

前氮后移对水稻产量形成和田面水氮素动态变化的影响

段小丽，张富林，倪承凡，吴茂前，范先鹏，熊桂云

(湖北省农业科学院植保土肥研究所,湖北省农业面源污染防治工程技术研究中心,

农业农村部潜江农业环境与耕地保育科学观测实验站,

农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室,农业环境治理湖北省工程研究中心,武汉 430064)

摘要: 通过田间小区试验,在施氮量 180 kg/hm² 水平下,设置 4 个氮肥运筹比例,基肥 : 分蘖肥 : 穗肥的比例分别为 10 : 0 : 0(T1),4 : 3 : 3(T2),2 : 3 : 5(T3),0 : 3 : 7(T4),研究氮肥后移对水稻产量形成和稻田田面水氮素动态变化的影响。结果表明:与氮肥全部作为基肥施用的处理相比,将前期氮肥的 30%甚至 50%后移到穗肥施用,对水稻产量没有明显影响,而氮肥后移 70%至穗肥会使水稻产量显著下降。田面水中总氮(TN)和可溶性总氮(DTN)浓度在每次施肥后 1 天达到峰值,铵态氮(NH₄⁺-N)浓度在基肥和分蘖肥后 1 天达到峰值,穗肥后 3 天达到峰值,随后逐渐降低至与不施氮肥处理相当。整个基肥期、分蘖肥后 20 天内和穗肥后 9 天内是防止稻田氮素流失的关键期。施尿素后,DTN 是田面水氮素的主要部分,DTN 以无机氮(IN)为主,而 NH₄⁺-N 在 IN 中所占比例达 64.0%以上。比较水稻生育过程中氮素流失风险期内的 TN、DTN 和 NH₄⁺-N 三氮浓度,相比 T1,T2 的三氮浓度分别降低了 2.9%,1.6%,3.1%,T3 的三氮浓度分别降低了 15.5%,14.7%,22.3%,T4 的三氮浓度分别降低了 16.1%,22.9%,34.1%,结合产量,确定基肥 : 分蘖肥 : 穗肥比例为 2 : 3 : 5 的氮肥后移措施能够在保证水稻产量不下降的同时,有效降低稻田氮素的流失风险。

关键词: 氮肥后移; 水稻; 产量形成; 田面水氮素; 动态变化

中图分类号:S143.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0255-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2020.01.037

Effect of Postponing Nitrogen Application on Rice Yield Formation and Nitrogen Dynamics in Surface Water of Paddy Field

DUAN Xiaoli, ZHANG Fulin, NI Chengfan, WU Maoqian, FAN Xianpeng, XIONG Guiyun

(Institute of Plant Protection and Soil Science, Hubei Academy of Agricultural Sciences; Hubei Engineering

Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control; QianJiang Scientific Observing and

Experimental Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture,

P.R.China; Key Laboratory of Fertilization from Agricultural Wastes, Ministry of Agriculture and

Rural Affairs, P.R.China; Hubei Engineering Research Center for Agricultural Environmental Control, Wuhan 430064)

Abstract: With the nitrogen application rate of 180 kg/hm², four nitrogen application ratios were designed in a field experiment, including base fertilizer : tillering fertilizer : panicle fertilizer = 10 : 0 : 0 (T1), 4 : 3 : 3 (T2), 2 : 3 : 5 (T3), 0 : 3 : 7 (T4) respectively, to study the effect of postponing nitrogen application on rice yield formation and nitrogen dynamics in surface water of paddy field. The result showed that compared to T1, The treatments with 30% or even 50% of basal nitrogen fertilizer postponing to panicle fertilizer had no significant effect on rice grain yield, while the treatment with 70% of basal nitrogen fertilizer postponing to panicle fertilizer caused a significant decrease in rice grain yield. The peak concentrations of total nitrogen (TN) and total soluble nitrogen (DTN) in the surface water occurred after urea application for 1 day, NH₄⁺-N reached the peak on 1 day after basal fertilizer and tillering fertilizer and 3 days after panicle fertilizer, and then these 3 forms of nitrogen gradually reduced to basically close to the treatment with no urea application. These days between basal and tillering fertilization, 20 days after tillering fertilization and 9 days after panicle fertilization were the critical periods to control nitrogen loss from paddy field. After the urea application, DTN was the main part of the nitrogen in surface water of paddy field, and inorganic nitrogen (IN) was the major

收稿日期:2019-07-26

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800500);湖北省技术创新专项重大项目(2018ABA097);湖北省农业科技创新中心项目(2016-620-000-001-019)

第一作者:段小丽(1983—),女,助理研究员,主要从事土壤肥料和农业面源污染防治防控研究。E-mail:duanxlbh123@163.com

通信作者:张富林(1977—),男,博士,副研究员,主要从事面源污染监测与防控研究。E-mail:fulinzhang@126.com

component in DTN, while $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ accounted for more than 64.0% of IN. The concentrations of TN, DTN and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the critical periods for controlling N loss during rice growth period were studied. Compared with T1, the concentrations of these 3 forms of nitrogen were decreased by 2.9%, 1.6%, 3.1% respectively in T2, decreased by 15.5%, 14.7%, 22.3% respectively in T3, and decreased by 16.1%, 22.9%, 34.1% respectively in T4. Considering the rice grain yield, T3 was determined to be the effective measure, as it could ensure rice grain yield and meanwhile effectively reduce the risk of nitrogen loss from paddy field.

Keywords: postponing nitrogen application; rice; yield formation; surface water nitrogen; dynamic changes

氮是水稻生长和增产最重要的营养元素之一。在农业生产中,氮肥投入是保障水稻高产的重要措施。传统的施肥观念往往为了追求经济效益而过量施用氮肥且重施基肥,据调查,在江苏、浙江、湖南和广东等地,农民通常将氮肥总量的 55%~85%作为基肥和在移栽后 10 天内追施^[1]。较高的基肥氮对水稻返青和分蘖有一定的积极作用,但大量的氮肥在前期就施入土壤和灌溉水中,而此时水稻庞大的根系尚未形成,水稻对氮素的需求量不是很大,肥料氮在土壤和灌溉水中浓度高,停留时间长将加剧氮素的损失。损失的氮素通过径流、氨挥发、 N_2O 排放等途径进入到大气和水体环境,引发温室效应和一系列农业面源污染问题^[2-4]。彭少兵等^[1]提出,在中国大部分稻区,在水稻生长前期减少 30% 的氮肥不会导致水稻产量明显降低。朱兆良^[5]进一步强调指出,“前氮后移”(即减少生长前期的施氮量,重点施于旺盛生长期)可以减少氮肥损失。稻田面源污染的控制离不开持水状态下田面水氮素动态行为特征研究^[6]。目前为止,水稻氮肥运筹的研究主要侧重于施氮量和底肥与追肥的比例对水稻氮素利用效率的影响^[7-9],而关于前氮后移对稻田田面水氮素动态行为的影响报道较少。为此,在湖北省水稻主要产区之一的安陆市,设置不同氮肥运筹处理,通过大田试验研究前氮后移对水稻产量和田面水氮素动态特征的影响,以期水稻合理氮肥运筹和减少氮素对环境的污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于湖北安陆市车站村进行,该区属于北亚热带季风气候区,年均气温 15.9℃,总积温 4 908℃,无霜期 246 d,年均日照时间 2 100 h,年均降水量 1 084 mm。供试土壤为水稻土,试验前 0~20 cm 耕层土壤 pH 为 6.79,有机质含量为 11.35 g/kg,全氮、全磷和全钾含量分别为 0.97, 0.19, 12.9 g/kg,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 47.68, 8.44, 59.4 mg/kg,硝态氮含量为 1.12 mg/kg,铵态氮含量为 5.92 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设置不施氮肥(T0)、氮肥运筹 10:0:0(T1,比例数字分别为基肥、分蘖肥和穗肥占施氮总

量的比例,下同)、氮肥运筹 4:3:3(T2)、氮肥运筹 2:3:5(T3)、氮肥运筹 0:3:7(T4)5 个处理。每个处理重复 3 次,共 15 个小区,小区面积为 25 m²,随机区组排列。

T1~T4 处理氮肥施用量均为 180 kg/hm²,5 个处理均施等量的磷肥和钾肥, P_2O_5 和 K_2O 用量分别为 75, 120 kg/hm²。磷肥作为基肥一次性施入,钾肥分基肥和穗肥各 50% 施用。试验所用氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素、普钙和氯化钾。基肥全小区撒施,施后再耙田 1 次;分蘖肥和穗肥全小区撒施。

试验过程中水分管理按当地习惯进行,插秧时不排放泡田水,群体 80% 够苗后自然断水晒田,收获前一周自然断水搁田,每次灌水采用大水漫灌的方式进行,且保证灌水后各小区水层厚度基本一样。

水稻品种为“隆两优 3463”,按 16.7 cm×26.7 cm 的密度人工栽秧,每蔸 2 株。试验于 5 月 25 日移栽,9 月 26 日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 水稻产量及其构成因素 将每个小区一分为二,1/2 用于取样,1/2 用于测产。在水稻成熟期,每个小区调查 30 穴水稻的有效穗数,计算平均有效穗数,选取有代表性的植株 5 穴(所取植株的有效穗数与同期小区平均有效穗数基本相同)进行拷种,脱粒后用水漂法区分饱粒(沉入水底者)和空瘪粒,测定穗粒数和千粒重。没有取样的 1/2 小区全部收获测籽粒产量。

1.3.2 田面水采集和测定 每次施氮肥后动态测定田面水不同形态氮素含量。于采样当天上午 8:00—10:00,每个小区采集 8 个样点,混合后测定总氮(TN)、可溶性总氮(DTN)、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。TN 采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定;DTN 先用 0.45 μm 滤膜过滤,再用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用紫外分光光度法测定; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用靛酚兰比色法测定;可溶性有机氮(DON)用 DTN 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 差减计算获得;无机氮(IN)为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 之和。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 Origin 9.0 软件进行数据处理与制图,运用 SPSS 24.0 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥后移对水稻产量及其构成因素的影响

氮肥后移对水稻产量及其构成因素的影响见表 1。在不施氮肥条件下,水稻籽粒产量为 7 241.1 kg/hm²。在施氮总量均为 180 kg/hm² 的情况下,所有氮肥全部在前期施用,水稻籽粒产量为 8 401.8 kg/hm²,将前期氮肥的 30%甚至 50%后移到穗肥施用,对水稻产量没有明显影响,而氮肥后移 70%至穗肥会使水稻减产 13.1%。从产量构成因子来看,氮肥后移对有效穗数、千粒重没有明显影响,但过分后移会导致水稻贪青晚熟,每穗实粒数降低,与氮肥完全基施、后移 30%到穗肥、后移 50%到穗肥相比,后移 70%到穗肥的处理每穗实粒数分别降低 25.0%,24.3%,21.8%。这表明适当的氮肥后移对水稻产量没有影响,但应将穗肥氮的比重控制在 50%以内。

2.2 田面水不同形态氮素动态变化

由图 1~图 3 可知,各施氮处理的 TN 和 DTN 浓度变化趋势基本一致,无论施基肥、分蘖肥,还是施穗肥,二者均在施肥后急剧上升,1 天内达到峰值,然

后逐渐下降。施基肥的 3 个处理(T1、T2 和 T3),其 TN 和 DTN 浓度于基肥后第 3 天降低到峰值的 50%左右,第 5 天降低到峰值的 25%左右,之后趋于平稳。施分蘖肥的 3 个处理(T2、T3 和 T4),其 TN 和 DTN 浓度于分蘖肥后第 9 天降低到峰值的 50%左右,11 天之后仅为峰值的 30%左右并趋于平稳,20 天后与不施氮处理相当。施穗肥的 3 个处理中,TN 和 DTN 浓度变化随施穗肥量的不同略有不同,下降速度 T2<T3<T4,穗肥后的第 9 天这 3 个处理的 TN 和 DTN 浓度均降至峰值的 6%以下,与不施氮处理相当。

表 1 前氮后移对水稻产量及其构成因素的影响

处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	有效穗数/ (穗·m ⁻²)	每穗实 粒数/粒	千粒重/ g
T0	7241.1c	267b	112.5a	24.6a
T1	8401.8a	356a	114.5a	23.9ab
T2	8256.8a	351a	113.4a	23.3b
T3	7900.1ab	374a	109.8a	23.7b
T4	7301.8c	376a	85.9ab	24.0ab

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

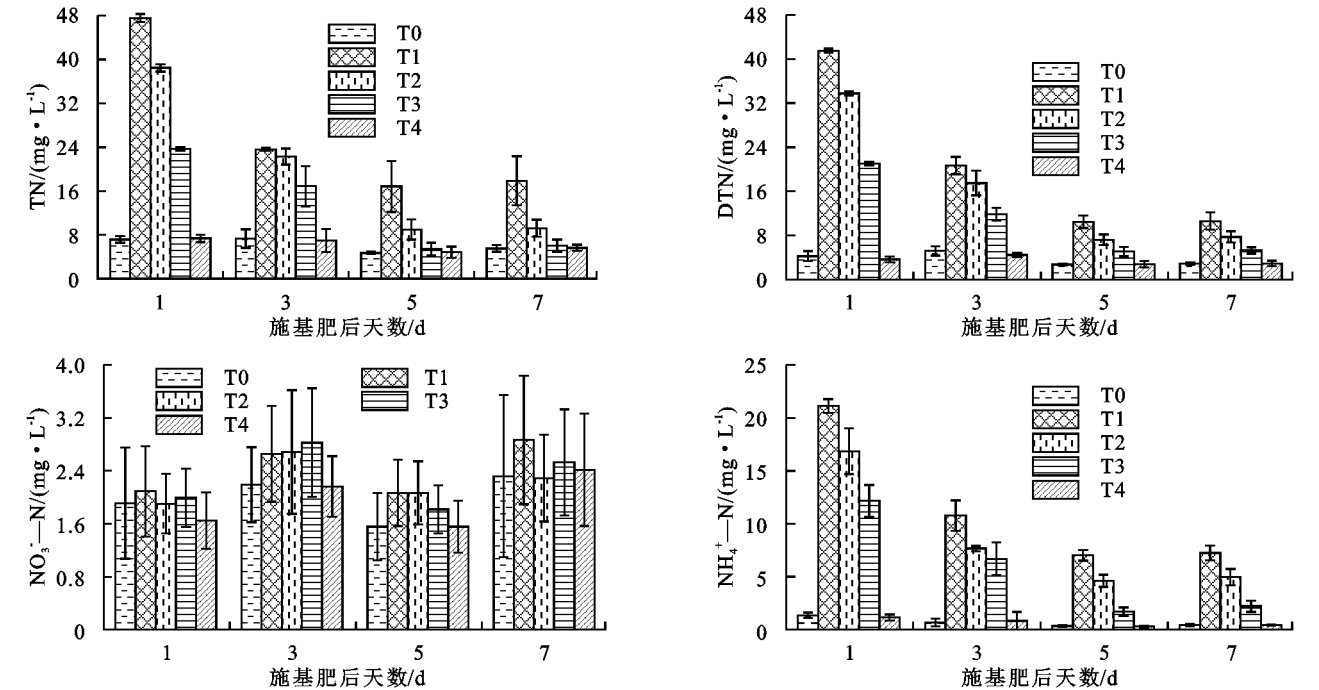


图 1 基肥期田面水 TN、DTN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 浓度变化

在施基肥和分蘖肥后各施氮处理 NH₄⁺-N 浓度变化规律与 TN 和 DTN 相同,也是施氮肥后 1 天达到峰值,基肥后 5 天趋于平稳,分蘖肥后 11 天仅为峰值的 11.0%~17.6%并趋于平稳,第 20 天降低至与不施氮处理相当。但施穗肥的 3 个处理,其 NH₄⁺-N 浓度均在施穗肥后开始升高,第 3 天达到峰值,而后逐渐降低,第 9 天 T2、T3、T4 处理的 NH₄⁺-N 浓度分别降至峰值的 4.79%,4.24%,4.21%,与不施氮处理的基本接近。

基肥期和分蘖肥期田面水的 NH₄⁺-N 于施氮肥后 1 天就达到峰值,这是因为尿素施入稻田后,水解成为大量的 NH₄⁺-N,基肥期和分蘖肥期的水稻根系尚不发达,对氮素的需求量小,吸收能力弱,较多的氮肥进入田面水,从而导致田面水中 NH₄⁺-N、DTN 和 TN 这 3 种氮素浓度短时间内达到峰值^[10-11]。施穗肥后田面水中 NH₄⁺-N 于第 3 天达到峰值,与施泽升等^[12]和吴俊等^[13]的结论一致,原因可能是穗肥期水稻对氮素吸收增加,和尿素水解成

NH_4^+-N 的过程有个消长变化,使得田面水中 NH_4^+-N 浓度呈现先升高后迅速降低的特点。

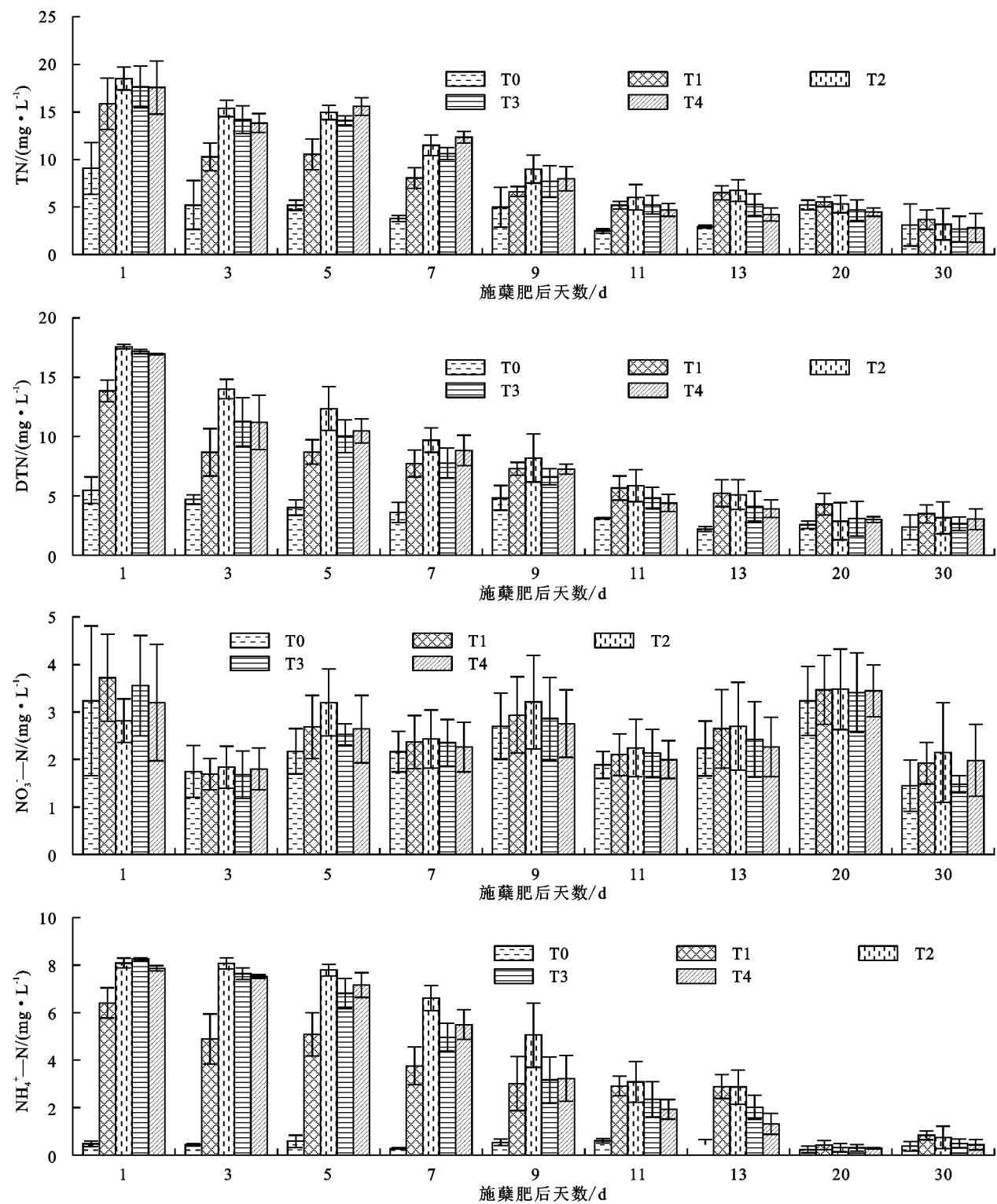


图 2 分蘖肥期田面水 TN、DTN、 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 浓度变化

从施肥量看,TN、DTN 和 NH_4^+-N 浓度随当次施氮肥量的增加而增加。比如基肥比例分别为 20%,40%,100% 的处理,在施用基肥后的第 1 天,TN 浓度分别达到的峰值为 23.67,38.47,47.59 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,DTN 浓度的峰值分别为 21.05,33.77,41.49 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+-N 浓度峰值分别为 12.16,16.85,21.14 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从施肥时期看,这 3 种形态的氮素浓度在施基

肥后均明显高于施分蘖肥和施穗肥后。比如 T2 处理,其 TN 浓度在施基肥后 1 天高达 38.47 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而施分蘖肥和施穗肥后的峰值分别为 18.53,23.34 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。3 种氮素浓度的下降速度表现为穗肥期>分蘖肥期>基肥期,与潘圣刚等^[11]和朱利群等^[14]的研究结果一致,这一方面因为水稻后期对氮肥吸收利用逐渐增加;另一方面也与后期田面水温度高、铵挥发损失快有关。

大部分研究^[15-16]表明,稻田田面水各形态氮素在施氮肥9天后下降至CK水平,因此施肥后9天内是控制氮素径流损失的关键时期,本试验中穗肥期各施肥处理的田面水氮素动态变化与前人^[15-16]研究结果基本一致,但分蘖肥期田面水的各形态氮素在施氮肥后下降速度较缓慢,于分蘖肥后第20天才基本降至CK水平,这除了与水稻吸收氮素的速率有关,还可能与施肥前土壤氮素水平的差异有关^[17]。本试验中施分蘖肥

距施基肥仅7天时间,在这7天时间内,水稻还处于返青阶段,对氮素的吸收量很小,有较多的基肥氮残留于土壤,使得施分蘖肥时土壤氮素含量较高,则分蘖肥氮被土壤吸附的量较少,因此分蘖肥氮在田面水中留存的量较多,田面水氮素浓度较高且下降速度较慢。因此对于基肥和分蘖肥施肥时间间隔较短(小于9天)的稻田,土壤氮素流失的最大风险时期约在施分蘖肥后20天内,应尽量避免在此期间排水晒田。

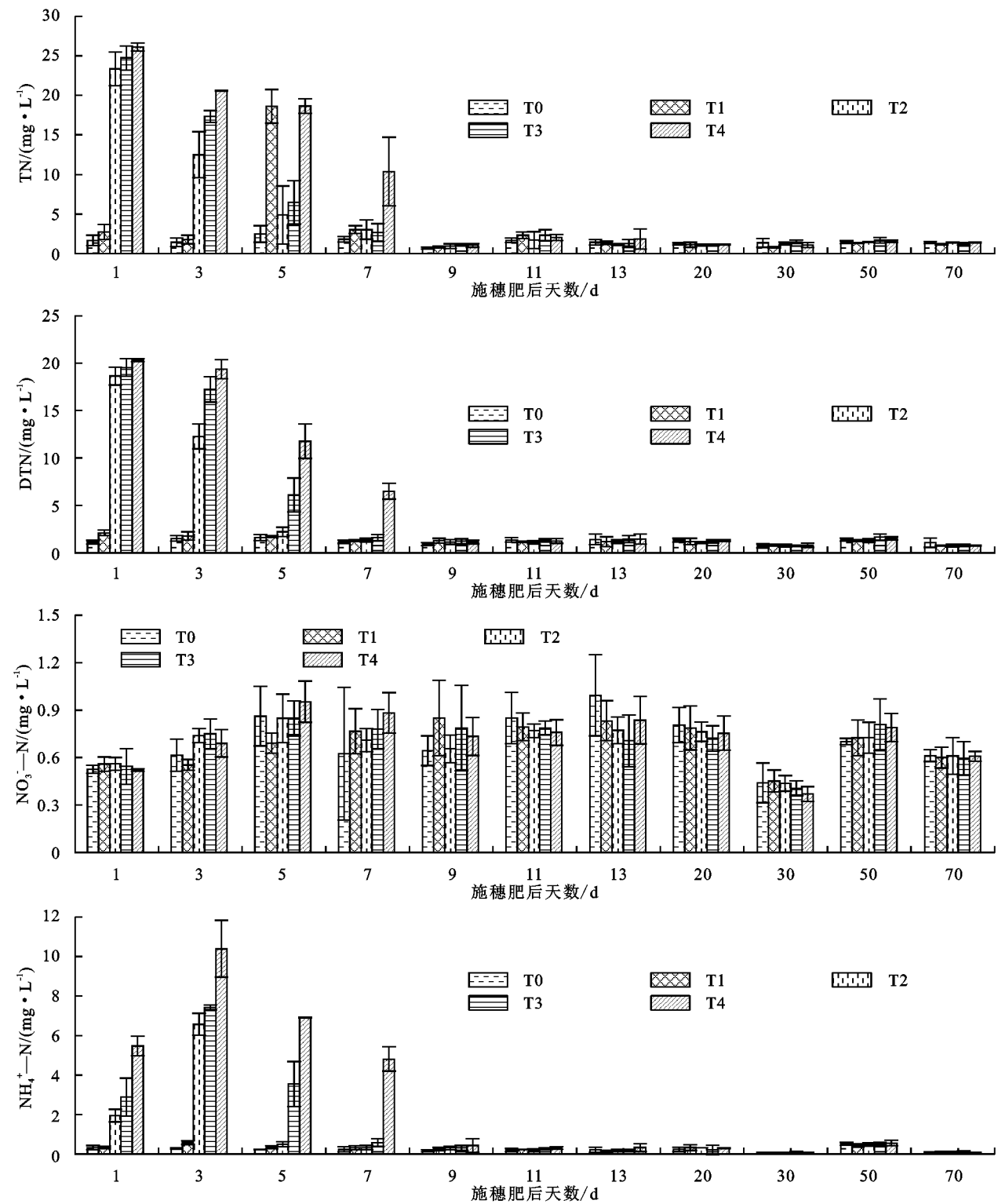


图3 穗肥期田面水 TN、DTN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化

田面水中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度远低于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 且其变化不同于其他形态氮素, 各施氮肥处理与 T0 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度没有明显差别, 说明本试验中稻田田面水的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要来源于土壤本底。对照 T0, 各施肥处理 3~5 天 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度有微弱的峰值出现, 之后平缓下降。施氮肥带入田面水的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 主要是尿素水解产生的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 通过硝化作用产生的, 而在淹水条件下硝化反应较弱, 同时由于反硝化作用和氮素的淋失等, 使得稻田田面水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度较低。后期由于水稻吸收, 田面水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度降低, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度也随之降低, 且 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变化滞后于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ^[18]。

2.3 稻田田面水各形态氮素浓度和比例

由表 2 可知, 水稻生育期内可溶性总氮是田面水氮素的主要部分, DTN/TN 高达 74.0%~84.0%。可溶性总氮中以无机氮(IN)为主, IN/DTN 达 68.6%~74.3%, 可溶性有机氮占可溶性总氮的比例较低, 为 25.7%~31.4%。施氮肥处理条件下, 稻田田面水的无机氮中以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为主^[19], 所占比例达到 64.0%~68.4%, 不施氮处理的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ /IN 仅为 20.4%, 说明施肥主要通过提高 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度, 增加氮素流失风险, 鉴于此, 以往的研究对稻田田面水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 动态变化关注较多。

比较本试验中各处理氮素流失风险期(基肥期, 分蘖肥期前 20 天内, 穗肥期前 9 天内)TN、DTN、

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度(表 3)。在基肥期内比较施基肥的 3 个处理(T1、T2 和 T3), 相比氮肥全作基肥施用的 T1 处理, 氮肥后移的 T2 使田面水 TN、DTN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度分别降低了 25.4%, 20.5%, 26.2%, 氮肥后移的 T3 其 TN、DTN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度分别降低了 50.9%, 48.0%, 50.8%。分蘖肥风险期内比较施分蘖肥的 3 个处理(T2、T3 和 T4), 与 T2 比较, T3 的 TN、DTN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度分别降低了 9.1%, 14.2%, 15.1%, T4 的 3 氮浓度分别降低了 7.6%, 12.7%, 16.8%。由于穗肥施肥量的关系, T3 和 T4 的 TN、DTN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度在穗肥风险期内都比 T2 高。从整个生育期内的氮素流失风险期综合来看, 相比 T1, T2 的 TN、DTN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度分别降低了 2.9%, 1.6%和 3.1%, T3 的 TN、DTN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度分别降低了 15.5%, 14.7%, 22.3%, T4 的 TN、DTN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度分别降低了 16.1%, 22.9%, 34.1%, 表明氮肥后移措施可以有效降低稻田氮素流失风险。

表 2 水稻生育期田面水各形态氮素比例

单位: %					
处理	DTN/TN	DON/DTN	IN/DTN	$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{IN}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{IN}$
T0	74.0	25.7	74.3	79.6	20.4
T1	76.3	26.1	73.9	33.9	66.1
T2	84.0	31.4	68.6	31.6	68.4
T3	83.7	30.2	69.8	34.4	65.6
T4	76.8	29.2	70.8	36.0	64.0

表 3 氮素流失风险期田面水不同形态氮素平均浓度

处理	基肥期			分蘖肥风险期			穗肥风险期			整个生育风险期		
	TN	DTN	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	DTN	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	DTN	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	DTN	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$
T0	6.19	3.78	0.69	4.86	3.81	0.45	1.62	1.27	0.25	4.22	3.06	0.45
T1	26.48	20.82	11.54	8.58	7.68	3.67	5.38	1.64	0.37	12.79	10.61	5.84
T2	19.75	16.56	8.52	10.93	9.45	5.23	8.94	7.12	1.93	12.42	10.44	5.66
T3	13.01	10.83	5.68	9.94	8.11	4.44	10.45	9.14	2.95	10.81	9.05	4.54
T4	6.22	3.47	0.67	10.1	8.25	4.35	15.35	11.82	5.61	10.73	8.18	3.85

3 结论

(1)在施氮量 180 kg/hm² 水平下, 与氮肥全作基肥施用的处理比较, 基肥: 分蘖肥: 穗肥比例为 4: 3: 3 和 2: 3: 5 的氮肥后移处理对水稻籽粒产量没有明显影响, 但基肥: 分蘖肥: 穗肥比例为 0: 3: 7 的氮肥后移处理, 其水稻贪青晚熟, 实粒数减少最终造成产量显著下降。

(2)田面水中 TN 和 DTN 浓度在每次施肥后 1 天达到峰值, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在基肥和分蘖肥后 1 天达到峰值, 穗肥后 3 天达到峰值, 之后逐渐下降, 根据 TN、DTN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度下降到不施氮水平的速度和时间, 确定整个基肥期、分蘖肥后 20 天内和穗肥后 9 天内为氮素流失风险期, 也是防止氮素流失的关键期。

(3)施氮肥后, 水稻生育期内 DTN 是田面水氮素的主要部分, DTN/TN 高达 74.0%~84.0%。DTN 以 IN 为主, IN 又以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为主, 所占比例达到 64.0%~68.4%。

(4)比较水稻生育过程中整个氮素流失风险期内的 TN、DTN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度, 相比氮肥全作基肥施用的 T1 处理, T2 的 TN、DTN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度分别降低了 2.9%, 1.6%, 3.1%, T3 的 TN、DTN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度分别降低了 15.5%, 14.7%, 22.3%, T4 的 TN、DTN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度分别降低了 16.1%, 22.9%, 34.1%。结合产量结果表明, 在湖北省安陆市水稻种植区, 基肥: 分蘖肥: 穗肥比例为 2: 3: 5 的氮肥后移措施能够在保证水稻产量不下降的同时, 有效降低稻田氮素的流失风险。

参考文献:

[1] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等.提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J].中国农业科学,2002,35(9):1095-1103.

[2] 刘建涛,张会永,王雪,等.氮肥调控剂施用对小麦生长、氮素利用及氮素表观平衡的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):209-214.

[3] 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.

[4] 周伟,吕腾飞,杨志平,等.氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J].应用生态学报,2016,27(9):3051-3058.

[5] 朱兆良.中国土壤氮素研究[J].土壤学报,2008,45(5):778-783.

[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] Wopereis-Pura M M, Watanabe H, Moreira J, et al. Effect of late nitrogen application on rice yield, grain quality and profitability in the Senegal River valley [J]. European Journal of Agronomy 2002, 17: 191-198.

[8] 鲁艳红,聂军,廖育林,等.不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):155-161,174.

[9] 刘红江,肖敏,张丽萍,等.前氮后移对水稻氮素吸收和利用效率的影响[J].江苏农业学报,2017,33(3):550-554.

[10] 汪华,杨京平,金洁,等.不同氮素用量对高肥力稻田水稻—土壤—水体氮素变化及环境影响分析[J].水土保持学报,2006,20(1):50-54.

[11] 潘圣刚,黄胜奇,曹凑贵,等.氮肥运筹对稻田田面水氮素动态变化及氮素吸收利用效率影响[J].农业环境科学学报,2010,29(5):1000-1005.

[12] 施泽升,续勇波,雷宝坤,等.洱海北部地区不同氮、磷处理对稻田田面水氮磷动态变化的影响[J].农业环境科学学报,2013,32(4):838-846.

[13] 吴俊,樊剑波,何园球,等.茗溪流域不同施肥条件下稻田田面水氮磷动态特征及产量研究[J].土壤,2013,45(2):207-213.

[14] 朱利群,田一丹,李慧,等.不同农艺措施条件下稻田田面水总氮动态变化特征研究[J].水土保持学报,2009,23(6):85-89.

[15] 汪丽婷,马友华,储茵,等.巢湖流域不同施肥措施下稻田氮磷流失特征与产量研究[J].水土保持学报,2011,25(10):40-44.

[16] 董世杰,鲁屹,唐婉莹,等.聚天门冬氨酸钙盐对水稻田面水中三氮动态变化的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):208-213.

[17] 张富林,吴茂前,夏颖,等.江汉平原稻田田面水氮、磷变化特征研究[J].土壤学报,2019,56(5):1190-1200.

[18] 王强,杨京平,沈建国,等.稻田田面水中三氮浓度的动态变化特征研究[J].水土保持学报,2003,17(3):51-54.

[19] 侯朋福,薛利祥,俞映琼,等.缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果[J].环境科学,2017,38(12):5326-5332.

(上接第 254 页)

[15] 孙霞,柴仲平,蒋平安,等.水氮耦合对苹果光合特性和果实品质的影响[J].水土保持研究,2010,17(6):271-274.

[16] 沙建川,葛顺峰,陈建明,等.袋控肥对苹果土壤 Nmin 及 ^{15}N —氮素吸收利用和损失的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):267-271.

[17] 尹鸿飞,梁银丽,朱帅蒙,等.夏剪强度对温室葡萄果实品质的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):287-293.

[18] 陈倩,刘照霞,邢玥,等.有机无机肥分次配施对嘎啦苹果生长、 ^{15}N —尿素吸收利用及损失的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1367-1372.

[19] 彭玲,董林水,陈印平,等.等量分次施氮对冬枣 ^{15}N 和 ^{13}C 利用与分配特性的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1380-1388.

[20] Ma B Q, Chen J, Zheng H Y, et al. Comparative assessment of sugar and malic acid composition in cultivated and wild apples [J]. Food Chemistry, 2015, 172: 86-91.

[21] 霍昭光,孙志浩,邢雪霞,等.北方烟区水肥一体化对烤烟生长、根系形态、生理及光合特性的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(9):1317-1325.

[22] 门永阁,安欣,许海港,等.不同负载量对苹果 ^{13}C 和 ^{15}N 分配、利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(3):702-708.

[23] Agrawal N, Agrawal S. Effect of different levels of drip irrigation on the growth and yield of pomegranate under Chhattisgarh region [J]. Orissa Journal of Horticulture, 2007, 35: 38-46.

[24] 黄丽华,沈根祥,钱晓雍,等.滴灌施肥对农田土壤氮素利用和流失的影响[J].农业工程学报,2008,24(7):49-53.

[25] 李伏生,陆申年.滴灌施肥的研究和应用[J].植物营养与肥料学报,2000,6(2):233-240.

[26] 刘传和,陈杰忠,刘运春,等.疏果对黄皮果实发育着色及树体器官碳水化合物含量的影响[J].园艺学报,2008,35(6):869-872.

[27] 路永莉,白风华,杨宪龙,等.水肥一体化技术对不同生态区果园苹果生产的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(11):1281-1288.

[28] 张鹏,范家慧,程宁宁,等.水肥一体化减量施肥对芒果产量、品质及肥耗的影响[J].中国土壤与肥料,2019(2):114-118.

[29] 彭良志,淳长品,江才伦,等.滴灌施肥对‘特罗维它’甜橙生长结果的影响[J].园艺学报,2011,38(1):1-6.

[30] 孙晓硕,谢同俊,蔡新华,等.水肥一体化管理对葡萄产量和品质的影响[J].农村科技,2017(6):22-25.