

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

潘圣刚, 黄胜奇, 曹凑贵, 蔡明历, 翟 晶, 江 洋, 张 帆

(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, 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%),研究了氮肥运筹对稻田田面水氮素动态变化特征和氮素吸收利用效率的影响。结果表明,稻田田面水 NH₄⁺-N 和总 N 浓度在施肥后第 1 d 达到最大值,随后降低,在施肥后的第 7 d,分别降为峰值的 7.88%~17.84%和 29.71%~45.55%。施氮水平介于 0~240 kg N·hm⁻² 时,水稻产量随着氮素水平的提高而显著增加,氮素的吸收利用率和偏生产力却随之降低。在高氮水平(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,水稻产量增加了 6.2%、氮素吸收利用率和农学利用率分别提高了 30.49%和 23.72%,而氮素生理利用率和偏生产力差异不显著,说明适宜的氮肥运筹可以增加水稻的产量,提高氮素的吸收利用率和农学利用率,减少氮素损失。

关键词:氮肥运筹;水稻;氮素吸收利用效率;田面水

中图分类号:S181 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)05-1000-06

Effects of Nitrogen Management on Dynamics of Nitrogen in Surface Water from Rice Field and Nitrogen Use Efficiency

PAN Sheng-gang, HUANG Sheng-qi, CAO Cou-gui, CAI Ming-li, ZHAI Jing, JIANG Yang, ZHANG Fan

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

Abstract: Effects of nitrogen management on nitrogen use efficiency and nitrogen concentration in the surface water 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 two N concentrations(NH₄⁺-N and total N) in the surface water reached the highest on the first day after fertilizer application, and thereafter decreased. NH₄⁺-N and total N concentrations at 7th day were separately in ranges of 7.88%~17.84% and 29.71%~45.55%. Grain yield was significantly increased as the N rates increased from 0 to 240 kg N·hm⁻², however, nitrogen recovery efficiency and partial factor productivity were decreased. At the N rate of 240 kg N·hm⁻², grain yield, nitrogen recovery efficiency and agronomic efficiency were 6.2%, 30.49% and 23.72% 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, no obvious differences in the nitrogen physiological efficiency and partial factor productivity 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 increase grain yield, improve nitrogen recovery efficiency and agronomic efficiency, and decrease nitrogen loss.

Keywords: nitrogen management; rice; nitrogen use efficiency; surface water

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]。由于氮肥的不合理施用,不仅造成水稻施氮肥大幅度提高^[2],如太湖流域水稻施氮量达到 350 kg·hm⁻²,还引起水稻大面积倒伏,病虫害发生严重及氮肥利用效率降低等现象^[3-5],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^[8-11]、氨挥发^[12-13]、稻田水体氮素变化^[14-15]等

收稿日期:2010-03-29

基金项目:国家科技支撑计划(2006BAD02A02)

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

方面。由于试验的复杂性和工作的艰巨性,而同时研究稻田田面水氮素动态变化特征和氮肥吸收利用效率较少^[16]。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,研究氮肥运筹对稻田水体三氮的动态变化过程和氮素的吸收利用效率,对合理运筹氮肥、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、有效 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。

试验设置 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%,分别记做 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

每次施肥后,从第 2 d 起每日早晨 7:00 左右用 100 mL 医用注射器,不扰动水层,按照对角线取样法,每个小区取 5 个点中上层田面水混合水样约 300 mL。采样时间为施肥后的 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,未能当日分析的水样保存在 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^[17]。

1.4 氮肥吸收利用效率的计算公式

氮肥吸收和利用效率的计算参照前人^[4,18]的方法,具体如下:

氮肥吸收利用率(nitrogen recovery efficiency, NRE)(%)=(施氮区地上部植株吸氮量-空白区地上部植株吸氮量/施氮量×100%

氮肥农学利用率(nitrogen agronomic efficiency, NAE)(kg·kg⁻¹)=(施氮区产量-空白区产量)/施氮量

氮肥生理利用率(nitrogen physiological efficiency, NPE)(kg·kg⁻¹)=(施氮区产量-空白区产量)/(施氮区地上部植株吸氮量-空白区地上部植株吸氮量)

氮肥偏生产力(nitrogen partial factor productivity, NPF)(kg·kg⁻¹)=施氮区产量/施氮量

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。

试验数据运用 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 稻田田面水中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TN 浓度的动态变化特征

尿素氮肥施入稻田以后,稻田田面水 NH₄⁺-N 和 TN 呈现逐渐降低的趋势,在施肥后的第 1 d,其浓度达到最大值,随着时间的推移,NH₄⁺-N 和 TN 的浓度迅速下降。施氮后的第 7 d,各处理 NH₄⁺-N 和 TN 的浓度分别降为峰值的 7.88%~17.84% 和 29.71%~45.55%。田面水 NO₃⁻-N 的浓度呈现出先上升而后降低的趋势,在施肥后的第 3 d,其浓度达到最大值,随后迅速下降。施氮后的第 7 d,其浓度降为平均峰值的

表 1 大田施氮方案

Table 1 Nitrogen treatment in paddy field experiment

处 理 Treatments	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%

19.73%~31.64%。而且,田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度显著高于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度(图 1)。方差分析结果表明,施氮后各处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN(三氮)浓度的差异达到显著水平。高氮处理(N_{240})三氮浓度显著高于低氮处理,不施肥处理三氮浓度最低。针对不同施肥比例而言,采用基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%的施氮比例,稻田田面水的三氮浓度显著低于基肥:分蘖肥:穗粒肥=40%:30%:30%的施氮处理。而且,第 1 次施肥后,田面水三氮浓度下降较缓,而第 3 次施肥后,田面水三氮浓度迅速下降,这不仅与水稻的吸收利用有

关,而且也与田面水温度高、挥发损失快有关。

高氮处理稻田田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和总氮浓度显著高于低氮处理,这主要与氮肥水平有关^[9,15-16]。氮肥施入以后,稻田田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和总氮浓度在施肥后的第 1 d 到达峰值,而后迅速降低,而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度呈现出先升高而后降低的趋势,而且 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度远低于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。其原因是尿素施入稻田后,经过脲酶水解成为大量的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,而此时水稻正处于生长前期,根系尚不发达,对氮素营养物质的吸收能力弱、需求量小,较多的氮肥进入到田面水中,从而导致

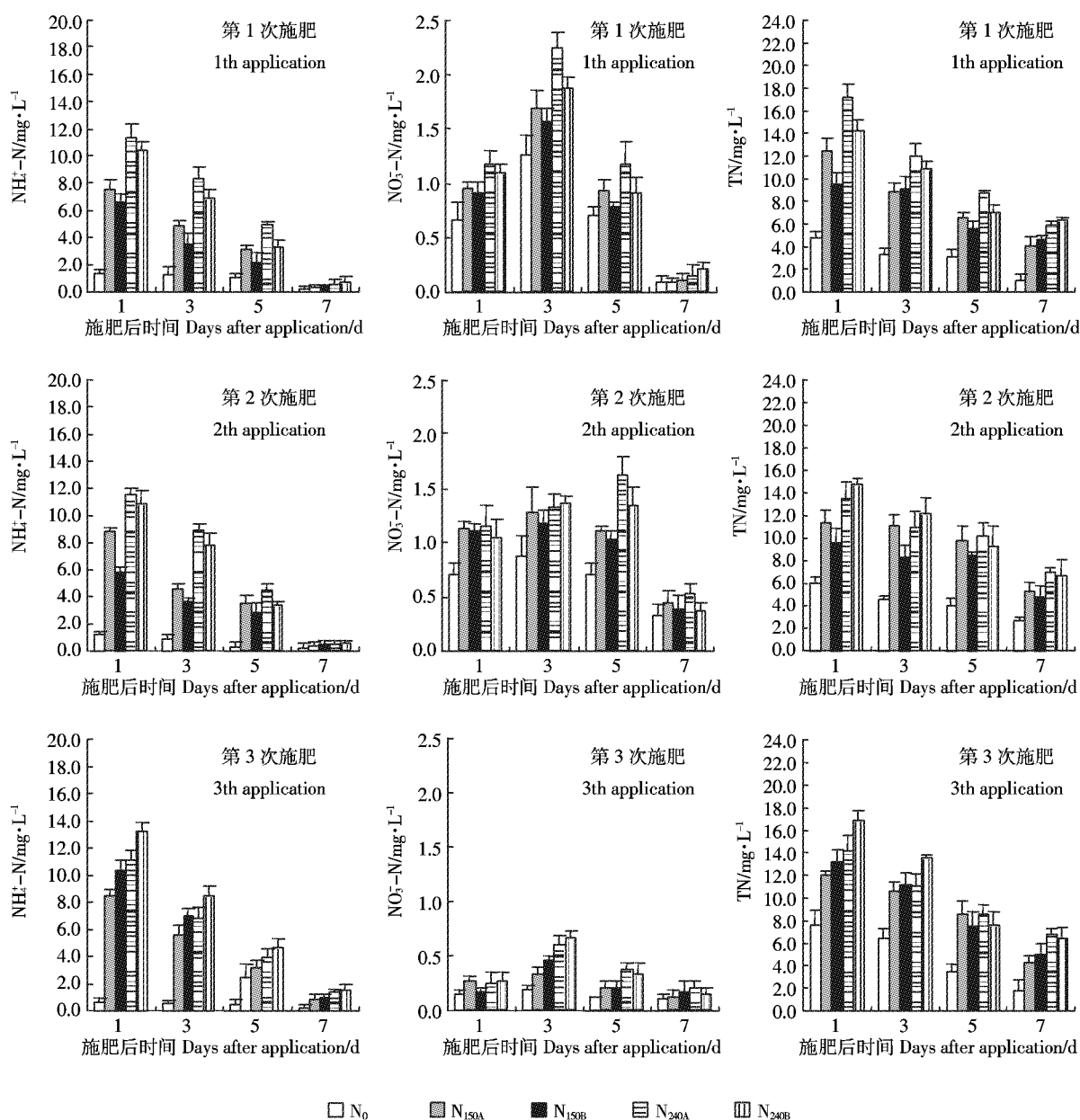


图 1 分 3 次施氮后稻田田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 的动态变化特征

Figure 1 Nitrogen concentrations in the surface water after three times urea application

田面水 NH_4^+-N 浓度短时间内达到峰值^[16,19-20]。而且施肥时期为 6、7 月份,一般高温少雨,一部分氮素转化为气态氮排放到大气中,另一部分则通过植物吸收和土壤渗漏损失掉^[10,12]。稻田田面水 NO_3^--N 主要是尿素水解产生的 NH_4^+-N 通过硝化作用形成的,淹水时田面水硝化作用较弱,同时由于水稻吸收、反硝化作用和氮素的淋失等,稻田田面水中 NO_3^--N 浓度较低。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,故田面水中的 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和总氮浓度(TN)也随之降低,而且 NO_3^--N 峰值滞后于 NH_4^+-N ^[15,20]。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,可以显著降低稻田田面水 NH_4^+-N 和 TN 浓度,主要是由于采用氮肥后移施氮策略把施氮量与水稻对氮的需求密切结合^[21],降低了稻田氮的挥发损失^[12]和稻田渗漏^[22],增加了水稻对氮素的吸收利用,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高低有关^[23]。

2.2 氮肥运筹对水稻氮素吸收利用效率的影响

氮素吸收利用率是指施氮区水稻氮素积累量与空白区氮素积累量的差占施氮量的百分数,是学术界用来描述水稻氮肥吸收利用特性的主要指标。氮素农学利用率是指施用氮肥后增加的产量与施用氮肥量的比值,它表明施用的每千克纯氮增产稻谷的能力。氮素生理利用率是指作物因施用氮肥而增加的产量与相应的氮素积累量的增加量的比值,反映了作物对所吸收的氮素肥料在作物体内的利用率。氮素偏生产力是指作物施肥后的产量与氮肥施用量的比值,它反映了作物吸收肥料氮和土壤氮后所产生的边际效应^[4]。氮肥运筹对水稻氮素吸收利用率、农学利用率、生理利用率和偏生产力产生重要的影响(表 2)。提高

氮肥水平显著降低了水稻氮素吸收利用率和偏生产力, N_{150} 处理氮素吸收利用率和偏生产力显著高于 N_{240} 处理,其值分别为 43.39%、60.39% 和 38.45%、41.68%;而氮素农学利用率和生理利用率的差异不显著。高氮处理(N_{240})水稻的氮素农学利用率较低,其值为 $11.83 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,比 N_{150} 处理降低了 6.34%。在不同的氮肥水平(150、240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)下,采用氮肥后移(基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%)的施肥比例,水稻的氮素吸收利用率显著高于基肥:分蘖肥:穗粒肥=40%:30%:30%处理,其值分别为 43.53%、49.25%。

氮肥吸收利用效率受到施氮水平、施肥方法、土壤性状、气象条件、品种类型等多种因素的影响而存在较大的变化^[23-27]。大多数研究认为,提高氮肥水平降低氮素吸收利用率和农学利用率。因此,确定合理的施氮水平和施肥比例,科学运筹,可以有效地降低氮素损失,提高氮素利用效率^[28-30]。

2.3 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 3)。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 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

稻田田面水 NH_4^+-N 和 TN 浓度与施氮水平存在显著的正相关关系。施氮越多,稻田田面水 NH_4^+-N 和 TN 浓度也越高。在相同的氮肥水平下,采用 B 种施肥

表 2 氮肥运筹对水稻氮素吸收利用效率的影响

Table 2 Influences of N use efficiency under different nitrogen management

处 理 Treatments	氮素吸收利用率 NRE/%	氮素农学利用率 NAE/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	氮素生理利用率 NPE/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	氮素偏生产力 NPF/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
N_0 (CK)	—	—	—	—
$\text{N}_{150\text{A}}$	37.53b	10.14c	27.02b	57.90a
$\text{N}_{150\text{B}}$	49.25a	15.12a	30.70a	62.88a
$\text{N}_{240\text{A}}$	33.36b	10.58c	31.70a	40.43b
$\text{N}_{240\text{B}}$	43.53a	13.09b	30.06a	42.94b

注:同列中字母相同者表示差异未达 5%显著水平,字母不同者表示差异达到 5%显著水平。下同。

Notes: The difference significant test through LSD0.05, in one row, marked with the same letter indicates the difference is insignificant; otherwise, the difference is significant at 0.05 level. The same as follow.

表 3 不同处理对水稻产量及其构成因子的影响
Table 3 Differences of yield and its component under different treatments

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

比例(基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%),可以显著降低田面水 NH₄⁺-N 和 TN 的浓度。

提高氮肥水平可以显著降低水稻氮素吸收利用率和偏生产力,而对氮素农学利用率和生理利用率的影响不显著。高氮处理(N₂₄₀)水稻的氮素农学利用率较低,其值为 11.83 kg·kg⁻¹,比 N₁₅₀ 处理降低了 6.34%。采用氮肥后移(基肥:分蘖肥:穗粒肥=30%:20%:50%)的施肥比例,可以显著增加水稻氮素吸收利用率和农学利用率,一定程度上提高氮素生理利用率和偏生产力。

在施氮水平介于 0~240 N kg·hm⁻² 时,施用氮肥可以显著增加水稻产量。提高氮肥水平显著增加水稻单位面积有效穗数、总粒数·穗⁻¹ 和实粒数·穗⁻¹,却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。

参考文献:

[1] FAO.Statistical databases [S].Food and Agriculture Organization(FAO) of the United Nations, 2001.

[2] 崔玉亭,程 序,韩纯儒,等.苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究[J].生态学报,2000,20(4):659-662.

CUI Yu-ting,CHENG-Xu,HAN Chun-ru, et al.The economic and ecological satisfactory amount of nitrogen fertilizer using on rice in Tai Lake watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2000,20(4):659-662.

[3] TANG Qi-yuan,PENG Shao-bing,Buresh R J, et al. Rice varietal difference in sheath blight development and its association with yield loss at different levels of N fertilization[J]. *Field Crops Research*,2007,102: 219-227.

[4] 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-qin, 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.

[5] 吴文革,张四海,赵决建,等.氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(5):757-764.

WU Wen-Ge,ZHANG Si-hai,ZHAO Jue-jian, et al.Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rim land of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies[J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2007, 13(5): 757-764.

[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.

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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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-Environ-ment Science*, 2006, 25(5): 1234- 1239.

[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.

[14] 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.

[15] 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.

- [16] 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-Environment Science*, 2005, 24(2): 357-361.
- [17] 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.
- [18] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1456-1461.
LIU Li-jun, SANG Da-zhi, LIU Cui-lian, et al. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(12): 1456-1461.
- [19] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 不同氮磷配合下稻田田面水的氮磷动态变化研究[J]. 土壤, 2006, 38(6): 727-733.
TIAN Yu-hua, HE Fa-yun, YIN Bin, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface water of paddy field[J]. *Soil*, 2006, 38(6): 727-733.
- [20] 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.
WANG Hua, YANG Jing-ping, JIN Jie, et al. N variation in rice-soil-water system under different N application level in high-yielding paddy field and its environment effect[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 50-54.
- [21] 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.
- [22] 潘圣刚, 曹涛贵, 蔡明历, 等. 氮肥运筹对水稻氮素吸收和稻田渗漏水氮素浓度影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2145-2150.
PAN Sheng-gang, CAO Cou-gui, CAI Ming-li, et al. Effects of nitrogen management on rice nitrogen uptake and nitrogen concentrations in the leachate from rice field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2145-2150.
- [23] 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.
- [24] Dang Ting-Hui, Cai Gui-Xin, Guo Sheng-Li, et al. Effect of nitrogen management on yield and water use efficiency of rainfed wheat and maize in northwest China[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 495-504.
- [25] 叶全宝, 张洪程, 魏海燕, 等. 不同土壤及氮肥条件下水稻氮利用效率和增产效应研究[J]. 作物学报, 2005, 31(11): 1422-1428.
YE Quan-bao, ZHANG Hong-cheng, WEI Hai-yan, et al. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice under different soil conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(11): 1422-1428.
- [26] 冯涛, 杨京平, 孙军华, 等. 两种土壤不同施氮水平对稻田系统的氮素利用及环境效应影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 64-67.
FENG Tao, YANG Jing-ping, SUN Jun-hua, et al. Effect of different nitrogen application levels on nitrogen utilization of paddy field system and environment impact under two soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 64-67.
- [27] 张耀鸿, 张亚丽, 黄启为, 等. 不同氮肥水平下水稻产量以及氮素吸收、利用的基因型差异比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 616-621.
ZHANG Yao-hong, ZHANG Ya-li, HUANG Qi-wei, et al. Effects of different nitrogen application rates on grain yields and nitrogen uptake and utilization by different rice cultivars[J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2006, 12(5): 616-621.
- [28] 刘建, 魏亚凤, 徐少安. 穗肥氮素配比对水稻产量、品质及氮肥利用率的影响[J]. 华中农业大学学报, 2006, 25(3): 223-227.
LIU Jian, WEI Ya-feng, XU Shao-an. Effects of the ratio of tiller to panicle nitrogen fertilizer on rice yield and quality and nitrogen utilization efficiency[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2006, 25(3): 223-227.
- [29] Jiang L G, Dai T B, Jiang D, et al. Characterizing physiological N-use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars[J]. *Field Crops Research*, 2004, 88: 239-250.
- [30] 张洪程, 王秀芹, 戴其根, 等. 施氮量对杂交稻两优培九产量、品质及吸氮特性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(7): 800-806.
ZHANG Hong-cheng, WANG Xiu-qin, DAI Qi-gen, et al. Effects of N-application rate on yield, quality and characters of nitrogen uptake of hybrid rice variety Liangyoupei9[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(7): 800-806.