

氮肥运筹对水稻氮素吸收和稻田渗漏液氮素浓度影响

潘圣刚, 曹凑贵, 蔡明历, 翟 晶, 王若函, 黄圣齐, 高良亮

(农业部华中农业大学作物生理生态与栽培重点开放试验室, 湖北 武汉 430070)

摘 要 通过大田试验, 设计 3 个不同氮肥水平(0、150、240 kg N·hm⁻²)和两种不同施肥比例(基肥:分蘖肥:穗粒肥=40%:30%:30%、基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%), 研究了氮肥运筹对水稻氮素吸收和稻田渗漏液氮素浓度的影响。结果表明, 稻田渗漏液中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和总 N 浓度在施肥后第 3 d 达到最大、随后降低, 在施肥后的第 7 d, 分别降为峰值的 5.6%~16.9%、13.8%~22.5%、22.5%~34.5%。施氮水平处于 0~240 kg N·hm⁻² 时, 水稻产量、氮素积累总量(total N accumulation, TNA)和稻田渗漏液 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和总 N 浓度随着氮素水平的提高而显著增加; 在较高氮肥水平(240 kg N·hm⁻²)下, 与氮肥前移相比(基肥:分蘖肥:穗粒肥=40%:30%:30%), 采用氮肥后移(基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%)的施肥比例, 水稻产量和成熟期 TNA 分别增加 6.2%和 16.4%, 稻田渗漏液 NO₃⁻-N 及总 N 浓度分别降低 8.9%和 4.8%, 而对 NH₄⁺-N 浓度影响不显著, 说明适宜的氮肥运筹可以增加水稻的产量和氮素吸收, 减少氮素渗漏损失。

关键词 氮肥运筹, 水稻, 氮素吸收, 渗漏液

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)10-2145-06

Effects of Nitrogen Management on Rice Nitrogen Uptake and Nitrogen Concentrations in the Leachate from Rice Field

PAN Sheng-gang, CAO Cou-gui, CAI Ming-li, ZHAI Jing, WANG Ruo-han, HUANG Sheng-qi, GAO Gen-liang

(Key Laboratory of Huazhong Crop Physiology, Ecology and Production, Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract Effects of nitrogen management on rice nitrogen uptake and nitrogen concentration in the leachate from rice field were examined by a field experiment. In this study, the nitrogen was applied in three splits as 40%basal, 30% at 10 days after transplanting (DAT), 30% 36 DAT and 30% basal, 20% 10 DAT, 50% 36 DAT at three N rates as 0, 150, 240 kg N·hm⁻². The results showed that three N concentrations (NH₄⁺-N, NO₃⁻-N and total N) in the leachate reached the highest on the third day after fertilizer application, and thereafter decreased. Three N concentrations at 7th day were separately in ranges of 5.6%~16.9%, 13.8%~22.5%, 22.5%~34.5% at the third day. Grain yield, nitrogen uptake and three N concentrations in the leachate were significantly increased as the N rates increased from 0 to 240 kg N·hm⁻². At the N rate of 240 kg N·hm⁻², grain yield and nitrogen uptake were 6.2% and 16.4% higher when the nitrogen was applied in three splits as 30% basal, 20% 10 DAT, 50% 36 DAT, compared with that of the N splits as 40%basal, 30% 10 DAT, 30% 36 DAT. However, the concentrations of NO₃⁻-N and total N in the leachates were 8.9% and 4.8% lower in former splits than the latter splits, respectively. No obvious differences in the NH₄⁺-N concentration in the leachates were observed among different N splits. The results revealed that appropriate fertilizer application in three splits as 30% basal, 20%10 DAT, 50% 36 DAT could increased grain yield, nitrogen uptake and decreased nitrogen leaching loss.

Keywords nitrogen management, rice, nitrogen uptake, leachate

水稻是我国南方种植面积最大和产量最高的粮食作物,也是氮肥消耗量最多的粮食作物。目前中

国已成为世界氮肥的第一大消费国^[1],由于氮肥的不合理使用,不仅降低了氮肥的利用效率^[2-4],恶化了稻米品质^[5],由此引起的农业面源污染也引起了人们的广泛关注^[6-7]。目前,农业氮素面源污染研究主要集中在氮素淋溶损失^[8-10]、氮挥发^[11-12]、稻田水体氮素变化^[13-14]等方面。由于稻田渗漏液取样和监测的复杂性,而对稻田渗漏液氮素动态变化特征研究不

收稿日期 2009-03-19

基金项目 国家重大科技资助项目((2004BA520A02)

作者简介 潘圣刚(1976—),男,河南驻马店人,博士研究生,主要从事稻田养分循环研究。E-mail: panshenggang2008@126.com

通讯作者:曹凑贵 E-mail: ccgui@mail.hzau.edu.cn

多^[15]。研究发现,尿素施入稻田后,首先转化为氨氮,氨氮在好氧条件下被硝化为硝氮,而总氮是水环境潜在污染状况的主要指标。因此,研究氮肥运筹对水稻氮素吸收和稻田水体三氮的动态变化过程,对提高氮素的利用效率、减少农田氮素损失、保护地下水体安全具有极其重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验田概况

试验于 2008 年在华中农业大学随州试验站(均川镇幸福村 4 组)进行。供试土壤为水稻土,耕作层土壤深度为 27 cm,犁底层厚度 5 cm。耕作层土壤的基本理化性状为 pH 5.56、有机质为 24.35 g·kg⁻¹、全 N 1.34 g·kg⁻¹、全 P 53.94 mg·kg⁻¹、速效 K 41.65 mg·kg⁻¹。

1.2 大田试验设计

供试水稻品种为扬两优 6 号(农业部华中农业大学作物生理生态与栽培重点开放实验室提供),4 月 13 日播种,两段育秧,6 月 3 日移栽,大田栽插密度为 2.7×10⁵ 穴·hm⁻²,宽窄行栽插,窄行:宽行:株距=20.0 cm:33.3 cm:14.0 cm,每穴插 2 株。小区面积为 77.0 m²,3 次重复,两边设有保护行。每小区之间筑埂并用塑料薄膜包埂,以减少各小区间的相互影响,各小区均设有单独的排水口和进水口,单排单灌。在每个小区中央安装一个吸压式土壤溶液取样器(北京渠道科学器材有限公司生产),插入土层深度为 34 cm,以保证采取水样为稻田渗漏液,采用原位采集法提取土壤渗漏液。

设置 3 个不同氮肥(纯 N)水平和 2 种不同施肥比例(基肥:分蘖肥:穗粒肥=40%:30%:30%和基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%,分别记作 A、B);氮肥(纯 N)水平依次为 0、150、240 kg·hm⁻²,分别记作 N₀、N₁₅₀、N₂₄₀,具体组合见表 1。基肥,在移栽前 1 d 施入;分蘖肥,于移栽后 10 d 施入;穗粒肥,于移栽后 36 d 施入。另外,施钾肥(K₂O)330 kg·hm⁻²,钾肥按基肥:幼

穗分化肥=0.5:0.5 施入,磷肥(P₂O₅)用量 120 kg·hm⁻²,作底肥一次性施入。以尿素、过磷酸钙及氯化钾分别作为氮肥、磷肥和钾肥。

1.3 水样采集与测定

用手持气压泵吸取土壤溶液取样器内的所有水样,以保证下次收集的土壤渗漏液为新鲜水样。采样时间为施肥后的第 1、3、5、7 d(即每 2 d 取 1 次样)连续 4 次采样。采样结束后,迅速带回实验室分析,未能当天分析的水样保存在 4℃冰箱中,于次日分析。水样硝态氮测定采用紫外分光光度法,铵态氮测定采用水杨酸-次氯酸钠比色法,全氮采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法^[16]。

1.4 植株样品采集与测定

分蘖期、孕穗期、齐穗期和成熟期在田间调查基础上,每小区取代表性植株 5 穴,分茎鞘、叶片和穗 3 部分烘干称重,然后用自动凯氏定氮仪 VAP50 测定氮含量,并按照下列方法^[17]计算氮素积累总量:

氮素积累总量(total N accumulation, TNA):成熟期单位面积植株(茎叶和穗)N 积累量的总和。

谷粒成熟时,在每小区中央选取 5 m² 收割计产,换算出实际产量。同时根据各个小区平均有效穗数选取 15 蔸带到室内考种,包括以下指标:每穗总粒数、结实率及千粒重。

运用 SAS 和 Excel 实用数据分析软件对试验数据进行分析。

2 结果与讨论

2.1 稻田渗漏液三氮浓度(NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TN)的动态变化特征

每次施氮后稻田渗漏液三氮浓度呈现先升高而后降低的趋势,在施肥后第 3 d,其浓度达到最大值,随着时间的推移,三氮浓度迅速下降。施氮后第 7 d,各处理三氮浓度分别降为峰值的 5.6%~16.9%、13.8%~22.5%和 22.5%~34.5%,而且渗漏液中 NH₄⁺-N 浓度低于 NO₃⁻-N 浓度(图 1)。方差分析结果表明,施氮后各处理渗漏液三氮浓度差异达到显著水平,高氮处理(N₂₄₀)三氮浓度显著高于中低氮处理,不施肥处理氮浓度最低(表 2)。针对不同施肥比例而言,B 种施肥比例(基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%)显著降低了渗漏液 NO₃⁻-N 和 TN 的浓度,而对 NH₄⁺-N 的影响没有达到显著水平,这说明在施氮水平较高的情况下,采用氮肥后移(B 处理)的施肥策略,可以显著降低稻田渗漏液 NO₃⁻-N 和 TN 的浓度,减少稻田氮素

表 1 大田试验施氮方案

Table 1 Nitrogen treatment in paddy field experiment

处理 Treatment	施肥总用量/kg·hm ⁻² Total nitrogen amount	施肥比例 Ratio of application
N ₀ (CK)	0	
N _{150A}	150	基肥:分蘖肥:穗粒肥=40%:30%:30%
N _{150B}	150	基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%
N _{240A}	240	基肥:分蘖肥:穗粒肥=40%:30%:30%
N _{240B}	240	基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%

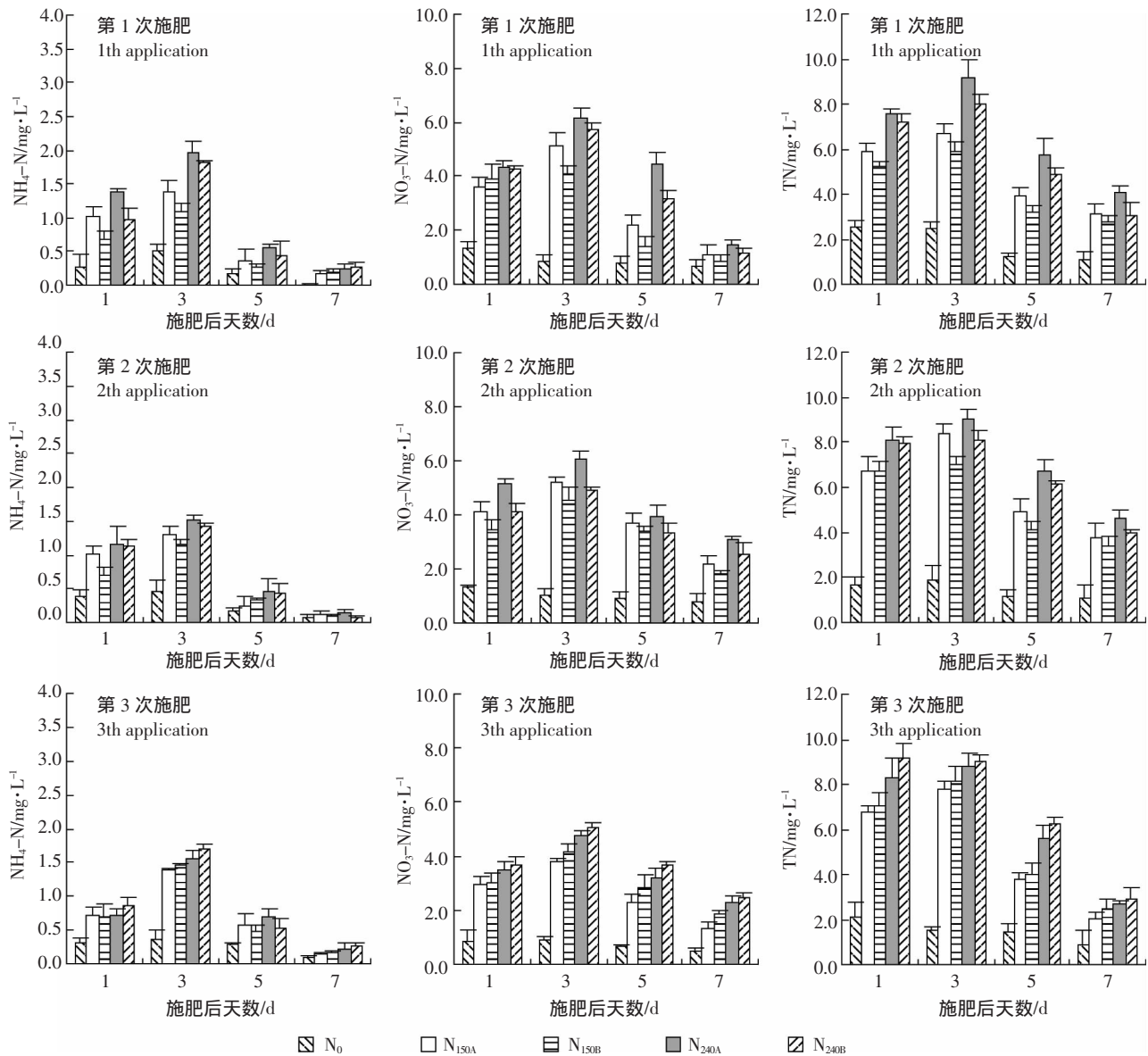
图 1 分 3 次施氮后稻田渗漏水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 的动态变化特征

Figure 1 Nitrogen concentrations in the leachate after three times urea application

表 2 不同处理渗漏水氮素平均浓度差异

Table 2 Differences of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and TN in the leachate under different treatment

处理 treatment	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	TN
N_0	0.26 d	0.88 e	1.58 e
$\text{N}_{150\text{A}}$	0.70 bc	3.13 c	5.30 c
$\text{N}_{150\text{B}}$	0.61 c	2.94 cd	5.01 cd
$\text{N}_{240\text{A}}$	0.88 a	4.03 a	6.70 a
$\text{N}_{240\text{B}}$	0.83 ab	3.67 b	6.38 b

注 不同小写字母表示差异达 5% 显著水平。

Note Different small letters mean significant 5% levels.

的渗漏损失。

在不同氮肥水平下, 渗漏水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度低, 其原因是肥料 N 施入稻田后, 一部分以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形式被水稻吸收固定, 其他部分主要以酰胺态溶解于土壤溶液中, 并被土壤吸附^[18]; 同时, 稻田土壤粘重, 通气不良且土壤形成还原条件, 土壤矿化减弱, 加之土壤胶体呈负电荷, 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 存在吸附作用^[19], 因此渗漏水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较低。施肥后, 由于短时间内通过酶的水解产生了大量的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 处于饱和态的土壤颗粒不能吸附更多的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 从而导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

进入到渗漏液中,故渗漏液中 NH_4^+-N 浓度达到峰值;此后,随着时间的推移,田面水中肥料逐渐降低,形成的 NH_4^+-N 也逐渐降低,致使硝化作用形成的 NO_3^--N 量随之减少,故渗漏液中的 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 也随之降低。 $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{TN}$ 的比值均在 0.50 以上,说明 NO_3^--N 是稻田渗漏液氮素的主要形式^[18-20]。施氮水平越高,渗漏液三氮浓度也越高(表 2)。这主要是由于水稻在苗期根系尚未充分发育完全而处于非活跃时期,对氮素营养物质的吸收能力弱、需求量小,较多的氮肥进入到渗漏水中^[21]。但也有人对此持不同的观点,认为施氮水平对渗漏液 NO_3^--N 浓度几乎没有影响,稻田渗漏液 NO_3^--N 主要是来自上茬作物(旱作)累积的硝酸盐^[22-23],这可能与土壤类型^[24]及土壤本底有机质的矿化能力有关^[25]。

在施氮水平较高($240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)的情况下,采用氮肥后移(基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%)的施肥比例,可以显著降低稻田渗漏液 NO_3^--N 和 TN 浓度(表 2),主要是由于采用氮肥后移施肥策略把施氮量与水稻对氮的需求密切结合^[3],降低了稻田氮的挥发损失^[12],增加了水稻对氮素的吸收积累,从而降低了稻田渗漏液 NO_3^--N 和 TN 渗漏损失。但也有学者对此持不同的观点,这可能与试验设计氮肥水平和土壤本底氮水平的高低有关^[26]。

2.2 施氮水平与稻田渗漏液 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 TN 的相关性分析

稻田渗漏液三氮浓度受多种因素的影响^[10-27]。相关分析结果表明,每次施肥后渗漏液的 NO_3^--N 和 TN

浓度平均值与施氮水平存在显著的正相关关系,相关系数均大于 0.894 4,而 NH_4^+-N 浓度与施氮水平的相关性没有达到显著水平(表 3),这表明渗漏液 NO_3^--N 和 TN 的浓度随着施氮水平的提高而增加,提高氮肥水平,会增加稻田氮素的渗漏损失。

2.3 氮肥运筹对水稻不同生育期氮素积累的影响

江立庚等研究认为,水稻各生育期 TNA 随着施氮水平的提高而增加^[17]。本试验结果表明,在整个生育期内,高氮处理(N_{240})TNA 显著高于中低氮处理,不施氮处理 TNA 最低。在相同的氮肥水平下,采用 B 种施肥比例,显著增加了水稻齐穗期和成熟期 TNA(表 4),与 A 种施肥比例相比,齐穗期和成熟期 TNA 分别增加了 27.5%和 16.4%。这主要是由于增施氮肥提高了水稻的光合速率,促进了水稻干物质的积累,而水稻的光合速率和叶片氮含量之间又存在显著的正相关关系^[28-29]。另外,水稻生长前期根系不发达,对氮素营养物质的吸收能力较弱,积累量较少,不同氮素比例对水稻 TNA 影响差异不明显。随着水稻植株的长大,对养分需求迅速增多,而采取 B 种施肥比例增加了中后期氮肥施用量,从而把施氮量与水稻对氮素的大量需求相结合,因此增加了水稻对氮素的积累吸收,这与前人的研究结论基本一致^[2-30]。

2.4 氮肥运筹对水稻产量及其构成的影响

氮肥运筹对水稻的产量及其构成因子产生重要影响(表 5)。施用氮肥显著增加了水稻产量,不施肥处理最低,其值为 $7\ 164.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,高氮处理(N_{240})最高,其值为 $10\ 003.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别比 N_0 、 N_{150} 处理增产

表 3 氮素浓度与氮肥水平的相关性分析

Table 3 Correlations between N concentration in the leachate and N fertilizer application($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	氨氮/ NH_4^+-N			硝氮/ NO_3^--N			总氮/TN		
	斜率 k	截距 b	相关系数 r	斜率 k	截距 b	相关系数 r	斜率 k	截距 b	相关系数 r
第 1 次施肥 1th application	0.05	0.12	0.472 7	0.21	6.71	0.910 4*	0.32	1.34	0.912 1*
第 2 次施肥 2th application	0.02	0.33	0.411 4	0.37	2.38	0.949 3*	0.24	3.23	0.894 4*
第 3 次施肥 3th application	0.02	0.51	0.413 6	0.26	1.19	0.923 8*	0.26	2.6	0.956 4*

表 4 氮肥运筹对水稻各生育期氮素积累的影响

Table 4 TNA of rice under N management at different stage

处理 Treatment	分蘖期/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ Mid-tillering stage	孕穗期/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ Panicle initiation	齐穗期/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ Heading stage	成熟期/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ Maturity stage
N_0	12.21 c	41.85 c	61.55 e	68.54 d
$\text{N}_{150\text{A}}$	37.06 b	85.83 b	109.21 d	124.83 c
$\text{N}_{150\text{B}}$	34.55 b	80.81 b	120.79 c	142.41 b
$\text{N}_{240\text{A}}$	42.49 a	98.08 a	152.22 b	148.60 b
$\text{N}_{240\text{B}}$	41.57 a	102.17 a	194.03 a	173.02 a

表 5 不同处理对水稻产量及其构成因子的影响

Table 5 Differences of yield and its component under different treatments

处理 Treatment	有效穗 Valid panicle/no·m ⁻²	总粒数/穗 Total grain/no·panicle ⁻¹	实粒数/穗 Solid grain/no·panicle ⁻¹	结实率 Setting seed Rate/%	千粒重 1 000-seed Weight/g	收获产量 Harvested Yield/kg·hm ⁻²
N ₀ (CK)	197.64 c	174.60 d	154.59 c	88.71 a	30.57 a	7 164.0 d
N _{150A}	247.59 b	204.46 c	174.25 b	85.25 c	29.45 b	8 685.0 c
N _{150B}	238.14 b	216.20 b	186.45 a	86.23 b	30.47 a	9 432.0 b
N _{240A}	279.45 a	214.85 b	181.32 a	84.44 d	28.90 c	9 702.0 b
N _{240B}	266.76 a	221.39 a	188.96 a	85.35 c	29.78 b	10 305.0 a

39.6%和 26.4%。在相同氮肥水平下,采用 B 种施肥比例,水稻产量显著高于 A 处理。提高氮肥水平显著增加了水稻单位面积有效穗数、总粒数·穗⁻¹和实粒数·穗⁻¹,却显著地降低了水稻结实率和千粒重。在相同氮肥水平下,采用 B 种施肥比例,显著地增加了总粒数·穗⁻¹、结实率和千粒重。

3 结论

稻田渗漏液三氮浓度(NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TN)呈现出先升高而后降低的趋势,在施肥后第 7 d,分别降为峰值的 5.6%~16.9%、13.8%~22.5%、22.5%~34.5%,说明施肥后 1 周内是稻田氮素渗漏流失的关键时期。

稻田渗漏液 NO₃⁻-N 和 TN 浓度与施氮水平存在显著的正相关关系(表 3)。施氮越多,稻田渗漏液 NO₃⁻-N 和 TN 浓度也就越高。在相同的氮肥水平下,采用 B 种施肥比例(基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%),可以显著降低渗漏液 NO₃⁻和 TN 的浓度,而对 NH₄⁺-N 的影响没有达到显著水平。

水稻各个生育期 TNA 随着施氮水平的提高而增加,高氮处理(240 kg N·hm⁻²)TNA 显著高于中低氮处理,不施氮处理 TNA 最低。在相同的氮肥水平下,采用 B 种施肥比例(基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%),可以显著地增加水稻齐穗期和成熟期 TNA,降低氮素的渗漏流失。

在施氮水平介于 0~240 kg N·hm⁻² 时,施用氮肥可以显著增加水稻产量。不施肥处理产量最低,中肥(N₁₅₀)处理居中,高氮处理(N₂₄₀)最高。提高氮肥水平显著增加了水稻单位面积有效穗数、总粒数·穗⁻¹和实粒数·穗⁻¹,同时显著降低了水稻结实率和千粒重。在相同氮肥水平下,采用 B 种施肥比例(基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%),水稻产量显著增加,究其原因,主要是通过增加水稻总粒数·穗⁻¹、结实率和千粒重而夺取高产。

参考文献:

- [1] FAO. Statistical databases[S]. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, 2001.
- [2] Jiang L G, Dong D F, Gan X Q, et al. Photosynthetic efficiency and nitrogen distribution under different nitrogen management and relationship with physiological N-use efficiency in three rice genotypes[J]. *Plant and Soil*, 2005, 271: 321-328.
- [3] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96: 37-47.
- [4] Wang D J, Liu Q, Lin J H, et al. Optimum nitrogen use and reduced nitrogen loss for production of rice and wheat in the Yangtze Delta region[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26: 221-227.
- [5] 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.
- [6] Xing G X, Zhu Z L. An assessment of N loss from agricultural fields to the environment in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 57: 67-73.
- [7] Xie Y X, Xiong Z Q, Xing G X, et al. Assessment of nitrogen pollutant sources in surface waters of Taihu Lake region[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(2): 200-208.
- [8] 黄明蔚, 刘敏, 陆敏, 等. 稻麦轮作农田系统中氮素渗漏流失的研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(4): 629-636.
- [9] HUANG Ming-wei, LIU Min, LU Min, et al. Study on the nitrogen leaching in the paddy-wheat rotation agroecosystem[J]. *Acta Scientiae Circum*, 2007, 27(4): 629-636.
- [10] Cai G X, Chen D L, Ding H, et al. Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63: 187-195.
- [11] Zhou J B, Xi J G, Chen Z J, et al. Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation: a soil column method[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 245-252.
- [12] Zu C C. Ammonium transformation in paddy soils affected by the presence of nitrate[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63: 267-274.
- [13] Lin D X, Fan X H, Hu F, et al. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the

- Taihu Lake region, China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(5) :639–645.
- [13] Xing G C, Cao Y C, Shi S L, et al. Denitrification in underground saturated soil in a rice paddy region[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34 :1593–1598.
- [14] 王小治, 朱建国, 宝川靖和, 等. 施用尿素稻田表层水氮素的动态变化及模式表征[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5) :852–856.
WANG Xiao-zhi, ZHU Jian-guo, BAO Chuan-jinghe, et al. Dynamic changes and modeling of nitrogen in paddy field surface water after application with different doses of urea[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5) :852–856.
- [15] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 等. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40 :426–432.
WANG De-jian, LIN Jing-hui, SUN Rui-juan, et al. Optimum nitrogen rate for a high productive rice–wheat system and its impact on the groundwater in the Tai Hu Lake area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 :426–432.
- [16] 国家环保总局. 水和废水分析方法[M]. 第 4 版. 北京 : 中国环境科学出版社, 2002 :272–274, 256–258, 278–280.
SEPA. Methods for examination of water and wastewater[M]. Beijing : China Environ Sci Press, 2002 :272–274, 256–258, 278–280.
- [17] 江立庚, 曹卫星, 甘秀芹, 等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4) :490–496.
JIANG Li-geng, CAO Wei-xing, GAN Xiu-qing, et al. Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(4) :490–496.
- [18] 张庆利, 张 民, 田维彬. 包膜控释和常用氮肥氮素淋失特征及其对土水质量的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(2) :98–103.
ZHANG Qing-li, ZHANG Min, TIAN Wei-bin. Leaching characteristics of controlled release and common nitrogen fertilizers and their effects on soil and ground water quality[J]. *Soil Environ Science*, 2001, 10(2) :98–103.
- [19] 张瑜芳, 张蔚榛, 沈荣开. 排水农田氮素运移、转化及流失规律的研究[J]. 水动力学研究及进展, 1996, 11(3) :251–260.
ZHANG Yu-fang, ZHANG Wei-zhen, SHEN Rong-kai. The study of the transport, transformation and losses of nitrogen in drained agricultural lands[J]. *Hydrodynamics*, 1996, 11(3) :251–260.
- [20] 金 洁, 杨京平. 高肥力稻田分次施氮对氮素淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3) :98–101.
JIN Jie, YANG Jing-ping. Effect of nitrogen leaching of paddy field with split application under high soil fertility conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3) :98–101.
- [21] Lars Bergstrom, Nils Brink. Effects of differentiated applications of fertilizer N on leaching losses and distribution of inorganic N in the soil[J]. *Plant and Soil*, 1996, 93, 333–345.
- [22] 闫德智, 王德建, 林静慧. 太湖地区氮肥用量对土壤供氮、水稻吸氮和地下水的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(3) :440–446.
YAN De-zhi, WANG De-jian, LIN Jing-hui. Effects of fertilizer application rate on soil N supply, rice N uptake and groundwater in Taihu region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3) :440–446.
- [23] 陆 敏, 刘 敏, 黄明蔚, 等. 大田条件下稻麦轮作土壤氮素流失研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5) :1234–1239.
LU Min, LIU Min, HUANG Ming-wei, et al. Field study of nitrogen loss in soil with rice–wheat rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5) :1234–1239.
- [24] Paola Gioacchini, Anna Nastri, Claudio Marzadori, et al. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea[J]. *Biol Fertil Soils*, 2002, 36 :129–135.
- [25] Qian Q, Cai Z H. Leaching of nitrogen from subtropical soils as affected by nitrification potential and base cations[J]. *Plant Soil*, 2007, 10 :1107–1115.
- [26] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On-farm estimation of indigenous nitrogen supply for site-specific nitrogen management in the North China plain[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 81 :37–47.
- [27] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统中稻田田面水的 N 素动态变化及淋溶损失[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10) :2125–2132.
LI Cheng-fang, CAO Cou-gui, WANG Jin-ping, et al. Dynamic variations and losses of N in flood water of paddy fields in integrated rice–duck and rice–fish ecosystems[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(10) :2125–2132.
- [28] Yoshida S, Coronel V. Nitrogen nutrition, leaf resistance, and leaf photosynthetic rate of the rice plant[J]. *Soil Sci & Plant Nutr*, 1996, 22, 207–211.
- [29] Peng S, Cassman K G, Kropff. Relationship between leaf photosynthesis and nitrogen content of field-grown rice in the tropics[J]. *Crop Sci*, 1995, 35 :1627–1630.
- [30] 傅庆林, 俞劲炎, 陈英旭. 氮素营养对水稻干物质和氮分配的影响及氮肥需求量[J]. 浙江大学学报(农业生命与科学版), 2000, 26(4) :399–403.
FU Qing-lin, YU Jin-yan, CHEN Ying-xu. Effect of nitrogen applications on dry matter and nitrogen partitioning in rice and nitrogen fertilizer requirements for rice production[J]. *J Zhejiang Agric Univ(Agric & Life Sci)*, 2000, 26(4) :399–403.