

# 不同施肥处理对稻田氮素径流和渗漏损失的影响

李娟<sup>1</sup>, 李松昊<sup>2</sup>, 邬奇峰<sup>2</sup>, 祝小祥<sup>2</sup>, 吴建军<sup>1</sup>

(1. 浙江大学国土资源与环境研究所, 浙江省亚热带土壤与植物营养重点开放实验室, 杭州 310058;

2. 临安市农业技术推广中心, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 采用田间试验, 研究了不施肥(CK)、常规施肥(CF)、90%常规施肥(90%CF)、80%常规施肥(80%CF)、控释复合肥(CRF)和有机—无机肥配施(MF)6种施肥处理对稻田氮素径流和渗漏损失的影响。结果表明: 水稻田面水总氮(TN)和铵态氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )浓度在施肥后第2天达到峰值, 之后快速下降, 第7天后降至峰值的15%以下并趋于稳定, 控制稻田氮素流失最关键的时间为施肥后1周。减量施肥可以有效降低田面水和渗漏水的氮素浓度。不同施肥处理(CK除外)TN径流损失量和氮素流失率分别为8.81~15.78 kg/hm<sup>2</sup>和施N量的2.58%~4.96%, 其中90%CF、80%CF、CRF和MF处理TN径流损失量分别较CF处理低22.05%, 34.16%, 44.17%和33.52%; TN渗漏损失量和氮素淋失率分别为18.86~40.39 kg/hm<sup>2</sup>和施N量的3.55%~11.77%, 其中90%CF、80%CF、CRF和MF处理的TN渗漏损失量分别较CF处理低24.57%, 26.52%, 53.29%和26.97%。减氮20%不仅能有效减少稻田氮素径流和渗漏损失, 还能有效保障水稻产量, 提高氮素利用率。

**关键词:** 减量施肥; 氮素浓度; 径流; 渗漏; 水稻产量

中图分类号: S511; S143.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0023-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.004

## Effects of Different Fertilization Treatments on Runoff and Leaching Losses of Nitrogen in Paddy Field

LI Juan<sup>1</sup>, LI Songhao<sup>2</sup>, WU QiFeng<sup>2</sup>, ZHU Xiaoxiang<sup>2</sup>, WU Jianjun<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Resources and Environmental Science, Zhejiang

Provincial Key Laboratory of Subtropical Soil and Plant Nutrition, Zhejiang University,

Hangzhou 310058; 2. Lin'an Extension Center of Agricultural Technology, Lin'an, Zhejiang 311300)

**Abstract:** A field experiment was conducted to investigate the effects of six fertilization treatments, no fertilization (CK), conventional fertilization (CF), 90% of CF (90%CF), 80% of CF (80%CF), fertilization with slow release complex fertilizer (CRF), and organic-inorganic fertilization (MF), on runoff and leaching losses of nitrogen in paddy field. Major results were as follows: Application of fertilizers sharply increased the concentrations of total nitrogen (TN) and ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ) in surface water. The concentrations reached peak values in 2 days and then rapidly decreased and stabilized at below 15% of the peak values in 7 days after fertilization. It was the critical period to control runoff losses of nitrogen in one week after fertilization. Reducing fertilization could significantly reduce the concentration of nitrogen in surface and leaching water. Except for CK, the amount and rate of TN losses from different treatments through runoff were 8.81~15.78 kg/hm<sup>2</sup> and 2.58%~4.96% of applied N, respectively. The losses of runoff TN from 90%CF, 80%CF, CRF, and MF were 22.05%, 34.16%, 44.17% and 33.52% lower than that from CF. Similarly, the amount and rate of TN losses from different treatments through leaching were 18.86~40.39 kg/hm<sup>2</sup> and 3.55%~11.77% of applied N, respectively. The losses of beaching TN from 90%CF, 80%CF, CRF, and MF were 24.57%, 26.52%, 53.29%, and 26.97% lower than that from CF. Reducing 20% of fertilizer N not only could reduce the runoff and leaching losses of TN, but also could ensure rice yield and improve utilization of nitrogen.

**Keywords:** reducing fertilization; concentration of nitrogen; runoff; leaching; paddy yield

收稿日期: 2016-04-25

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目“南方丘陵山地农区农业面源污染防治技术集成与示范”(2012BAD15B04-2)

第一作者: 李娟(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染方面的研究。E-mail: 21314101@zju.edu.cn

通信作者: 吴建军(1956—), 男, 教授, 主要从事土壤生态和农业生态方面的研究。E-mail: wujianjun@zju.edu.cn

中国占有世界水稻种植总面积的 20%，同时也占有世界水稻氮肥总消耗量的 37%<sup>[1]</sup>。为了满足不断增长的粮食需求量，稻田氮肥消耗量仍在持续增加<sup>[2]</sup>。如今我国单季稻氮肥平均用量为 150 kg/hm<sup>2</sup>，很多地区用量超过 300 kg/hm<sup>2</sup>，但氮肥回收利用率仅为 30%左右<sup>[3]</sup>。过量施肥导致大量的氮素通过氨挥发、径流、渗漏等途径损失，不仅造成巨大的经济损失，还会导致水体富营养化和污染地下水，严重危害人体健康<sup>[4]</sup>。研究表明，不同水肥管理模式下，稻田输出到环境中的氮素占氮素输入量的 13.1%~31.7%<sup>[5]</sup>。太湖流域稻麦轮作系统中，径流和渗漏损失的 TN 为 14~48 kg/hm<sup>2</sup>，占施氮量的 5.6%~8.3%<sup>[6]</sup>。通过优化施肥量和改变肥料种类，可以有效减少稻田氮素径流损失<sup>[7]</sup>。因此，如何高效地使用肥料，从源头减少稻田氮素流失，对防治农业面源污染意义重大。而关于不同施肥处理，尤其是控释肥和有机—无机肥配施，对稻田氮素渗漏损失影响的报道相对较少。同时，观测不同施肥处理对水稻田面水和渗漏水氮素浓度动态变化及其流失影响的研究更是鲜有报道。因此，本研究设计 6 种施肥处理，通过研究不同减量施肥和不同施肥种类或组合处理为主的源头控制技术对稻田氮素径流和渗漏损失的影响，试图为防控农业面源污染及政策制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于浙江省临安市板桥镇花戏村(119°55′34″E, 30°13′41″N)，属中纬度北亚热带季风气候。年平均气温为 15.8℃，年平均降雨量为 1 628 mm，其中全年降雨量的 70%左右集中于 5—11 月。试验田位于水稻种植区，长期种植水稻，土壤质地为砂壤土。0—20 cm 土壤理化性质为：pH 5.89，全氮 1.36 g/kg，全磷 1.05 g/kg，有机质 23.9 g/kg，碱解氮 145.7 mg/kg，有效磷 67.6 mg/kg，速效钾 114.8 mg/kg，CEC 8.58 cmol/kg。

### 1.2 试验设计

采用随机区组试验设计，共设 6 种施肥处理，每种处理重复 3 次，共 18 个试验小区。小区长宽为 11 m×4.5 m，小区之间用水泥砖切的田塍相隔，以防侧渗和串流。每个小区设有单独的进、排水口，排水口装有流量计，用来计量每个小区外排的径流量。各小区土层 60 cm 处理设有土壤渗漏水采样器(陶土管)，渗漏水的采集通过手动真空泵完成。

试验共设 4 个化肥用量等级：不施肥(CK)、常规施肥(CF)、90%常规施肥(90%CF)、80%常规施肥(80%CF)，所用化肥为复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:

15:15)。CF 处理 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 用量分别为 241, 90, 135 kg/hm<sup>2</sup>。90%CF 和 80%CF 处理 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 施用量分别较 CF 处理减少 10% 和 20%。另外，在 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 减量 20%的基础上，设置控释复合肥(CRF, N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=20:8:10)和有机—无机肥配施(MF, 无机肥 N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:6:15 和有机肥 N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=3:2:2)；不足的氮、钾素分别用尿素(含 N 46%)和氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%)补足。除 CRF 处理在施基肥时一次性施用，其他施肥处理 3 次氮素施用比例均为 2.8:5.5:1.7。

供试水稻品种为甬优 538。2015 年 6 月 6 日耙田施基肥后插秧，6 月 16 日第 1 次追肥，7 月 2 日第 2 次追肥。水稻于 2015 年 10 月 21 日收获，各采样小区单打单收，分别计稻谷产量和稻草产量。除试验设计要求外，其他田间管理同当地常规管理。

### 1.3 样品采集

每次施肥后第 2, 3, 5, 7, 14 天，上午 10:00 定时采集田面水样品 250 ml 和渗漏水样品 150 ml，及时带回实验室测定相关指标。水稻生长季，每次产生径流时，通过各小区排水口收集 250 ml 水样带回实验室测定相关指标，并记录每次径流结束后各个小区水表的读数以得到径流量。样品分析方法：每个水样分为两部分，一部分水样用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定总氮(TN)；另一部分水样过 0.45 μm 滤膜，用荷兰 Skalar 公司的流动注射分析仪测定铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N)和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N)。有机氮用总氮减去铵态氮和硝态氮进行估算。

水稻收获前 2 天，每个试验小区按“S”形采样法取 10 个样点，各 2 株水稻组成一个混合样，带回实验室后将其分为稻谷和稻草(茎叶)两部分，放置在烘箱中(105℃)杀青 30 min，之后 70℃烘干至恒重后称重。将烘干的样品粉碎后过 0.3 mm 筛，保存备用。水稻植株 TN 的测定采用凯氏定氮法，TP 的测定采用钼锑抗比色法。

### 1.4 数据统计分析

(1) 氮素径流流失量 = 径流水氮素浓度 × 径流量

(2) 氮素流失率 = (施肥处理氮素流失量 - 不施肥处理氮素流失量) / 施氮量 × 100

(3) 氮素渗漏损失量 = 水稻整个生育期土壤渗漏水的氮素加权平均浓度 × 渗水量<sup>[8]</sup>

(4) 渗水量 = 渗水速度 × 浸没天数

渗水速度参考黄沈发等<sup>[9]</sup>6 年的测定结果，即重质土壤、轻壤和砂壤土的稻季土壤渗水速度分别为 4 mm/d, 6 mm/d 和 8 mm/d，故取 8 mm/d 作为本研究的渗水速度。

(5) 植株吸氮量 = 稻谷干物质重 × 稻谷 TN 含量

+稻草干物质重×稻草 TN 含量

(6)氮素利用率=(施氮区的植株吸氮量-空白区的植株吸氮量)/施氮量×100%

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 进行统计分析和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 水稻田面水氮素浓度动态变化

如图 1 所示,不同施肥处理水稻田面水 TN 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度变化趋势基本一致。监测期内,CK 处理田面水 TN 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度维持在较低值,且明显低于其他施肥处理。CRF 处理在 6 月 6 日一次性施入稻田后 2 周内,田面水 TN 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度大致维持在 14.14~23.53 mg/L 和 5.52~12.55 mg/L 之间,2 周后逐渐降低并趋于稳定。这主要与控释复合肥中的氮素稳定而缓慢释放有关,也与施肥后 2

周内水稻植株较小而氮素吸收量少、之后随着植株长大而对氮素吸收利用加强有关。CF、90%CF、80%CF 和 MF 处理田面水 TN 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度在每次施肥后第 2 天均达到峰值,之后随时间的推移快速下降,第 7 天降至峰值的 15% 以下并趋于稳定。由于田面水中的氮素是稻田氮素流失的直接来源,所以施肥后一周内是控制氮素流失的关键时期。

从图 1 还可以看出,每次施肥后第 2 天,田面水 TN 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度梯度为  $\text{CF}>90\%\text{CF}>80\%\text{CF}>\text{MF}$ 。其中 90%CF、80%CF 和 MF 处理 TN 浓度峰值(3 次施肥平均)分别较 CF 处理低 13.60%, 22.31% 和 36.25%,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度峰值(3 次施肥平均)分别较 CF 处理低 16.20%, 27.77% 和 40.58%。减量施肥显著降低田面水 TN 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度峰值, MF 处理效果尤其明显。

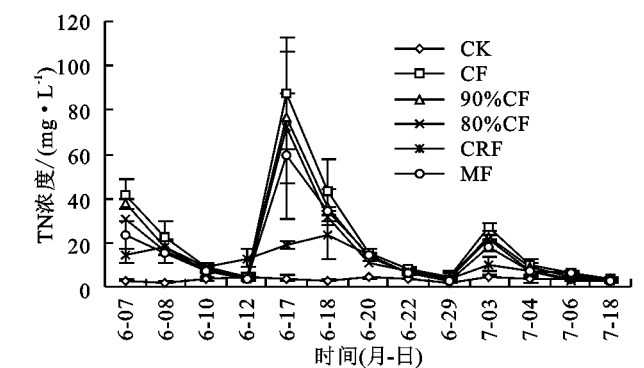
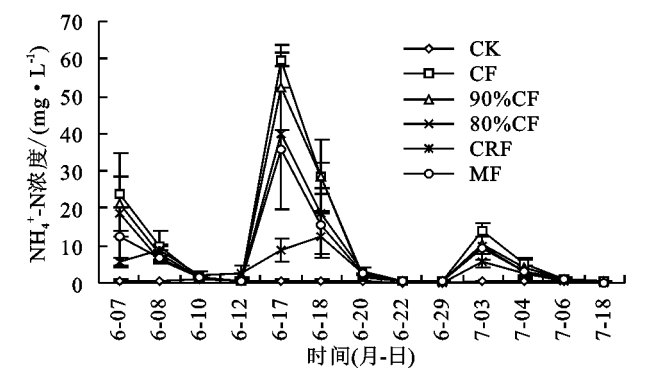


图 1 不同施肥处理田面水 TN 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度动态变化



不同施肥处理田面水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度动态变化如图 2 所示。监测期内,CK 处理  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度大致维持在 1.01~2.66 mg/L,且低于其他施肥处理。CF、90%CF、80%CF 和 MF 处理田面水的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度,在施基肥和第 1 次追肥后第 5 天,分别达到峰值 3.00~5.17 mg/L 和 5.37~7.81 mg/L,仅为同期  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度峰值的 19.05%~24.03% 和 12.03%~14.90%,说明施肥后田面水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度峰值显著低于  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度峰值且滞后。主要原因是稻田淹水条件下硝化作用微弱,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  难以转化为  $\text{NO}_3^--\text{N}$ 。此外,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  经过氨挥发、植物吸收等作用,能转化为  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的数量已经很少,也导致田面水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度较低。

### 2.2 水稻田面水不同形态氮素的平均浓度

监测期间,不同施肥处理田面水 TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  和有机氮的平均浓度(13 次采样的平均值)分别在 3.43~21.85 mg/L, 0.52~11.47 mg/L, 1.60~3.06 mg/L 和 1.31~7.33 mg/L 之间(表 1)。CK 处理田面水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  和有机氮占 TN 的比例分别为 15.24%, 46.70% 和 38.19%, 不施肥时田面水氮素以  $\text{NO}_3^--\text{N}$  为主、其次为有机氮。除

CK 外,不同施肥处理田面水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  和有机氮占 TN 的比例分别在 36.93%~53.71%, 13.70%~23.03% 和 32.34%~42.82% 之间,施肥后田面水中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  比例明显增加, MF 处理的有机氮比例也有较明显的提高。可见,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  是施肥水稻田面水氮素的主要形态,也将是稻田氮素径流损失的主要成分。

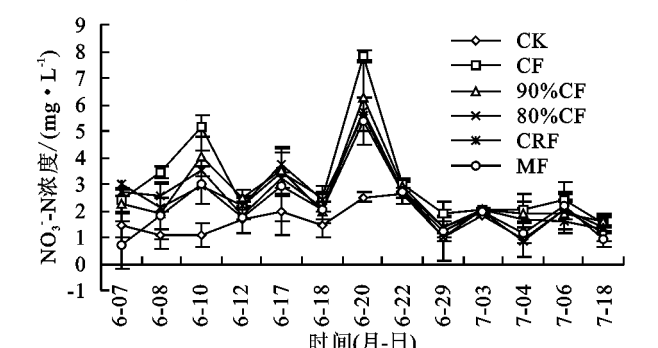


图 2 不同施肥处理田面水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度动态变化

不同施肥处理田面水 TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  平均浓度存在显著差异。其中 80%CF、CRF、MF 处理的 TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  平均浓度分别较 CF 处理低 23.14%~48.53%, 31.85%~63.79% 和 15.36%~30.28% ( $P<0.05$ )。可见,减氮 20% 能有

效降低田面水氮素浓度,CRF 处理效果尤其明显,主 要因为控释复合肥的养分缓慢且稳定释放。

表 1 监测期间水稻田面水不同形态氮素的平均浓度

处理	氮素平均浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )			NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> —N 占 TN	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> —N 占 TN
	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> —N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> —N	的比例/%	的比例/%
CK	3.43±0.20d	0.52±0.06d	1.60±0.14d	15.24	46.70
CF	21.85±2.63a	11.47±0.99a	3.06±0.09a	52.49	13.99
90%CF	18.73±2.75ab	10.06±1.43a	2.62±0.10b	53.71	13.97
80%CF	16.79±1.87b	7.82±0.75b	2.46±0.10bc	46.55	14.65
CRF	11.25±0.91c	4.15±0.68c	2.59±0.42b	36.93	23.03
MF	15.58±1.20b	6.78±1.00b	2.13±0.09c	43.51	13.70

注:同列数据后不同小写字母表示差异性达显著水平(P<0.05)。下同。

2.3 稻田渗漏水氮素浓度动态变化

如图 3 所示,不同施肥处理稻田渗漏水 TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 浓度变化趋势基本一致。监测期内,CK 处理渗漏水 TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 浓度维持在较低值,且明显低于其他施肥处理。第 1 次追肥后第 2 天,CF、90%CF、80%CF 处理渗漏水的 TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 浓度达到峰值 8.36~20.21 mg/L 和 4.86~11.16 mg/L,随后快速下降,第 5 天降至较低值并趋于稳定,这与同时期田面水

TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 浓度动态变化趋势基本一致。最可能的原因是砂壤土稻田田面水下渗速度快,第 1 次追肥施氮量占总氮量的 55%,复合肥产生大量的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N,使田面水氮素浓度快速升高并随水下渗造成的结果。此外,也可能与移栽不久的水稻植株对氮素吸收利用少和土壤对氮素的吸附固定能力较差有关,造成大量氮素淋失。CRF 和 MF 处理渗漏水 TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 浓度随时间的推移变化趋势不明显。

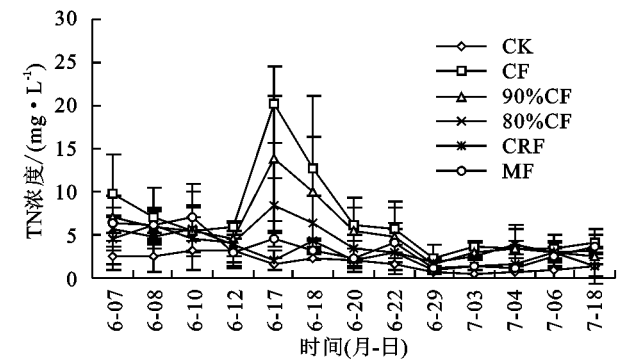
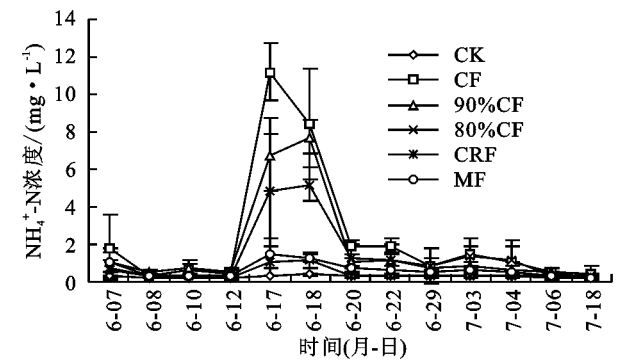


图 3 不同施肥处理稻田渗漏水 TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 浓度动态变化

如图 4 所示,不同施肥处理稻田渗漏水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 浓度的变化范围在 0.42~4.47 mg/L 之间。其中,CK 处理渗漏水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 浓度维持在较低值,并明显低于其他施肥处理。施基肥和第 1 次追肥后第 3~5 天不同施肥处理(CK 除外)渗漏水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 浓度有明显增加,之后逐渐降低,这与同时期田面水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 浓度动态变化趋势相似。整个监测期内,不同施肥处理稻田渗漏水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 浓度梯度大致为 CF>90%CF>80%CF>MF、CRF>CK,减量施肥能有效减少稻田渗漏水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 浓度。

2.4 稻田渗漏水不同形态氮素的平均浓度

监测期间,不同施肥处理稻田渗漏水 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 和有机氮的平均浓度(13 次采样的平均值)分别在 1.86~6.89 mg/L、0.29~2.38 mg/L、1.08~2.52 mg/L 和 0.49~1.99 mg/L 之间(表 2)。渗漏水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 和有机氮占 TN 的比例分别为 14.72%~34.48%,36.64%~58.04%和 26.21%~41.34%。可见,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 是稻田渗漏水氮素的主要形态。其中,CF、90%CF、80%CF 处理



渗漏水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 比例相当,主要因为第 1 次追肥后这 3 种处理渗漏水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 浓度特别高,提高了整个监测期间 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 的平均浓度,这也间接证明了部分田面水中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 直接随水下渗而淋失。不同施肥处理渗漏水 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 平均浓度存在显著差异。其中 80%CF 处理的 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 平均浓度分别较 CF 处理低 39.31%,42.08%和 26.34%(P<0.05),减氮 20%能有效降低渗漏水氮素浓度。

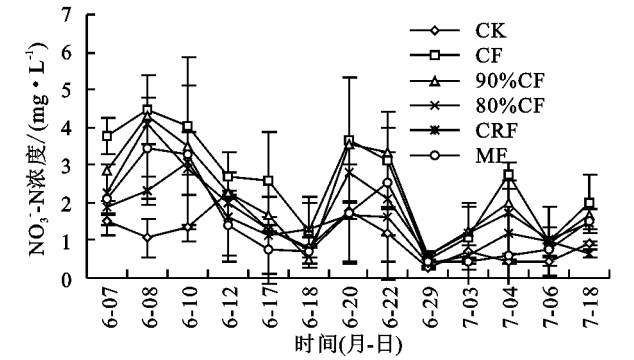


图 4 不同施肥处理稻田渗漏水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 浓度动态变化

表 2 监测期间稻田渗漏水不同形态氮素的平均浓度

处理	氮素平均浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )			NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> —N 占 TN	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> —N 占 TN
	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> —N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> —N	的比例/%	的比例/%
CK	1.86±0.22d	0.29±0.01c	1.08±0.01c	15.74	58.04
CF	6.89±1.65a	2.38±0.84a	2.52±0.14a	34.48	36.64
90%CF	5.73±1.06ab	1.73±0.33ab	2.18±0.19ab	30.24	38.13
80%CF	4.18±0.60bc	1.38±0.04b	1.86±0.44ab	32.97	44.39
CRF	3.06±0.78cd	0.45±0.15c	1.42±0.37bc	14.72	46.28
MF	3.63±0.25c	0.63±0.12c	1.51±0.28bc	17.22	41.44

**2.5 稻季不同施肥处理的氮素径流流失量**

水稻生长季共产生 4 次径流,分别为 6 月 8 日、6 月 15 日、6 月 30 降雨产生和 7 月 6 日烤田排水产生。如表 3 所示,CK 处理 TN 累积流失量为 3.82 kg/hm<sup>2</sup>,仅为其他 5 种施肥处理的 24.20%~43.37%,施肥显著增加了氮素流失量。其他 5 种施肥处理 TN 累积流失量为 8.81~15.78 kg/hm<sup>2</sup>,TN 流失率为施 N 量的 2.58%~4.96%。其中 90%CF、80%CF、CRF 和 MF 处理 TN 累积流失量分别较 CF 处理低 22.05%,34.16%,44.17%和 33.52%(*P*<0.05),说明减量施肥能有效降低 TN 累积流失量,CRF 处理效果尤其明显。

表 3 不同施肥处理氮素径流流失量

处理	不同日期氮素流失量/(kg · hm <sup>-2</sup> )								TN 累积流失量/ (kg · hm <sup>-2</sup> )
	6 月 8 日		6 月 15 日		6 月 30 日		7 月 6 日		
	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N	
CK	0.53	0.09	1.42	0.53	0.11	0.03	1.76	0.34	3.82d
CF	6.16	2.77	5.75	0.95	0.18	0.06	3.68	0.80	15.78a
90%CF	5.36	2.38	4.28	0.67	0.09	0.04	2.58	0.52	12.30b
80%CF	4.42	1.71	4.11	0.73	0.13	0.05	1.73	0.54	10.39bc
CRF	3.71	1.79	2.54	0.56	0.33	0.05	2.23	0.27	8.81c
MF	3.73	1.63	3.54	0.85	0.15	0.06	3.06	0.64	10.49bc

**2.6 稻季不同施肥处理的氮素渗漏损失量**

2015 年稻田浸水天数为 126 d,估算的不同施肥处理稻田氮素渗漏损失量见表 4。从表 4 可以看出,稻季不同施肥处理 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 渗漏损失量分别在 12.02~40.39 kg/hm<sup>2</sup>,2.18~7.86 kg/hm<sup>2</sup> 和 8.13~17.81 kg/hm<sup>2</sup> 之间。其中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 渗漏损失量分别占 TN 的10.11%~19.45%和 42.91%~67.61%,说明稻田土壤 60 cm 处氮素渗漏以 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 为主。这是因为土壤中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 易被土壤胶体吸附固定而不容易发生渗漏,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 则恰好相反。除 CK 处理外,不同施肥处理 TN 淋失率为施 N 量的 3.55%~11.77%,其中 CF 处理 TN 淋失率最高,CRF 处理 TN 淋失率最低。不同施肥处理 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 渗漏损失量存在显著差异,其中 90%CF、80%CF、CRF 和 MF 处理的 TN 渗漏损

失量分别较 CF 处理低 24.57%,26.52%,53.29%和 26.97%。可见,减量施肥能降低氮素渗漏损失,CRF 处理效果尤其明显。

**2.7 不同施肥处理的水稻产量及氮素利用率**

如表 5 所示,不同施肥处理稻谷产量在 6 535~8 161 kg/hm<sup>2</sup> 之间。CK 处理稻谷产量显著低于其他施肥处理,其中 CF、90%CF、80%CF、CRF 和 MF 处理分别较 CK 增产 23.62%,24.88%,19.28%,23.11%和 20.38%。施肥确实能增加作物产量,这表明了施肥的必要性。同时,不同施肥处理(CK 除外)水稻产量差异不显著,说明减氮 20%在短期内是可行的。不同施肥处理(CK 除外)氮素利用率为 17.51%~22.48%,其中 90%CF、80%CF、CRF 和 MF 处理的氮素利用率分别较 CF 处理高 0.91%,24.21%,28.38%和 12.62%,说明减氮 20%能有效提高氮素利用率。

表 4 不同施肥处理稻田氮素渗漏损失量

处理	氮素渗漏损失量/(kg·hm <sup>-2</sup> )				TN 淋失率/%
	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> —N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> —N		
CK	12.02±3.54c	2.18±0.29c	8.13±0.30b		—
CF	40.39±1.81a	7.86±0.13a	17.81±2.16a		11.77
90%CF	30.46±8.89ab	5.57±0.72ab	15.40±5.14a		8.50
80%CF	29.68±2.03ab	4.86±1.02bc	13.61±2.37ab		9.15
CRF	18.86±6.87bc	2.33±0.41c	8.54±4.46b		3.55
MF	29.50±4.21a	2.98±0.67bc	12.66±2.76ab		9.05

表 5 不同施肥处理的水稻产量及氮素利用率

处理	稻谷产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	稻谷 TN 含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	稻秆 TN 含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	植株吸氮量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	氮素利用 率/%
CK	6535±725b	12.43±0.12b	6.83±0.63b	124.72±10.55b	—
CF	8079±752a	14.00±0.83a	7.69±0.38ab	166.92±13.33a	17.51
90%CF	8161±457a	13.78±0.39a	7.03±0.59b	163.07±3.78a	17.67
80%CF	7795±420a	14.16±0.72a	8.14±0.58a	166.70±20.00a	21.75
CRF	8045±318a	14.24±0.51a	7.70±0.20ab	168.12±8.25a	22.48
MF	7867±383a	14.01±1.05a	7.69±0.61ab	162.78±6.59a	19.72

3 讨论

稻田氮素流失量与田面水氮素浓度密切相关,而后者与施肥时间关系密切。本研究中水稻田面水 TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 浓度在每次施肥后第 2 天达到峰值,随后快速下降,第 7 天后降至峰值的 15% 以下并趋于稳定。这是因为复合肥施入稻田后快速水解成 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N,使得田面水氮素浓度迅速升高,并且通过氨挥发、水稻对氮素的吸收利用、氮素的流失等过程而使田面水氮素浓度迅速下降。所以,施肥后 1 周内是控制稻田氮素流失的关键时期,这与郑小龙等<sup>[10]</sup>的研究结果一致。在本研究中,尽管 6 月 8 日产生的径流量很小,平均约 25.46 L/m<sup>2</sup>,但各施肥处理 TN 平均流失量仍高达 4.68 kg/hm<sup>2</sup>,约占 TN 累积流失量的 40.48%,并以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 为主,主要是因为 6 月 8 日是施基肥后的第 3 天,此时径流水氮素浓度较高。可见,施肥后短期内降雨等因素造成的径流会导致稻田氮素的大量流失,且产生径流的时间与施肥时间越接近,径流水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 占 TN 的比例越高,因为施肥后短期内田面水中的氮素主要以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 为主。

稻田氮素流失量还与径流量关系密切。例如本研究中,6 月 15 日为施基肥后第 10 天,此时径流水氮素浓度已经很低,但当天突降暴雨,产生的径流量很大,平均约 134.11 L/m<sup>2</sup>,导致除 CK 外的其他施肥处理 TN 平均流失量也高达 4.05 kg/hm<sup>2</sup>,约占 TN 累积流失量的 35.01%,其中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 占 18.52%。可见,即使田面水氮素浓度很低,大量径流也可造成较高的氮素流失。焦少俊等<sup>[11]</sup>的研究也表明,1/3~1/2 的稻田氮素径流损失是由施肥后的随机性大雨导致。因此,加强水稻田间排水管理,特别是施肥后的排水管理,尽量减少田面水的排放甚至零排放,对减少因稻田氮素流失而产生的农业面源污染意义重大。

淋失已经被确认是稻田氮素损失的主要途径之一。本研究中,不同施肥处理(CK 除外)TN 淋失率为 3.55%~11.77%,高于 Qiao 等<sup>[12]</sup>报道的稻季 TN 淋失率 1.86%~4.96%,这主要是因为氮素淋失受土壤质地、土层深度、降雨量、灌溉量和施肥种类等多种因素的影响,所以不同研究条件下的氮素淋失率会有差

异。本研究中 CRF 处理 TN 淋失量较 CF 处理降低 53.29%,与叶玉适等<sup>[13]</sup>的研究结果类似,说明控释复合肥确实能有效降低氮素淋失量。因为控释肥可根据作物吸收养分的规律调整养分供应,做到养分供应与作物吸收同步,进而减少氮素的淋失<sup>[14]</sup>。张庆利等<sup>[15]</sup>的研究也表明,速效化肥施入土壤后容易形成肥料的“微域点”,这会引起交换性 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 的淋失,破坏土壤结构和肥力。而施用控释肥很少形成肥料的“微域点”,有利于维持土壤结构和肥力。

4 结论

(1)施肥后 1 周内,田面水氮素浓度保持在相对较高水平,此时为控制稻田氮素流失的关键时期。加强施肥后的水稻田间排水管理,尽量减少田面水的排放甚至零排放,对减少稻田氮素流失意义重大。减量施肥可以有效降低田面水和渗漏水的氮素浓度,从而降低氮素流失风险。

(2)不同施肥处理(CK 除外)TN 径流和渗漏损失量分别为 8.81~15.78 kg/hm<sup>2</sup> 和 18.86~40.39 kg/hm<sup>2</sup>,TN 流失率和淋失率分别为施 N 量的 2.58%~4.96% 和 3.55%~11.77%。减氮 20% 不仅能有效减少稻田氮素径流和渗漏损失量,还能保障水稻产量及提高氮素利用率。

参考文献:

[1] Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Challenge and opportunity in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. Agricultural Sciences in China, 2002, 1(7): 776-785.

[2] Sun B, Zhang L X, Yang L Z, et al. Agricultural non-point source pollution in China: causes and mitigation measures[J]. Ambio A Journal of the Human Environment, 2012, 41(4): 370-379.

[3] Peng S, Buresh R J, Huang J, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. Field Crops Research, 2006, 96(1): 37-47.

[4] Qin B, Xu P, Wu Q, et al. Environmental issues of lake Taihu, China[J]. Hydrobiologia, 2007, 581(1): 3-14.