

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.04.007

# WRSIS 系统中稻田田面水和地下排水中氮素的动态变化特征

文 涛<sup>1,2</sup>, 邵孝侯<sup>2</sup>, 李圆圆<sup>2</sup>, 徐 征<sup>3</sup>, 江培福<sup>3</sup>, 邱 艳<sup>3</sup>, 王金兰<sup>4</sup>

(1. 南京市水利规划设计院有限责任公司, 江苏 南京 210006; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;  
3. 水利部综合事业局, 北京 100053; 4. 南京高淳县水务局, 江苏 南京 211300)

**摘要** :在江苏高淳县 WRSIS 系统中进行田间试验,对不同氮肥施用量下稻田田面水和地下排水中氮素动态变化特性进行分析。结果表明:施肥 1 d 后田面水 TN 和  $\text{NH}_4^+$ -N 质量浓度值达到最大,随着时间推移,质量浓度迅速下降,施肥 7 d 后 TN 质量浓度下降 70% ~ 76%,  $\text{NH}_4^+$ -N 质量浓度下降 83.5% ~ 85.5%。田面水中  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})/\rho(\text{TN})$  和  $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})/\rho(\text{TN})$  具有相似变化规律,先升后降,且  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})/\rho(\text{TN})$  显著大于  $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})/\rho(\text{TN})$ 。地下排水中氮素以  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  为主,施肥后  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度在 3.0 ~ 19.0 mg/L 的范围内; $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度较低,整个生育期质量浓度都在 1.1 mg/L 以下。田面水和地下排水中氮素质量浓度均随着施肥量的增加而增加。施肥 7 d 内是防止氮素大量流失的关键时期,需要控制排水,同时减少氮肥施用量能显著减少氮素地表流失和地下渗漏损失量。

**关键词** :地下灌溉-排水-湿地综合管理系统(WRSIS);稻田氮素;施用量;流失量;动态特征

中图分类号 :X592

文献标识码 :A

文章编号 :1004-6933(2012)04-0033-05

## Characteristics of dynamic change of nitrogen in surface water and underground drainage water in paddy fields in WRSIS

WEN Tao<sup>1,2</sup>, SHAO Xiao-hou<sup>2</sup>, LI Yuan-yuan<sup>2</sup>, XU Zheng<sup>3</sup>, JIANG Pei-fu<sup>3</sup>, QIU Yan<sup>3</sup>, WANG Jin-lan<sup>4</sup>

(1. Nanjing Water Planning and Designing Institute, Co., Ltd., Nanjing 210006, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Bureau of Comprehensive Development of the Ministry of Water Resources of China, Beijing 100053, China;

4. Bureau of Water Conservancy of Gaochun County, Nanjing 211300, China)

**Abstract** :Field experiments were conducted in the wetland reservoir sub-irrigation system(WRSIS) in Gaochun County, Jiangsu Province, in order to study the characteristics of dynamic change of nitrogen in the surface water and underground drainage water in paddy fields with different amounts of N fertilizer. The results show that the concentrations of TN and  $\text{NH}_4^+$ -N in the surface water reached the maximum values one day after fertilization, and decreased rapidly seven days after fertilization by 70% to 76% and 83.5% to 85.5%, respectively. The rates of  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})/\rho(\text{TN})$  and  $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})/\rho(\text{TN})$  in the surface water had a rising-to-descending trend, and  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})/\rho(\text{TN})$  was significantly greater than  $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})/\rho(\text{TN})$ .  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  was the main form of N in the underground drainage water, and the concentration ranged from 3.0 to 19.0 mg/L after fertilization. The concentration of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  was very low and its value was lower than 1.1 mg/L throughout the growth period of rice. The concentrations of N both in the surface water and in the underground drainage water increased with the amount of fertilizer. The experimental results show that it is necessary to control drainage within a week after fertilization, which is a crucial period for prevention of large amounts of N loss. Meanwhile, the N loss from the surface runoff and the leakage loss could be significantly reduced by decreasing the use of N fertilizer.

**Key words** : wetland reservoir sub-irrigation system; paddy field; amount of fertilizer; nitrogen; loss amount; dynamic characteristics

基金项目 :水利部综合事业局项目(2009 财策(11)号);公益性行业(水利)科研专项(201001040)

作者简介 :文涛(1986—)男,硕士,从事灌溉排水和农业水土环境保护研究。E-mail :Wentao65@163.com

通讯作者 :邵孝侯 教授。E-mail :Shaoxiaohou@163.com

我国是农业大国,人口众多,人均耕地面积较少,必须通过增施化肥来增加粮食产量以满足人民对粮食的基本需求。由于增施化肥,我国的化肥使用量已严重超标。据调查,我国化肥平均施用水平(折纯量)约达  $400 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,大大超出了发达国家设置的  $225 \text{ kg}/\text{hm}^2$  的安全上限<sup>[1]</sup>。施肥虽然对提高农作物产量起到了重要的作用,但有研究<sup>[2]</sup>表明,氮肥大量使用导致了氮素大量流失,流失的氮素导致的面源污染不仅使湖泊和海湾富营养化,而且造成了多数地区地下水硝酸盐和亚硝酸盐严重超标。农业面源污染由于时空范围广,随机性大,较难治理,目前还没有一种有效的技术治理面源污染。针对农业面源污染控制这一世界性难题,美国俄亥俄州州立大学研究出一种集灌溉、排水、湿地净化和排水再利用为一体的小型农田水利工程——地下灌溉-排水-湿地综合管理系统(WRSIS系统),该系统可有效提高水资源利用效率和控制面源污染<sup>[3-4]</sup>。我国南方主要粮食作物为水稻,研究WRSIS系统中稻田氮素的动态变化,对控制农田面源污染以及WRSIS系统在我国南方水稻种植区的推广和应用具有重大意义。

WRSIS系统由灌溉、排水和湿地3个子系统构成,各个系统通过一定的灌溉排水设施连接成为一个整体。其工作原理是将农田排水通过沟渠输送到湿地,经过湿地的净化,再将湿地净化过的水输送到水塘储存,需要灌溉时再由灌溉设施供水到田间。该系统是为了控制、减少乃至解决农田面源污染问题而采取的以水利技术为主的综合管理系统<sup>[4-5]</sup>。WRSIS系统在我国示范应用的时间不长,和国内推广应用的水稻节水灌溉技术和肥料运筹技术结合不多,在WRSIS系统中关于不同施肥量条件下稻田田面水和地下水中氮素动态变化的研究更少。相对于旱地土壤氮肥淋溶损失、稻田氮肥淋溶损失及通过地下水排出的氮素形态目前没有得到人们足够的重视。研究WRSIS系统中地下暗管排水技术对控制农田地下水排水中的TN含量、减少地下氮素渗漏量具有重要的作用。笔者利用WRSIS系统试验研究水稻不同施氮量条件下稻田田面水和地下排水中氮素动态特性,旨在防止稻田氮素流失污染地表和地下水,为WRSIS系统在我国推广应用提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

试验点位于江苏省高淳县桤溪镇瑶宕村,属于长江三角洲的太湖地区,亚热带湿润季风气候性气候,水稻是该地区的主要粮食作物。该地土壤为黄棕壤发育而成,土壤质地为黏壤土。土壤有机质、TN和

TP质量比分别为  $18.5 \text{ g}/\text{kg}$ 、 $1.3 \text{ g}/\text{kg}$ 、 $1.5 \text{ g}/\text{kg}$ ,速效氮和速效磷质量比分别为  $121.5 \text{ mg}/\text{kg}$ 、 $25.5 \text{ mg}/\text{kg}$ 。

### 1.2 试验设计

大田试验用地总面积约为  $0.6 \text{ hm}^2$ ,共3块试验小区,每块试验小区面积为  $0.2 \text{ hm}^2$ (长  $100 \text{ m}$ ,宽  $20 \text{ m}$ )。小区间设保护区,小区田埂筑高  $20 \text{ cm}$ ,小区四周用塑料薄膜防渗,以减少侧渗和串流。按照WRSIS设计标准,每个小区内埋设2条地下暗管,地下暗管埋深  $0.8 \text{ m}$ ,间距  $8 \text{ m}$ 。采用直径为  $5 \text{ cm}$  的塑料波纹管,将小区内地下排水波纹管横向连接起来,并与排水沟一侧的农田水位控制柜相连,控制柜的排水口通向田间农沟。水位控制柜(图1)是一个控制农田水位的简易装置,用来控制地下排水。

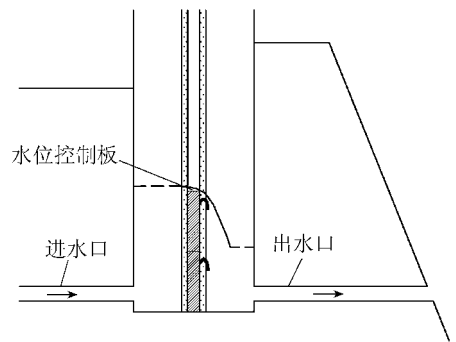


图1 水位控制柜示意图

水稻品种采用当地水稻品种86优8。在水稻的生长周期内,按照当地的水稻种植模式,播种前施基肥,基肥施用碳铵,而后再进行2次追肥,追肥施用尿素。灌溉排水各个处理方式一致,除了施肥量不同外其他所有的管理与当地的农作习惯相同。试验于2010年进行,6月7日施基肥,6月8日进行移栽,6月29日追施分蘖肥,8月2日追施穗肥。3个田块设置的3个氮肥处理方式如表1所示。

表1 大田施肥试验设计

试验区(田)号	处理方式	施肥量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )			
		基肥	分蘖肥	穗肥	总量
1	当地常规施氮肥	150	110	65.7	325.7
2	增量20%施氮肥	180	110	65.7	355.7
3	减量20%施氮肥	120	110	65.7	295.7

### 1.3 取样及分析方法

在每次施氮后的第1、3、5、7天取田面水样,试验开始后进行10d一周期的常规取样监测。每个小区内随机采取3个点的田面水,每个小区的地下排水从农田水位控制柜内取样,分析水样中的TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 质量浓度。TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 采用纳氏试剂比色法, $\text{NO}_3^--\text{N}$ 采用紫外分光光度法。

## 2 结果分析

### 2.1 田面水氮素动态变化特征

#### 2.1.1 田面水 TN 动态变化特征

田面水 TN 质量浓度反映了稻田氮素地表径流流失的潜能。由图 2 可见,施肥 1 d 后, TN 质量浓度迅速升高,且随着施氮量的增加而增加,但随着时间的推移, TN 质量浓度逐渐降低,最终将下降到施肥前的水平。在施基肥 7 d 后, 3 种施氮处理的 TN 质量浓度分别降到施肥 1 d 后的 24.1%、30.0%、24.0%。TN 质量浓度迅速下降主要是由地下渗漏、 $\text{NH}_3\text{-N}$  挥发和土壤吸附等原因造成的。另两次施追肥引起田面水 TN 质量浓度随时间的动态变化与施基肥时所表现出的特征相似。可见,施氮能较大地提高田面水氮素的流失潜能,且随着施氮量的增加逐渐增大,施氮后如稻田不发生排水,经过一周以上的时间内,田面水氮素质量浓度将大幅度下降,此后若遇降雨或灌溉需要排水,因田面水氮素流失引起的农业面源污染风险将得到明显降低。

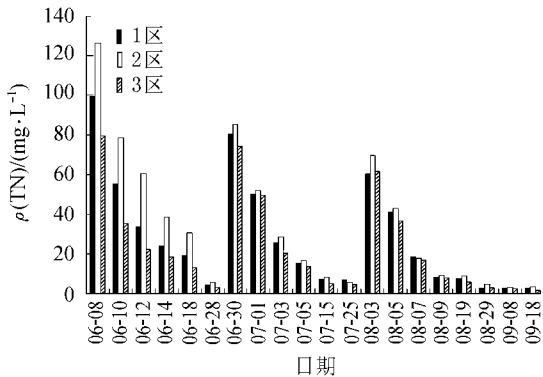


图 2 不同施肥区(量)田面水  $\rho(\text{TN})$  变化

#### 2.1.2 田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 动态变化

整个水稻生育期田面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的变化特征如图 3 所示。由图 3 可见,基肥施入 1 d 后, 3 个处理的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度均达到了峰值,分别为 68.1 mg/L、

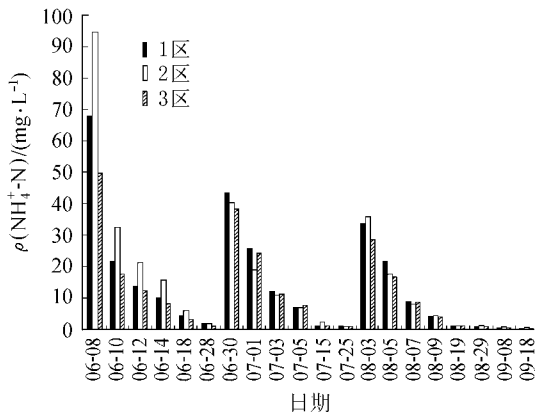


图 3 不同施肥区(量)田面水  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$  变化

94.8 mg/L、49.7 mg/L, 2 区质量浓度最高, 3 区质量浓度最低,这与基肥的施氮量呈正相关关系。由图 3 明显可见,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度大约在施肥 1 d 后达到峰值,随之质量浓度迅速下降,以施基肥为例, 3 d 后 3 个小区处理的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度与施氮 1 d 后相比分别下降了 68.0%、65.6%、64.8%, 7 d 后分别下降了 85.5%、83.5%、83.9%。施肥后在土壤吸附、水稻植株吸收和淋溶的综合作用下  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度迅速降低, 3 个小区均表现出相似的变化规律。试验研究结果充分说明施肥后 7 d 内实施控制排水是减少农田氮素外排引起面源污染的最佳时期,这与张志剑等<sup>[6]</sup>得出的结论相符。由图 3 还可见,在基肥施入后,增量施肥的处理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度始终最高,减量施肥质量浓度最低,表明施肥量也是影响稻田田面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度的关键因素。

田面水中  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})/\rho(\text{TN})$  水平是反映氮素转化与流失潜能相对水平的重要指标<sup>[7]</sup>。由图 4 可见,施肥约 1~2 d 后  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})/\rho(\text{TN})$  值达到最大,表明施肥后田面水以  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  为形态的相对流失潜在在较短的时间内达到最大。随着时间的推移,在水稻吸收、氨挥发、硝化、反硝化以及土壤吸附等过程的共同作用下,  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})/\rho(\text{TN})$  值呈现出迅速下降的趋势,说明田面水以  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  为形态的相对流失潜在随时间的推移迅速下降。试验表明施肥后  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  是田面水氮素流失的主要形态,减少  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的径流流失量即是减少稻田径流氮素流失量。

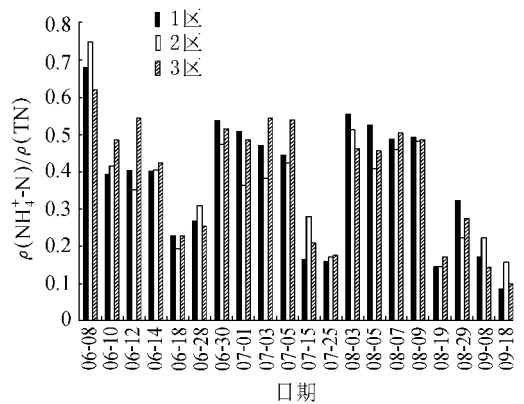


图 4 不同施肥区(量)田面水  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})/\rho(\text{TN})$  值变化

#### 2.1.3 田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 动态变化

水稻生育期各处理的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的变化特征如图 5 所示。由图 5 可见,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的质量浓度在施肥后没有迅速升高,而是在 3~4 d 后达到相对峰值, 3 个小区的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度峰值分别为 9.89 mg/L、15.42 mg/L、7.77 mg/L。小区内施肥后,肥料水解产生大量的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,在硝化细菌的作用下,发生硝化作用产生  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。施肥后  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度和

$\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度比不高,且上升缓慢,可能是由于稻田长期使用无机肥料,田间硝化细菌相对不活跃,硝化过程缓慢造成的<sup>[8]</sup>。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在质量浓度值达到最大后,由于稻田渗滤、硝化作用减弱、反硝化作用增强以及作物吸收利用等原因,其质量浓度值逐渐降低,最终回到施肥前的水平。增量施肥小区内的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度值一直高于其他 2 个小区,表明高施肥量对田面水中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度起到了正相关的作用。

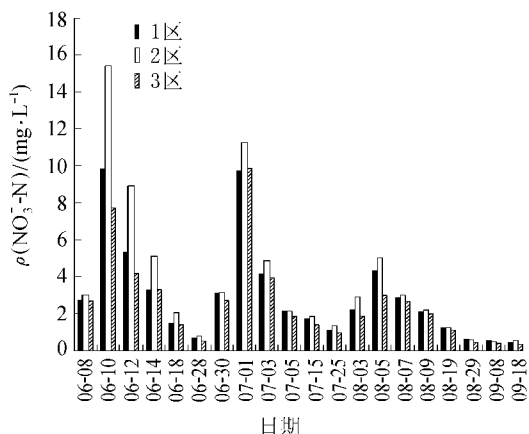


图 5 不同施肥区(量)田面水  $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$  的变化

图 6 中  $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})/\rho(\text{TN})$  值在施肥后 3~4 d 达到相对峰值,随后下降到较低水平。由于  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在雨水或灌溉条件下,易随着水下渗向下移动至根系活动层以下,所以田面水中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量较小。在施肥后, $\text{NO}_3^-\text{-N}$  所占比例相对较低, $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})/\rho(\text{TN})$  都在 0.25 以下,表明  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  不是施肥后地表径流氮素流失的主要形态,这与顾佳等<sup>[9]</sup>得出的结论相符。

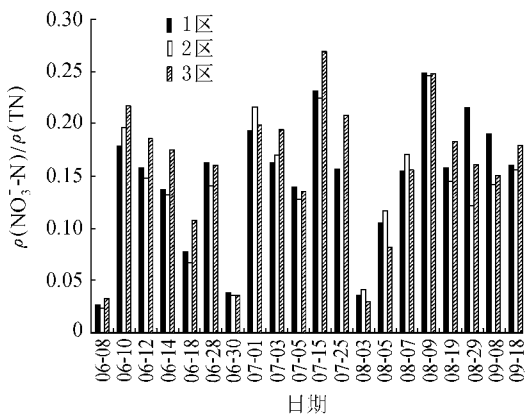


图 6 不同施肥区(量)田面水  $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})/\rho(\text{TN})$  值

## 2.2 地下排水氮素动态变化特征

### 2.2.1 地下排水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 动态变化

图 7 为不同施肥区(量)地下排水中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度的变化图,从图 7 可以看出,施入基肥 1 d

后 3 个小区内地下排水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度达到了 8.52 mg/L、10.71 mg/L、6.09 mg/L,在 5 d 后达到峰值,随后逐渐下降,施肥显著增加了稻田地下排水中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度。因为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  随着下渗而向较深土层移动,且土壤吸附的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  经过硝化细菌的作用后亦转化成  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,从而增加了地下排水中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的含量。显著增加的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量增加了  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  通过地下排水对水体的污染风险。从图 7 可见 3 个小区内减量施肥处理地下排水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度要明显低于正常施肥处理和增施氮肥处理,表明减少氮肥使用量能够有效减少氮素的渗漏损失,减轻对水体环境的危害。

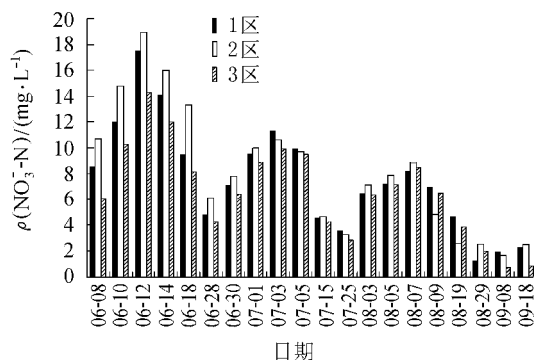


图 7 不同施肥区(量)地下排水  $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$  的变化

### 2.2.2 地下排水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 动态变化

图 8 为不同施肥区(量)地下排水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度的变化曲线,从图 8 可见,施肥 3~4 d 后,地下排水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度达到峰值,但增量并不大,表明施肥对地下排水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度变化虽有一定影响,但影响不大。3 次施肥过程,3 个处理地下排水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度均出现峰值,增量施肥峰值最大,减量施肥最小。和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  相比,地下排水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度较低,在非施肥阶段大都在 0.8 mg/L 以下。试验结果表明施肥量能够增加  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的地下渗漏损失,但是  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  不是稻田氮素地下渗

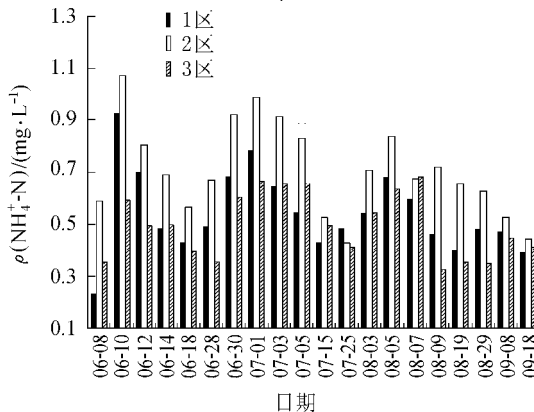


图 8 不同施肥区(量)地下排水  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$  的变化

漏损失的主要形态。这主要是由于  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  带正电, 易被土壤中的有机物组分和胶体粒子吸附, 不易下渗, 导致其含量随着土层深度增加而逐渐减小。

### 2.2.3 地下排水 TN 动态变化

地下排水中 TN 质量浓度反映了稻田氮素地下渗漏流失量的潜能, 从图 9 中可以看出施肥对地下排水中 TN 质量浓度影响显著。施入基肥后地下排水中 TN 质量浓度逐渐增加, 5 d 左右达到峰值, 这与  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的变化规律相同, 这是因为  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  占到了 TN 的 90% 以上, 是稻田氮素地下渗漏损失的主要形态。达到峰值后, 随着地下排水以及反硝化作用, TN 质量浓度亦逐渐降低。总体上看, 3 个处理小区中减量施肥小区地下排水 TN 质量浓度低于正常施肥和增量施肥小区, 表明减量施肥能够减少氮素的地下渗漏量。

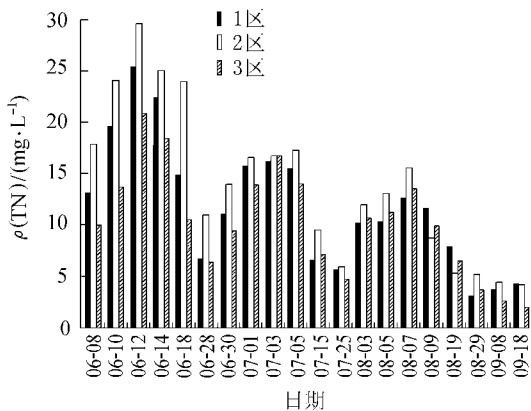


图 9 不同施肥区(量)对地下排水  $\rho(\text{TN})$  的影响

## 3 结果与讨论

a. 稻田田面水中 TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  质量浓度在施用氮肥后 1 d 左右即达到峰值,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  质量浓度要在 3~4 d 后达到相对峰值。田面水氮素的质量浓度与施肥量呈正相关, 即随着施肥量增大而增大。田面水  $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})/\rho(\text{TN})$  和  $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})/\rho(\text{TN})$  施肥后先增后降, 在水稻整个生育期,  $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})/\rho(\text{TN})$  值大多介于 0.2~0.7 之间, 而  $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})/\rho(\text{TN})$  值大都低于 0.2, 说明  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  是田面水氮素流失的主要形态。

b. 施肥后稻田各形态氮素浓度迅速升高到峰值, 随着时间推移其浓度逐渐下降, 7 d 左右均下降到较低水平。3 个处理小区 3 次施肥均表现出相似的变化特征, 如施基肥 7 d 后 TN 质量浓度下降 70.0%~76.0%,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  质量浓度下降了 83.9%~85.5%, 说明施氮 7 d 内实施控制排水是控制稻田地表径流、防止氮素流失的关键时期。

c. 稻田地下排水中的氮素以  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  为主, 主

要因为  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  易较多地被土壤所固持, 而  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  不易被土壤吸持造成了  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的大量下渗。地下排水中  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  质量浓度受氮肥施用量影响较小,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  质量浓度随施氮量增加而增大。控制氮肥施用量能减少氮素深层渗漏量, 这对保护农村水环境意义重大。

d. 化肥在田表面施用以后, 水层中以  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  为主, 随着时间推移, 一部分  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  转化为  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ , 一部分挥发了, 一部分随入渗水进入土层中。由于土壤胶体呈负电性, 入渗水中的  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  大部分被土壤吸附, 而入渗水中的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  向更深土层入渗。稻田中氮素在生物固持作用和硝化-反硝化作用等各种作用的共同作用下,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{N}_2$  等氮素形态相互转化, 有必要进一步开展 WRSIS 系统中氮素相互转化和损失的机理研究。

e. 从稻田氮素面源污染控制的角度看, 除了示范推广 WRSIS 系统外, 有必要结合产量提出适合当地的 WRSIS 系统水稻氮肥最佳施用量及施用技术, 以减少稻田中氮素的地表径流损失和深层渗漏损失, 从源头控制农业面源污染。

### 参考文献:

- [1] 刘蕾, 姜灵彦, 牛俊玲. 农业面源污染及环境生物防治技术研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(20): 9608-9610.
- [2] 吕耀. 氮素损失在农业生态系统中的非点源污染[J]. 农业环境保护, 1998, 17(1): 35-39.
- [3] 王修贵, 魏小华. 一种新型的现代小型农田水利工程介绍[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(1): 91-94.
- [4] ALLRED B J, BROWN L C, FAUSEY N R. Water table management to enhance crop yields in a wetland reservoir sub-irrigation system[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(4): 407-421.
- [5] 邱艳. 浅谈 WRSIS 对减少排水中氮、磷等污染成分的作用[J]. 中国水利, 2010(5): 31-32.
- [6] 张志剑, 董亮, 朱荫涓. 水稻田面水氮素的动态特征、模式表征及排水流失研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4): 475-480.
- [7] 王强, 杨京平, 沈建国, 等. 稻田田面水三氮浓度动态变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 51-55.
- [8] 高效江, 胡雪峰, 王少平, 等. 淹水稻田中氮素损失及对水环境影响的试验研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4): 196-198.
- [9] 顾佳, 李勇, 杨林章, 等. 直播水稻田田面水氮氮动态变化及径流损失研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(8): 3626-3628.

(收稿日期 2011-05-05 编辑 徐娟)