

文章编号:1000-582X(2011)07-114-06

## 尿素深施条件下模拟稻田中氮磷的动态特征及其降污潜力分析

冯国禄<sup>a</sup>, 龚军慧<sup>b</sup>

(吉首大学 a. 生态旅游重点实验室; b. 美术学院, 湖南 张家界 427000)

**摘要:**采用室外微区模拟试验,于水稻返青生长期,采用尿素造型深施方式,在3、7和11 cm等3个不同施肥深度处理(分别表示为 $t-3$ 、 $t-7$ 、 $t-11$ )条件下,对田面水和土壤中氮、磷、以及悬浮物(SS)等主要污染物的动态特征及其降污潜力进行了研究。结果表明,尿素深施后5~7 d内,田面水中氮素呈总体下降趋势,于第7 d后达较低的浓度水平;硝氮( $\text{NO}_3^-$ -N)各处理间浓度差异较小,但整体上要高于铵氮( $\text{NH}_4^+$ -N),就污染源而言,田面水 $\text{NO}_3^-$ -N负荷不容忽视。田面水氮素浓度与尿素深施处理没有相关性。与对照处理撒施(表示为 $t-c$ )相比,深施处理的田面水中氮素浓度可分别降低 $\text{NO}_3^-$ -N 29%~47%、 $\text{NH}_4^+$ -N 64%~89%、总氮(TN)79%~97%。 $t-3$ 和 $t-7$ 的田面水总磷(TP)和可溶性磷(DP)浓度都处于较高水平,与 $t-7$ 和 $t-3$ 相比较, $t-11$ 可分别降低TP浓度32%~73%、DP浓度92%~99%以及SS浓度50%~80%。因此,尿素造型深施至11 cm左右,具有显著的减排降污潜力,是控制农田面源污染的有效措施之一。

**关键词:**微区模拟;尿素深施;稻田中氮磷;降污潜力

中图分类号:S143

文献标志码:A

## Dynamics of nitrogen and phosphorus in paddy field under deep application condition of urea pill and its pollution-reducing potential

FENG Guo-lu<sup>a</sup>, GONG Jun-hui<sup>b</sup>

(a. Key Laboratory of Eco-tourism; b. Academg of Fine Arts, Jishou University, Zhangjiajie, Hunan 427000, P. R. China)

**Abstract:** Dynamics of the pollutants such as nitrogen, phosphorus and the suspended particulates in the field water and soil and its pollution-reducing potential are investigated in the rice plant returning-green stage using deep application technique of urea pill with the application depth of 3, 7 and 11 cm (expressed as  $t-3$ ,  $t-7$  and  $t-11$ , respectively) based on the micro-zone simulation field experiments. Results show that nitrogen content in the field water gradually decreases within 5~7 d after deep allocation of urea, and reaches the low level after the seventh day.  $\text{NO}_3^-$ -N concentration is higher than  $\text{NH}_4^+$ -N, but there is little difference between treatments. As the pollution source is concerned,  $\text{NO}_3^-$ -N in the field water should be considered. There isn't any correlation between nitrogen content in the water and urea application depth in the field. By contrast with blank treatment (expressed as  $t-c$ ),  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N and TN contents in the

收稿日期:2011-02-03

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)(2005AA601010-03);湖南省教育厅科学研究项目(10C1097);国家科技部重大水专项(2008ZX07211-001);吉首大学开放基金课题(10stlvb05)

作者简介:冯国禄(1964-),男,吉首大学副教授,湖南农业大学博士研究生,主要从事农业面源污染研究。

龚军慧(联系人),女,吉首大学副研究员,主要从事农业环境管理与情报信息工作,

(E-mail)gongjunhui6789@163.com。

field water with deep application of urea pill decrease 29% ~ 47%, 64% ~ 89% and 79% ~ 97%, respectively. The TP and DP are in the high level in the field water with  $t-3$  and  $t-7$ . The TP, DP and SS concentration in the field water with  $t-11$  decrease 32% ~ 73%, 92% ~ 99% and 50% ~ 80%, suggesting that deep application of urea pill into 11 cm layer of the field should have a significant pollution-reducing potential and become one of effective measures to control non-point source pollution of agricultural system.

**Key words:** micro-zone simulation; deep application of urea pill; nitrogen and phosphorus in the paddy field; pollution-reducing potential

氮磷肥是水体中氮磷污染物的最主要来源。在现代施肥概念中,合理施肥包括两个含义:充分发挥肥料的增产作用;严格控制施肥数量,不对环境造成危害。

不同的施肥方式,对氮素流失造成的影响也不同。当前已经达成共识的有:施肥要尽量考虑分次施肥,深施,还有平衡施肥<sup>[1]</sup>。其次,在稻田面源污染负荷较严重的情况下,为了兼顾农业的经济效益和环境效益,可以考虑对某季作物不施肥或尽量少施肥。

虽然氮肥表现流失率随施氮量提高而逐渐下降<sup>[2]</sup>,但氮素肥料的使用明显增加了氮素通过径流的损失量。每增施 1 kg/hm<sup>2</sup> 的氮素,通过径流损失的耕层上的氮即增加 0.56 ~ 0.72 kg/hm<sup>2</sup>。Decca 等<sup>[3]</sup>设置 3 个施肥时期(春季、夏季和秋季)的田间试验研究表明,径流离施肥时间越近,氮素流失越大。不同氮肥的施用对于氮素的流失也有着显著影响,在相同施肥量的实验条件下,与碳酸氢铵和普通尿素相比,控释尿素可有效地降低氮素流失 15% ~ 25%,而 70% 左右的氮素流失发生在监测的前期<sup>[4]</sup>。

南方春耕施足基肥后,在水稻的生长期以及中后期主要以撒施速效氮肥为主,肥料利用率不高。施肥期与降雨高频期的重叠容易导致农业面源污染的发生。因此,梅雨时期的施肥方式与方法,对于控制稻田面源污染至关重要。有研究表明,氮流失主要以水溶性氮为主,磷流失则以颗粒态磷为主,控制氮素要针对水溶性的铵氮,磷素则主要需控制颗粒态磷<sup>[5]</sup>。氮肥的不同施用方法直接影响着作物的产量及肥料利用率,氮肥深施是提高肥效的有效措施<sup>[6-8]</sup>。国内外在施肥后水稻田面水体中的氮磷素动态和流失机制<sup>[9-10]</sup>已有研究,但立足面源污染控制的施肥方式与技术的研究鲜有报道。

本研究于湖南农业大学实验基地,通过微区模拟水稻生长期深施追肥(尿素)试验,取样测定与分析水稻田面水中氮、磷以及悬浮物 SS 的含量的动态特征及其降污潜力,以期水稻施肥期与降雨高

频期的施肥技术与方法提供新的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试土壤取自于湖南农业大学“耘园”资源与环境学院实验基地的红潮土,其基本理化性状为:有机质 11.8 g/kg,全氮(N)1.12 g/kg,全磷(P)1.38 g/kg,全钾(K)27.6 g/kg,水解氮(N)96.6 mg/kg,速效磷(P)70.8 mg/kg,速效钾(K)142.6 mg/kg,pH 为 5.5。灌溉水为取自实验基地附近井水经蓄水池放置一周自然氧化后的备用水。尿素(作追肥用),标号为 GB2446—2001,含 N 为 46.0%。

### 1.2 试验设计

于湖南农业大学试验基地,设计砖混墙围成的模拟试验田,田内共 4 个试验区,各试验区(4 m × 1.5 m)呈两排对称排列,中间设有灌水渠。区内再用 PVC 板隔成 3 个小区,每个小区(1 m × 1.5 m)墙体的高 70 cm、宽 12 cm,地基入土 20 cm。为防止淋溶将试验田底做成水泥地面,上铺充分混匀后的红潮土,土层厚 45 cm 左右。在每个试验小区外侧设有离表土层不同高度的带橡胶塞的 PVC 排水管,通过打开橡胶塞使小区内田面水刚好从排水管中流出。本试验排水管高度为 3 cm。

5 月 11 日在模拟试验田插秧,供试水稻品种为“陆两优 996”超级杂交水稻。本试验于 2009 年 5 月 21 日开始实施,设 3、7、11 cm 等 3 个施肥深度处理,分别表示为  $t-3$ 、 $t-6$ 、 $t-11$ ,每个处理设 3 个重复,以撒施处理( $t$ -撒)为对照。所施肥料为追肥(尿素,标号为 GB 2446—2001,含 N 为 46.0%)。按 1 ha 追施尿素 112.5 kg 的常规施肥量,则亩施追肥 7.5 kg,折合每小区(1.5 m<sup>2</sup>)施尿素 17g;每 1.5 m<sup>2</sup> 小区插 35 株的秧,则平均每株追施尿素 0.48 g。

用水将尿素溶解后掺入取自试验小区中的泥土中,湿润后用手搓揉造型为直径为 1.5 ~ 2 cm 左右的泥球,每个泥球含尿素 0.71 g。采用深施方式,即在插秧 3 d 后距秧苗根际 3 cm 以上处,用手将泥球深施入 4 蔸禾苗之间(见图 1)。在对照区进行撒施

处理。试验期间处理小区全部采用常规水分管理,即保持各处理小区蓄水深度3~5 cm在试验期间不变。于施肥后的第1/24、1、2、3、5、7 d取样测定田面水中氮、磷以及SS含量。试验于5月29日测试完毕。

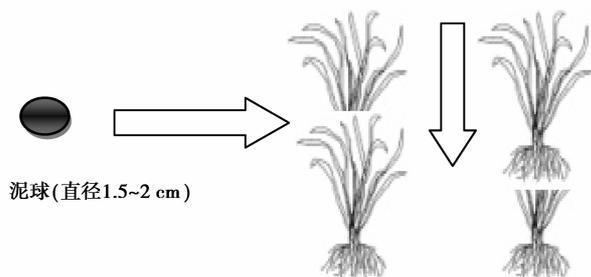


图1 尿素造型深施处理示意图

### 1.3 水样分析项目与方法

参照文献[11]的方法测定水样样品中各养分的含量。总氮(TN)采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;原水样经过滤后采用纳氏试剂光度法测定水样氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ );水样硝酸盐( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )氮采用酚二磺酸光度法;水样总磷(TP)测定为过硫酸钾氧化法;经微孔滤膜过滤后测定水样的溶解磷;磷的测定均采用钼蓝比色法;将被水样过滤后的微孔滤膜放在称至恒重的铝盒内,再将该铝盒置于103~105 °C的烘箱烘至恒重,增加的重量为不可滤残渣(SS)。所有水样在12 h内预处理完毕。

参照文献[12]的方法测定土壤样品中的铵氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、硝氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )、总氮(TN)和总磷(TP)。鲜样中的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 含量分别采用KCl提取分光光度法和酚二磺酸光度法;干样中的总氮(TN)采用浓硫酸消解分光光度法;总磷(TP)采用高氯酸-硫酸消解钼锑抗分光光度法;速效磷(AP)采用钼蓝比色法。

## 2 结果与分析

### 2.1 田面水氮素的动态特征及减排潜力分析

尿素深施后田面水氮素浓度变化趋势如图2-4。可见,田面水中尿素深施各处理的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 呈缓慢上升—峰值—下降的趋势; $t-3$ 和 $t-7$ 两处理的 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 浓度呈高一升一降的趋势; $\text{TN}$ 浓度呈平稳—升—降—升—降趋势, $\text{TN}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、各处理间浓度差异不明显,且在1周后下降到较低的含量水平; $\text{NO}_3^--\text{N}$ 各处理间浓度差异较小,但整体上要高于 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,处于较高的浓度水平。

已有研究表明,田面水氮素浓度随时间动态下降,首先是由于土壤的吸附和过滤作用,约占7%的氮被淋溶损失掉<sup>[13]</sup>。其次,与氨氮挥发有关,氨挥发过程十分复杂,且受许多因素的影响,是稻田氮素损失的主要途径之一。据Adasen等模拟研究发现,培养14 d后,污泥与耕层土壤表施处理的氨挥发为施氮量的40.3%<sup>[14]</sup>。

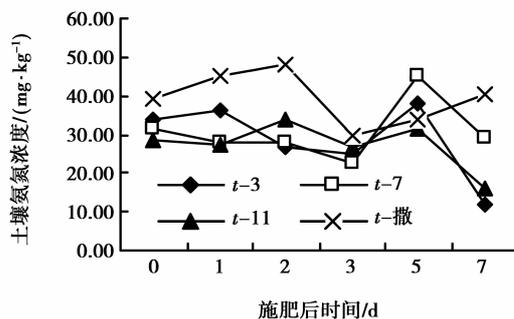
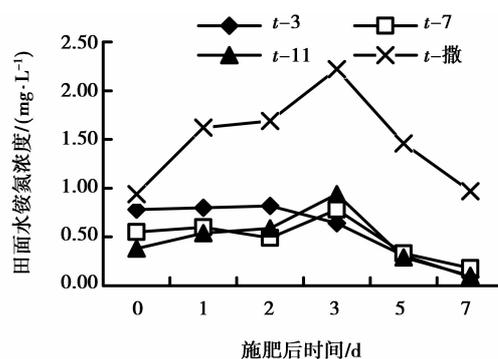


图2 尿素深施后田面水和土壤中铵氮的动态变化

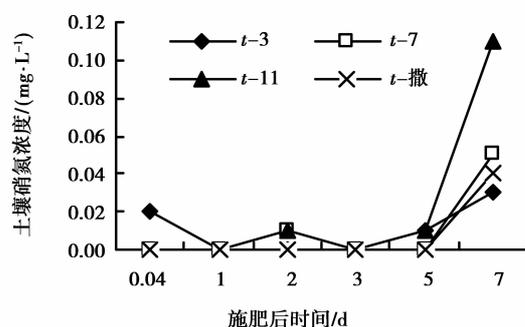
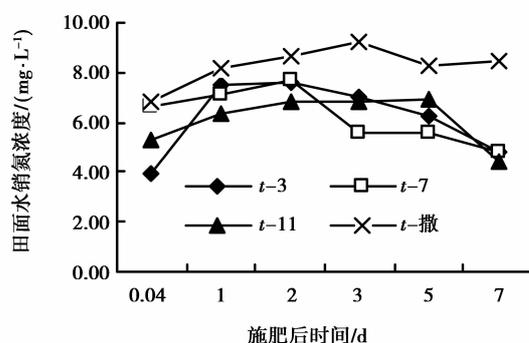


图3 尿素深施后田面水和土壤中硝氮的动态变化

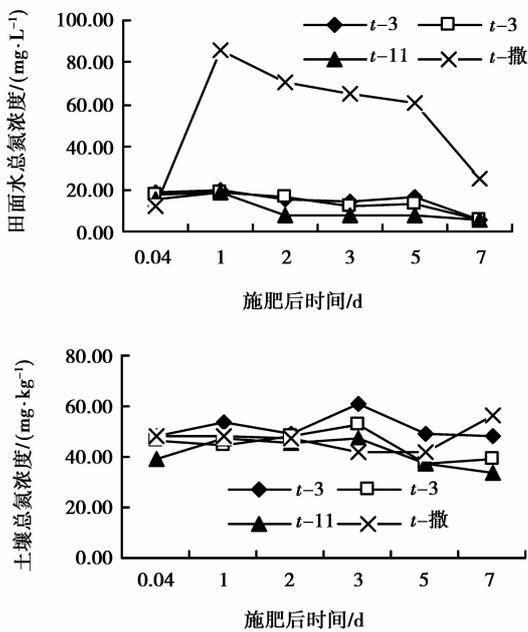


图 4 尿素深施后田面水和土壤中总氮的动态变化

本试验中,施入土壤的尿素其小部分以分子态溶于土壤溶液中,通过氢键作用被土壤吸附,其它大部分在脲酶的作用下水解成碳酸铵,进而生成碳酸氢铵和氢氧化铵。 $\text{NH}_4^+$  能被植物吸收和土壤胶体吸附。另外尿素中含有的缩二脲也能在脲酶的作用下分解成氨和碳酸。由于土壤中大部分的  $\text{NH}_4^+$  或被土壤吸附,或被水稻植物吸收,所以,尿素深施后由土壤释放到田面水中的  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度较低。田面水中  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度在第 3 天达峰值,而此时土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度下降(见图 2),说明土壤中尿素在第 3 天已基本转化完成。由于田面水中部分  $\text{NH}_4^+$  被土-水界面胶粒吸附重新进入土壤或因硝化作用转化为  $\text{NO}_3^-$ ,致使第 7 天后  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度处于较低水平。分析表明,尿素深施的各处理间浓度差异较小, $\text{NH}_4^+$ -N 浓度与深施处理没有相关性。就  $\text{NO}_3^-$ -N 而言,由图 3 可见,土壤中因硝化作用生成的  $\text{NO}_3^-$  不易被土壤胶粒吸附,随土壤溶液迅速进入田面水,致使田面水中  $\text{NO}_3^-$ -N 显著高于  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度。土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度在第 5 天后迅速升高,说明此时土壤和田面水中的  $\text{NO}_3^-$ -N 达到动态平衡状态。第 7 天后田面水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度仍处于较高浓度水平,因此,就污染源而言,田面水  $\text{NO}_3^-$ -N 负荷不容忽视。

由图 4 可见,深施处理的田面水中 TN 浓度在施肥前期浓度较高,可能与施肥时的扰动致使土壤中氮素(有机氮和无机氮)释放进入田面水有关。田

面水和土壤的 TN 浓度于第 3 天表现下降和升高的相对趋势,这是由于氨气挥发、土壤吸附、反硝化作用等综合因素的结果。就 TN 而言,各处理的田面水浓度差异较小,说明田面水 TN 浓度与深施处理没有相关性。

就撒施处理而言,田面水氮素含量显著高于深施处理,其中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 在第 2~3 天达峰值,说明  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度的增加有助于硝化作用;土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N、TN 浓度均高于深施处理,说明撒施处理后土-水界面主要发生对  $\text{NH}_4^+$  的吸附作用,而深施处理主要发生的是消化作用。

撒施处理后 TN 在施肥后第 1 天达峰值,说明此时尿素已完全溶解扩散于田面水。有研究表明<sup>[15,16]</sup>,尿素在土壤环境中转化受土壤 PH 值、温度和水分的影响,在土壤呈中性反应,水分适当时土壤温度越高,转化越快;当温 20 ℃ 时需 4~5 d 即可。试验地气温(见图 5)在试验期间气温达 20 ℃ 左右,从气温以及 TN 浓度在第 5 天急速下降的情况看,说明尿素在第 5 天左右已基本水解转化完全。由于尿素水解后生成铵态氮,表施会引起氨的挥发,尤其是在碱性或碱性土壤上更为严重<sup>[14]</sup>。

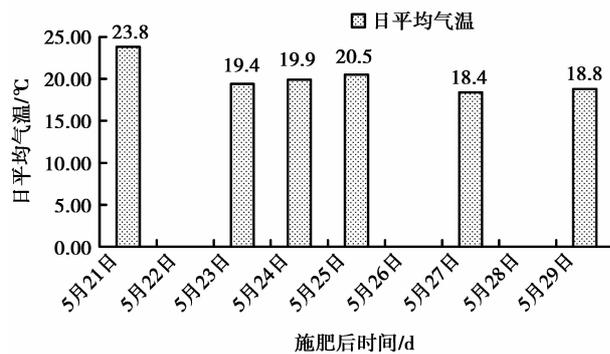


图 5 尿素深施处理试验期间气温

从以上分析可以看出,尿素深施 1 周后,深施处理与撒施处理相比,田面水中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度可降低 29%~47%, $\text{NH}_4^+$ -N 浓度可降低 64%~89%。就 TN 而言,虽然深施各处理间浓度变化不大,但施肥处理 1 周后,与撒施处理相比,田面水 TN 浓度可降低 79%~97%。很显然,深施处理可以显著地减少氮素损失。

## 2.2 田面水 SS 的动态特征及降污潜力分析

如图 6 所示,在施肥 1~2 d 后,深施处理的悬浮物(SS)含量迅速达到峰值,随着时间的推移呈下

降趋势,至第 7 天处于较低的含量水平。分析表明,由于施肥时对土壤的人为扰动,使得部分悬浮物向田面水扩散,田面水氮素增加,微生物大量繁殖等,是造成田面水中 SS 浓度在初期迅速提高的主要原因。田面水 SS 浓度随时间的推移在重力的作用下缓慢下降而重新进入土壤,以致第 2 天后 SS 浓度下降。撒施处理的 SS 浓度,除在 1 h 时和第 3 天后处于较低浓度水平外,其它变化趋势与深施处理一致。

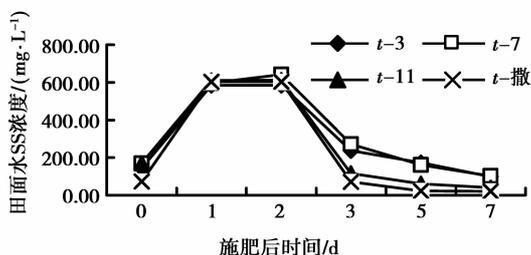


图 6 尿素深施后田面水 SS 的动态变化

可见,在施肥后的 3 d 内田面水 SS 浓度较大,  $t-3$  和  $t-7$  之间 SS 浓度差异较小,但在第 3 天后高于  $t-11$  和  $t-撒$ 。分析表明,与  $t-3$  和  $t-7$  相比较,  $t-11$  在第 3 天后可降低田面水 SS 浓度 50%~80%。尿素造型深施至 11 cm,可显著降低田面水 SS 浓度。

### 2.3 田面水磷素的动态特征及降污潜力分析

尿素深施后田面水和土壤中磷素的动态变化结果见图 7。可见,田面水中  $t-3$  和  $t-7$  的 TP、DP 浓度变化呈先升后降趋势;第 2~3 天达峰值后下降,于 1 周后下降到较低浓度水平。而此时土壤中 TP 浓度先缓慢上升,于第 3 天达峰值后维持较高含量水平。这可能是由于施肥深度相对较浅,施肥时的土壤扰动以及施氮引起的激发效应<sup>[17]</sup>,是导致土壤中 TP 和 AP 浓度升高的主要原因。田面水中  $t-11$  的 TP 和 DP 浓度变化不显著,处于较低的浓度水平。说明  $t-11$  施肥深度较深,减弱了土壤磷素向田面水的释放。就  $t-撒$  而言,田面水和土壤中 TN、DP 浓度总体上变化平稳,处于较低的浓度水平。

因此,由图 8 可见,  $t-3$  和  $t-7$ , 在 3 d 内田面水 TP 和 DP 浓度都处于较高水平,具有较高的磷素流失潜力。进一步分析表明,与  $t-7$  和  $t-3$  相比较,  $t-11$  在施肥后 3 d 内可降低 TP 浓度 32%~73%, DP 浓度 92%~99%。因此,尿素深施至 11 cm,可显著降低田面水磷素浓度。

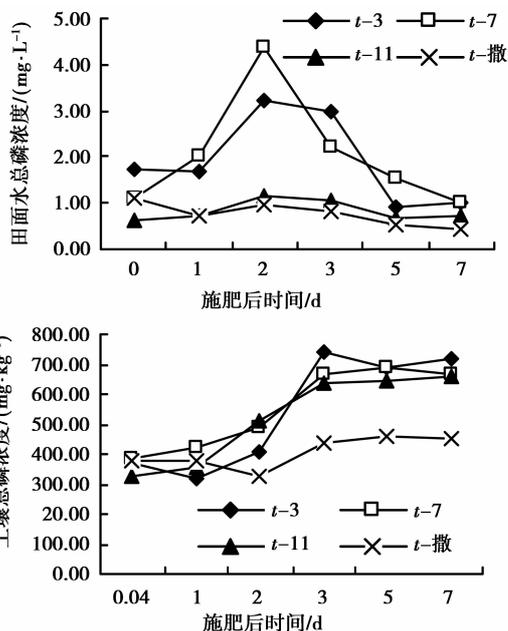


图 7 尿素深施后田面水和土壤中总磷的动态变化

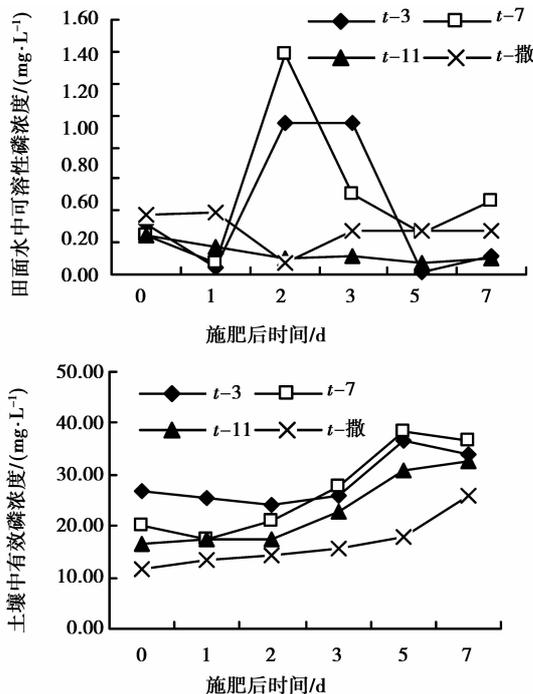


图 8 尿素深施后田面水可溶性磷和土壤中速效磷的动态变化

## 3 结论

在水稻返青生长时期深施尿素后得 5~7 d 内,田面水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度大于  $\text{NH}_4^+$ -N, TN 浓度在 5 d 内浓度较高,与撒施处理相比较,深施处理的氮素浓度可分别降低  $\text{NO}_3^-$ -N 29%~47%,  $\text{NH}_4^+$ -N 64%~89%, TN 79%~97%。  $t-3$  和  $t-7$  的田面水 TP 和 DP 浓度都处于较高水平,与  $t-7$  和  $t-3$  相比较,  $t-11$  可分别降低 TP 浓度 32%~73%、AP 浓度 92%~

99%以及第3天后的SS浓度50%~80%。因此,从降低田面水氮、磷以及SS等对周围水体污染负荷考虑,氮肥深施具有显著降低稻田面源污染负荷的潜力。尿素造型深施至11cm,是提高肥料利用率和降低环境污染负荷的有效措施与方法。

#### 参考文献:

- [1] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.  
ZHU ZHAO-LIANG. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1-6.
- [2] 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.  
ZHANG ZHI-JIAN, DONG LIANG, ZHU YIN-MEI. The dynamic characteristics and modeling of nitrogen in paddy field surface water and nitrogen loss from field drainage [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(4): 475-480.
- [3] DECCA M L, SIMON J C, JACQUE A. Nitrate leaching under grassland as affected by mineral nitrogen fertilizer and cattle urine[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33: 637-644.
- [4] 付伟章,史衍玺. 施用不同氮肥对坡耕地径流中N输出的影响[J]. 环境科学学报, 2005, 25(12): 1676-1681.  
FU WEI-ZHANG, SHI YAN-XI. Effect on nitrogen output in farmland with different nitrogen fertilization[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(12): 1676-1681.
- [5] 邱多生,沈生元,柳敏,等. 水稻生长期间氮磷流失形态的研究[J]. 上海农业科技, 2009, 38(2): 21-23.  
QIU DUO-SHENG, SHEN SHENG-YUAN, LIU MIN, et al. Research on the loss way of N and P during the growing period of rices [J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2009, 38(2): 21-23.
- [6] 朱兆良. 中国土壤供氮和化肥氮去向研究的进展[J]. 土壤, 1985, 17(1): 2-9.  
ZHU ZHAO-LIANG. On the research progress of the trace of soil supplying nitrogen and fertilizer nitrogen in China[J]. Soils, 1985, 17(1): 2-9.
- [7] 林葆,李家康. 中国化肥的肥效及其提高途径[J]. 土壤学报, 1989, 26(3): 273-280.  
LIN BAO, LI JIA-KANG. Fertilizer efficiency and measures to raise fertilizer efficiency in China—Main achievements of China national network on chemical fertilizer experiments (CNNCFE)[J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26(3): 273-280.
- [8] 陈子明,袁锋明,姚造华,等. 氮肥施用对土体中氮素移动利用及其对产量的影响[J]. 土壤肥料, 1995, 31(4): 36-42.  
CHEN ZI-MING, YUAN FENG-MING, YAO ZHAO-HUA, et al. The influence of nitrogenous fertilizer on the utilization of nitrogen in soil and production [J]. Soil and Fertilizer Sciences, 1995, 31(4): 36-42.
- [9] 张志剑,王光火,王珂,等. 模拟水田的土壤磷素溶解特征及其流失机制[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 139-143.  
ZHANG ZHI-JIAN, WANG GUANG-HUO, WANG KE, et al. Simulation of solution characteristics of soil phosphorus in paddy fields and its loss mechanism[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(1): 139-143.
- [10] 金洁,杨京平,施洪鑫,等. 水稻田面水中氮磷素的动态特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 357-361.  
JIN JIE, YANG JING-PING, SHI HONG-XIN, et al. Variations of nitrogen and phosphorus in surface water body of a paddy field [J]. Journal of Agro-environmental Science, 2005, 24(2): 357-361.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 南京农业大学主编. 土壤农化分析[M]. 北京:农业出版社, 1992.
- [13] 张瑜芳,张蔚棒,沈荣开,等. 淹灌稻田的暗管排水中氮素流失的试验研究[J]. 灌溉排水, 1999, 18(3): 12-16.  
ZHANG YU-FANG, ZHANG WEI-ZHEN, SHEN RONG-KAI, et al. Experimental Study of Leaching Losses of Nitrogen in Effluent from Drained Paddy Rice Field[J]. Irrigation and drainage, 1999, 18(3): 12-16.
- [14] Adasen F J, Sabey B B. Ammonia volatilization from liquid digested sludge affected by placement in soil [J]. Soil Sci Soc Am J, 1987, 51:1080-1082.
- [15] 程励励,文启孝,李洪. 盆栽和田间条件下土壤~(15)N标记肥料氮的转化[J]. 土壤学报, 1989, 26(2): 124-130.  
CHENG LI-LI, WEN QI-XIAO, LI HONG. Transformation of ~(15)N labelled fertilizer N in soils under greenhouse and field conditions [J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26(2): 124-130.
- [16] 王敬国,曹一平. 土壤氮素转化的环境和生态效应[J]. 北京农业大学学报, 1995, 21(S2): 99-103.  
WANG JING-GUO, CAO YI-PING. Environmental-ecological impact of N transformation in soil[J]. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis, 1995, 21(S2): 99-103.
- [17] 陈安磊,王凯荣,谢小立,等. 不同施肥模式下稻田土壤微生物生物量磷对土壤有机碳和磷素变化的响应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2733-2738.  
CHEN AN-LEI, WANG KAI-RONG, XIE XIAO-LI, et al. Responses of microbial biomass P to the changes of organic C and P in paddy soils under different fertilization systems [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2733-2738.