , 之后  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  维持在 1.1~3.8 mg/L, FN、RN、RN40%+OMB 在第 3 天出现峰值, 且 FN 峰值明显高于其他处理, 随后 FN、RN 至第 9 天降至较低。RN+HA 的峰值则出现在第 5 天, 说明锌腐酸尿素可缓解尿素在土壤中的水解速率。第 9 天, RN40%+OMB 出现第 2 次峰值, 且前 13 天土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  维持在 13.0 mg/L 左右, 峰值下降平缓, 说明自制有机调理物质能改善表层土壤供 N 肥特性, 延长肥效。



$\text{NO}_3^- - \text{N}$  动态变化规律 由图 2 可知,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  随淋溶时间先增后降。FN 和 RN 于第 3 天出现峰值, 且 FN 比 RN 增加 31.2%。RN+HA 的峰值后移至第 5 天, 峰值水平与等氮量下 RN 显著不差异, 9 天后降至 3 mg/L 以下, 随后趋于平缓。RN40%+OMB 峰值比 FN 和 RN 后移 2 天, 抛物线式平缓降低, 直至第 27 天降至 2.0 mg/L 以下, 延长  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在土层中的时间。FN、RN 的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  处理于第 5 天出现峰值, 分别为 184.7, 151.3 mg/L, 7 天后缓慢降低并趋于平缓; RN+HA 与 RN 变化趋势一致, 峰值下降 12.3%, 肥效可持续至 9 天后。RN40%+OMB 于第 9 天出现峰值, 且峰值最小, 持续至 17 天后降至最低。



至 3.0 mg/L 以下, 随后平缓; RN+HA、RN40%+OMB 肥效延至第 13 天降至 2.5 mg/L 以下, 后趋于平缓; RN40%+OMB 在整个培养期间增幅变化最为平缓,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  处在 15.0 mg/L 以上持续时间最长为 6 天。第 5 天出现  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  峰值, 说明硝化作用在施肥 1

周内反应剧烈。FN、RN 的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  变化趋势同 20—40 cm 相似(图 3)。RN+HA 较 RN 峰值降低

20.6%;RN40%+OMB 降低  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  峰值,前 13 天内变化平缓,保持在 17.7~90.2 mg/L 范围内。

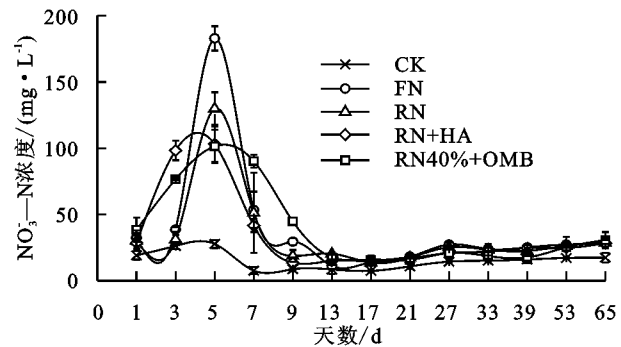
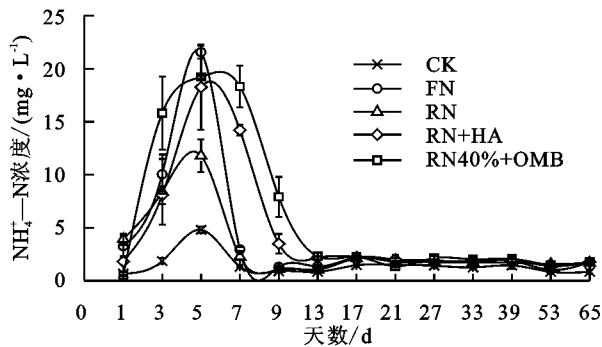


图 3 40—60 cm 土层  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的动态变化

2.1.4 60—80 cm 土壤淋溶液中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  动态变化规律 由图 4 可知,CK 的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在第 1 天相对较高,随后逐渐降低趋于平稳(1.0 mg/L)。FN、RN 的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  前 9 天缓慢降低,第 9 天至 27 天增加,27 天时出现小峰,且 RN 较 FN 峰值降低 17.1%,之后维持在 2.0 mg/L 左右;RN+HA、RN40%+OMB 均于第 3 天分别增至 8.1、9.8 mg/L,随后降低趋于平缓。全培养时期,所有无机氮肥处理在 7~9、17~27 天

的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  均高于有机调控。

各氮肥处理的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  均呈先增后降趋势。相比 40—60 cm 土层推迟峰值时间,于第 7 天出现峰值,且峰值大小依次为  $\text{FN} > \text{RN} > \text{RN} + \text{HA} > \text{RN}40\% + \text{OMB}$ 。FN、RN 随时间变化较为剧烈,且与施氮量正相关;RN+HA 和 RN40%+OMB 相对平缓。17 天后各处理的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度呈小幅增长,增长速率与施肥量呈正比。

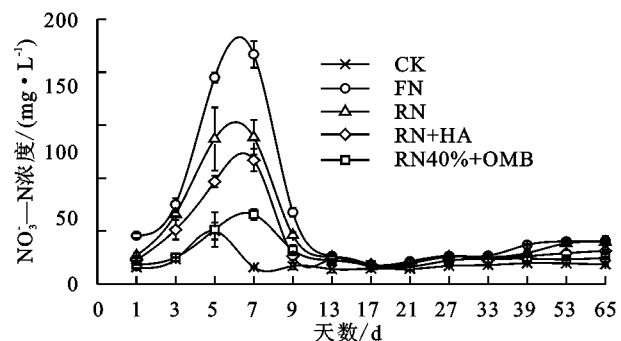
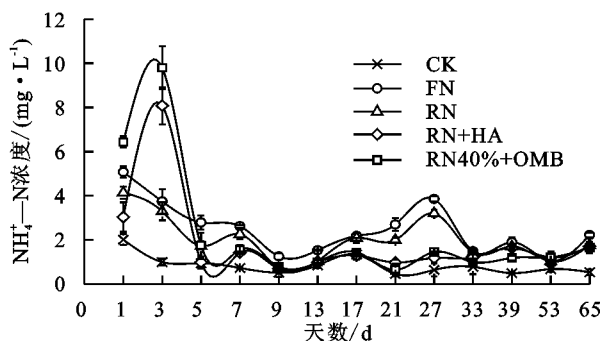


图 4 60—80 cm 土层  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的动态变化

2.1.5 80—100 cm 土壤淋溶液中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  动态变化规律 由图 5 可知,整个培养期,CK 处理的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度均小于 5.0 mg/L。各施氮处理培养第 1 天浓度最低,之后急剧上升,9~13 天内出现峰值,RN+HA、RN40%+OMB 较 FN 和 RN 处理峰值延后 4 天,且

相比 FN 峰值下降 56.5%,65.5%,说明 RN+HA、RN40%+OMB 在抑制  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  淋溶方面有积极作用。21 天后各施氮处理间无显著差异,浓度处于 11.9~21.8 mg/L。全培养期 RN40%+OMB 变化较为平缓, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度始终低于 26.0 mg/L。

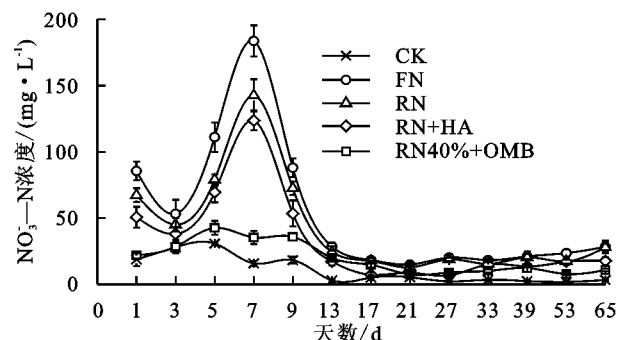
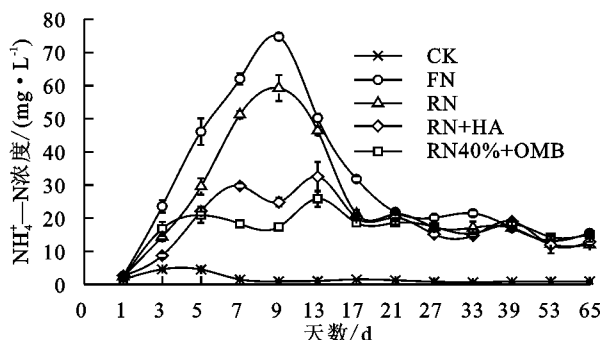


图 5 80—100 cm 土层  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的动态变化

FN、RN、RN+HA 三者变化趋势一致,由于肥料随水分下移至底层, $\text{NO}_3^- - \text{N}$  峰值推迟至第 7 天,且 RN+HA 较 FN、RN 峰值分别下降 32.7%和 13.3%;前 13

天的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  表现为  $\text{FN} > \text{RN} > \text{RN} + \text{HA}$ ,13 天后无显著差异。RN40%+OMB 全培养期的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  为 8.0~43.0 mg/L,淋溶结束时该处理的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  为

11.0 mg/L,而 FN、RN 均高于 28.0 mg/L。

## 2.2 培养结束时土壤 $\text{NH}_4^+$ -N 和 $\text{NO}_3^-$ -N 的垂直分布特征

由表 2 可知,所有处理不同土层的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量变化差别不大。CK 的  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 最低,且  $\text{NH}_4^+$ -N 随土层深度逐渐降低, $\text{NO}_3^-$ -N 则相反。

表 2 淋溶结束时土柱中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 垂直分布

| 处理        | $\text{NH}_4^+$ -N/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |          |          |          |           | $\text{NO}_3^-$ -N/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |          |          |          |           |
|-----------|---|----------|----------|----------|-----------|---|----------|----------|----------|-----------|
|           | 0—20 cm                                   | 20—40 cm | 40—60 cm | 60—80 cm | 80—100 cm | 0—20 cm                                   | 20—40 cm | 40—60 cm | 60—80 cm | 80—100 cm |
| CK        | 2.7a                                      | 2.1a     | 1.7a     | 1.4a     | 0.7a      | 2.2b                                      | 4.2c     | 5.7b     | 9.5d     | 8.4d      |
| FN        | 3.2a                                      | 4.2a     | 4.0a     | 5.4a     | 4.0a      | 8.5a                                      | 7.0b     | 12.9a    | 18.7a    | 26.2a     |
| RN        | 3.8a                                      | 2.7a     | 4.3a     | 3.7a     | 2.4a      | 8.6a                                      | 9.1ab    | 10.9a    | 15.5b    | 17.9b     |
| RN+HA     | 4.6a                                      | 2.8a     | 4.3a     | 2.6a     | 1.1a      | 8.1a                                      | 10.1a    | 12.4a    | 12.8c    | 14.3bc    |
| RN40%+OMB | 5.1a                                      | 4.1a     | 1.9a     | 2.7a     | 1.4a      | 9.1a                                      | 10.3a    | 9.2ab    | 9.4d     | 9.8d      |

注:同列不同字母表示各处理间差异显著( $P<0.05$ )。

减氮处理 RN 的  $\text{NO}_3^-$ -N 较 FN 在 0—40 cm 略有增加,但差异不显著,40—60 cm 减少 2.0 mg/kg,60—100 cm 显著降低 17.1%~31.7%,说明施氮量越大  $\text{NO}_3^-$ -N 更易累积于 60 cm 以下。等氮量下,RN+HA 与 RN 在 0—60 cm 的  $\text{NO}_3^-$ -N 残留量变化不显著,60—80 cm 残留量显著减少 17.4%,80—100 cm 下降 3.6 mg/kg,但差异不显著。RN40%+OMB 的各土层  $\text{NO}_3^-$ -N 变化不大,稳定在 10 mg/kg 左右;与 RN+HA 相比,RN40%+OMB 的 0—20,20—40 cm  $\text{NO}_3^-$ -N 分别增加 12.3%,2%,显著减少 40—100 cm  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量 25.8%~31.5%,降低了氮素下移淋失风险。

FN 的  $\text{NH}_4^+$ -N 残留主要累积于 60—80 cm,0—20 cm 的含量最低;等氮量下 RN+HA 较 RN 增加 0—40 cm  $\text{NH}_4^+$ -N 残留 3.7%~21.1%,降低 60—100 cm 土层残留 29.7%~54.2%;RN40%+OMB 施氮量最小,0—20 cm 的  $\text{NH}_4^+$ -N 残留量最高,较其他施氮处理增加 10.9%~59.4%,40—100 cm  $\text{NH}_4^+$ -N 稳定在 2.0 mg/kg 左右。

## 2.3 土壤氮素总量平衡变化

由表 3 可知,施肥增加土柱中氮素淋失、土壤残留和氮盈余,且与肥料用量呈正相关。FN 的土壤残留最高,减施氮量的 RN 较 FN 土壤残留减少 16.0%,氮素表观淋失率降低 0.4 个百分点;有机调控下 RN+HA、RN40%+OMB 较 RN 的土壤无机氮总残留量分别减少 7.4%,20.2%,表观淋失率降低 0.8,1.6 个百分点。各施肥处理的氮盈余均为正,说明氮素投入量大于输出量,则土柱系统处于氮素盈余状态。在大田中,若氮素长期处于盈余状态,易使土壤处于板结状态,且不利于农业生态系统的环境安全。

表 3 土柱中氮素表观平衡

| 处理        | N 输入/(mg·柱 <sup>-1</sup> ) |        | N 输出/(mg·柱 <sup>-1</sup> ) |        | 表观淋失率/% | N 盈余/(mg·柱 <sup>-1</sup> ) |
|-----------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|---------|----------------------------|
|           | 肥料 N                       | 起始土壤 N | 淋失 N                       | 土壤残留 N |         |                            |
| CK        | 0                          | 384.3  | 51.7                       | 339.0  | 0       | -6.4                       |
| FN        | 3050.7                     | 384.3  | 212.3                      | 825.4  | 7.0     | 2397.3                     |
| RN        | 2346.7                     | 384.3  | 154.5                      | 693.2  | 6.6     | 1883.3                     |
| RN+HA     | 2346.7                     | 384.3  | 136.2                      | 642.0  | 5.8     | 1952.8                     |
| RN40%+OMB | 1990.0                     | 384.3  | 100.0                      | 553.3  | 5.0     | 1721.0                     |

## 3 讨论

本试验条件下,减量配施有机物质的 RN+HA、RN40%+OMB 处理可延迟土壤上层(0—40 cm)  $\text{NH}_4^+$ -N 峰值时间,且降低 0—100 cm 土层  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度(图 1~图 5),延长肥效,而无机氮肥处理显著增加下层  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失,可能是由于无机有机肥料配合施用可使土壤中氮素缓慢供应,从而减少淋失<sup>[9]</sup>。淋溶结束后,RN40%+OMB 可将 80—100 cm  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度稳定在 11.0 mg/L 左右,而 FN 和 RN 的  $\text{NO}_3^-$ -N 在 28.0 mg/L 左右,说明 FN 和 RN 的  $\text{NO}_3^-$ -N 淋溶可能对地下水造成污染<sup>[15]</sup>,而 RN40%+OMB 可避免淋失风险,这与黄邵敏等<sup>[16]</sup>研究结果类似,深层土壤累积的  $\text{NO}_3^-$ -N 易造成氮素损失,而有机肥可减少淋失风险。

淋溶结束后,FN、RN 分别在 60—80,40—60 cm 的  $\text{NH}_4^+$ -N 残留量高达 5.4,4.3 mg/kg(表 2),可能是高氮量下灌水造成土壤环境呈还原状态,硝化细菌受抑制, $\text{NH}_4^+$ -N 难以被氧化或硝化而被留存<sup>[17]</sup>。RN40%+OMB 增加上层土壤固氮量,较 RN+HA 显著降低 40—100 cm  $\text{NO}_3^-$ -N 残留(表 2),与有机肥可增大土壤颗粒孔隙度、吸附速效养分、减少养分流失、增强上层土壤固持  $\text{NO}_3^-$ -N 有关<sup>[18]</sup>,也可能是有机肥在分解时消耗土壤部分氮素,使矿化氮被固持, $\text{NO}_3^-$ -N 累积减少,进而减少淋失<sup>[6]</sup>。

增施氮肥增加土柱中氮素淋失以及土壤残留(表 3)。RN+HA、RN40%+OMB 较 RN 的土壤残留分别减少 7.4%,20.2%,表观淋失率降低 0.8,1.6 个百分点。这与孙波等<sup>[19]</sup>田间定位试验结果一致,化肥与

有机肥配合施用的氮素淋失率明显低于单施化肥,有研究<sup>[15]</sup>表明是由于有机无机混合增加黏土矿物固定态铵的总量及固定有机氮肥,也可能与肥料中加入了生物类氨基酸有关,其机理有待进一步验证。根据同处理的小麦田间试验结果可知,RN+HA、RN40%+OMB较RN分别增产9.4%,11.1%<sup>[20]</sup>,RN+HA肥料成本与FN接近,而RN40%+OMB由于土壤调理剂、微生物菌肥和氨基酸等单价过高,小面积施用不占优势,待辐射面积扩大后农民可获得可观的经济效益。考虑农田持续发展,单施氮肥或氮磷钾的同时配施有机调理物质可成为华北潮土区减少氮素淋溶的新型调控措施。

## 4 结论

(1)施用无机氮肥显著增加了土壤上层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 向下层淋失。减氮配施腐植酸和氨基酸的RN+HA和RN40%+OMB可延迟上层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 峰值时间,延长肥效;同时降低下层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失。淋溶结束后80—100 cm  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在FN和RN中分别为28.3,27.9 mg/L,RN40%+OMB将 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度稳定在11.0 mg/L左右。

(2)淋溶结束后,FN、RN分别在60—80,40—60 cm的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 残留量高达5.4,4.3 mg/kg,等氮量下增施HA较RN降低60 cm以下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 残留,降幅29.7%~54.2%;60—80 cm  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积降低17.4%。RN40%+OMB无机氮肥用量最小,淋溶结束后0—20 cm  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量最高,可达5.1 mg/kg,有利于上层土壤固持氮,40—100 cm的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 稳定在1.4~2.7 mg/kg; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 残留较RN+HA在0—20,20—40 cm土层分别增加12.3%,2%,40—100 cm显著降低25.8%~31.5%。

(3)减施氮量配施有机物质RN+HA、RN40%+OMB较RN的土壤总无机氮残留量分别减少7.4%,20.2%,表观淋失率降低0.8,1.6个百分点。施肥增加土柱中氮素淋失、土壤残留、氮盈量,且与肥料用量呈正相关。因此,RN40%+OMB可较好地抑制氮素下移,减轻淋失风险,可以成为华北潮土区减少氮素淋溶的新型调控措施。

### 参考文献:

[1] 张福锁,张卫峰,马文奇,等.中国化肥产业技术与展望[M].北京:化学工业出版社,2007:32-33.  
 [2] 马少云,刘亚男,王艳群,等.河北省高产小麦—玉米轮作系统生境特征及养分平衡研究[J].河北农业大学学报,2015,38(1):8-13,47.  
 [3] 侯云鹏,孔丽丽,李前,等.滴灌施氮对春玉米氮素吸收、土壤无机氮含量及氮素平衡的影响[J].水土保持学报,

2018,32(1):238-245.  
 [4] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain [J]. Environmental Pollution, 2006, 143: 117-125.  
 [5] Gao W, Howarth R W, Swaney D P, et al. Enhanced N input to Lake Dianchi Basin from 1980 to 2010: Drivers and consequences [J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 376-384.  
 [6] 习斌,翟丽梅,刘申,等.有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):326-335.  
 [7] 李丹,孙志梅,王艳群,等.有机组分对N素在砂壤土中淋溶运移的影响[J].水土保持学报,2010,24(3):23-26.  
 [8] 崔振岭,陈新平,张福锁,等.华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系土壤硝态氮的适宜含量[J].应用生态学报,2007,18(10):2227-2232.  
 [9] 朱兆良.中国土壤氮素研究[J].土壤学报,2008,45(5):778-783.  
 [10] 宁建凤,邹献中,杨少海,等.有机无机氮肥配施对土壤氮淋失及油麦菜生长的影响[J].农业工程学报,2007,23(11):95-100.  
 [11] 温延臣,张曰东,袁亮,等.商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响[J].中国农业科学,2018,51(11):2136-2142.  
 [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:264-268.  
 [13] 朱兆良,文孝启.中国土壤氮素[M].南京:江苏科学技术出版社,1992:213-249.  
 [14] 辛思颖,翁玲云,吕敏娟,等.施氮量对冬小麦—夏玉米土壤氮素表观盈亏的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):257-263,269.  
 [15] 赵斌,王红,周大迈,等.片麻岩新成土中氮素淋溶迁移的模拟研究[J].水土保持学报,2013,27(1):17-21,70.  
 [16] 黄绍敏,张鸿程,宝德俊,等.施肥对土壤硝态氮含量及分布的影响及合理施肥研究[J].土壤与环境,2000,9(3):201-203.  
 [17] Mosier A R, Halvorson A D, Reule C A, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado [J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35: 1584-1598.  
 [18] 张千丰,元野,刘居东,等.室内模拟:生物炭对白浆土和黑土中氮素淋溶的影响[J].土壤与作物,2013,6(2):88-96.  
 [19] 孙波,王兴祥,张桃林.红壤养分淋失的影响因子[J].农业环境科学学报,2003,22(3):257-262.  
 [20] 舒晓晓,李迎春,王艳群,等.氮肥配施调控剂对麦田土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放及氮素利用的影响[J].河北农业大学学报,2016,39(5):30-36,56.