

# 化肥有机肥配合施用下双季稻田氮素形态变化

李冬初<sup>1</sup>, 徐明岗<sup>1\*</sup>, 李菊梅<sup>1</sup>, 秦道珠<sup>1</sup>, 八木一行<sup>2</sup>, 宝川靖和<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

<sup>2</sup> 日本国际农业研究中心, 日本筑波 305-8686)

**摘要:** 为揭示有机无机肥配合施用下稻田氮素的动态及迁移特征, 在湘南双季水稻农作区第四纪红土发育的红黄泥稻田上进行了连续 6 年田间试验。通过比较不施氮肥 (PK)、施用有机肥猪粪 (M)、化肥 (NPK) 及有机肥化肥配合 (NPKM), 研究稻田表层全氮、无机氮动态变化, 不同层次 (25—30、55—60、85—90 cm) 土壤溶液无机氮动态、耕层土壤无机氮动态等。结果表明,  $\text{NH}_4^+$ -N 是红壤双季稻田无机氮素存在的主要形态, 施用化学肥料处理 (NPK) 施肥后 1~3 d 表面水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度占全氮比例可达 0.5~0.9, 有机肥处理 (M) 为 0.3 左右。不同层次土壤溶液及其土壤氮素浓度呈现一致的特征, 即施肥后短期内出现浓度峰值随后迅速下降, 且随着往下推移, 氮素峰值出现时间延长, 表层水全氮及无机氮在施肥后 1~2 d 出现浓度高峰, 耕层土壤及 25—30 cm 土壤溶液无机氮浓度高峰约在施肥后 3~5 d。化肥有机肥配施有利于水稻稳产高产, 年产量达 12.2 t/hm<sup>2</sup>, 比不施氮肥的对照产量 (7.3 t/hm<sup>2</sup>) 增加 68%; 土壤有机质 6 年提升 18.5%, 显著高于化肥。施用有机肥 (M) 及有机无机肥配合 (NPKM) 显著降低了稻田表层水全氮及不同层次土壤溶液和耕层土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 峰值浓度, 提高水稻产量和培肥土壤, 有利于减少当前氮肥过量施用带来的环境负荷。

**关键词:** 稻田; 氮素动态; 有机无机肥配合

中图分类号: S147.34; S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)02-0303-08

## Dynamics of nitrogen in double-rice paddy soil under application of chemical fertilizer combined with manure

LI Dong-chu<sup>1</sup>, XU Ming-gang<sup>1\*</sup>, LI Ju-mei<sup>1</sup>, QIN Dao-zhu<sup>1</sup>, Kazuyuki Yagi<sup>2</sup>, Yasukazu Hosen<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Ministry of Agriculture of China, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; <sup>2</sup> Crop Production and Environmental Conservation Division, Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 1-2 Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8686, Japan)

**Abstract:** A six year field experiment was conducted in Quaternary Period red clay soil in double rice region of south Hunan province. Its purpose was to disclose dynamics and transferred characteristics of nitrogen under the application of chemical fertilizer combined with manure. Four treatments, namely, no nitrogen (PK), swine manure (M), chemical fertilizer (NPK) and swine manure applied combined with chemical fertilizer (NPKM) were selected to study the dynamics of total nitrogen and inorganic nitrogen in surface water, and as well as the dynamics of inorganic nitrogen in soil solution in different layers (25-30, 55-60 and 85-90cm) and tillage soil. The results show that  $\text{NH}_4^+$ -N is the predominant inorganic nitrogen in red double rice paddy soil, and the ratio of  $\text{NH}_4^+$ -N/total N reaches to 0.5-0.9 in surface water within 1-3 days after chemical fertilizer (NPK treatment) applied, while that of organic manure treatment is about 0.3. The peak values of nitrogen concentration are detected within 1-2 days in surface water and 3-5 days in soil solution in different layers after fertilizer application. The peak values of nitrogen concentration in surface water, in soil solution and in tillage soil are lower in organic manure (M), and chemical fertilizer applied combined with organic manure (NPKM) treatments than those of the other two treatments. The NPKM treatment achieves a 12.2 t/ha mean annual yield (68%

收稿日期: 2008-01-11

接受日期: 2008-05-14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“973”项目(2007CB109308); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD05B09、2006BAD25B07、2006BAD02A14); 中-日合作项目“环境保护型农业技术的开发与评价”资助。

作者简介: 李冬初(1979—)男, 湖南祁东县人, 硕士, 助理研究员, 主要从事农田生态系统养分循环研究。\* 通讯作者 E-mail: mgxu@caas.ac.cn

higher than that of PK). The soil organic matter in tillage soil is increased by 18.5% during the six-year plantation at the NPKM which is significantly higher than that of the NPK treatment. Application of chemical fertilizer combined with organic manure is propitious to reduce environment load due to excessive chemical nitrogen applied.

**Key words** : paddy field ; nitrogen dynamic ; chemical fertilizer combining with organic manure

氮肥形态显著影响稻田氮素循环及其转化利用<sup>[1]</sup>。对于淹水稻田土壤,铵态氮是稻田土壤氮素转化的主要氮素形态<sup>[2]</sup>。通常认为铵态氮容易在淹水还原条件下的稻田土壤上向下渗漏,且随着土壤Eh的下降其移动速度增加;硝态氮则主要是在轻质地砂性土壤上淋失<sup>[3]</sup>。氮肥施用后稻田表面水全氮、铵态氮短期内达到高峰然后随着时间延长迅速下降,施肥短期内是稻田氮素径流损失的主要时期<sup>[3-4]</sup>。施氮后第3~4d,稻田表面水铵氮/总氮比可达到0.4~0.9<sup>[4]</sup>。普通尿素施用后表层水总氮素负荷及流失潜能随时间呈指数递减,而表层水 $\text{NH}_4^+$ -N浓度及氨挥发潜在在施肥后约50h内随时间呈指数增加,之后又随时间呈指数递减的趋势。田间表面水全氮及 $\text{NH}_4^+$ -N变化可用一级动力学方程来描述<sup>[6]</sup>。

红壤是我国南方14省(区)主要土壤类型,约占全国土壤总面积的6.5%,是我国重要的粮食生产基地。主要农作物为水稻,代表了我国最大的双季稻作区。目前我国稻田氮肥利用率仅为30%左右,土壤部分残留,其余大部分氮素以氨挥发、硝化—反硝化、渗漏和径流等多种途径损失,成为农业面源污染的主要来源<sup>[7]</sup>。

有机肥料是我国农业生产中的重要肥料。长期以来,我国传统农业生产就是通过施用有机肥料来培养地力和提高农作物产量<sup>[8]</sup>。随着我国农业集约化程度的不断提高,化肥用量大幅度增加,有机肥施用比重逐渐减少,其造成环境负效应越来越严峻。有机肥尤其是有机无机肥配合施用下土壤氮素循环、作物产量效应及其环境效应等研究引起广泛重视<sup>[8-9]</sup>。为综合评价有机无机肥配合施用下南方红壤双季稻田氮素转化及其经济环境效应,从1998年开始,开展了连续6年的田间定位试验,研究了施用常规尿素、单施有机肥(猪粪)及有机无机肥(猪粪+化肥)配合施用稻田氮素形态及运移、氮素去向、氮素循环利用等。本文主要讨论不同施肥措施下稻田表面水全氮、无机氮( $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N)的动态,不同层次土壤溶液、耕层土壤无机氮浓度的动态变化。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点及其土壤基本性状

试验在中国农业科学院祁阳红壤实验站稻田上进行。该站地处湖南省南部红壤丘陵地区(26°45'36"N, 111°52'12"E),属于典型亚热带季风湿润气候,多年平均降雨量为1454mm(1991~2000年),年日照1620h,年平均温度18.6℃。供试稻田土壤为第四纪红土发育的红黄泥,质地较粘重,粘粒、粉粒、砂粒含量分别为41.5%、48.8%和9.6%。试验前耕层土壤容重1.26g/cm<sup>3</sup>,有机质24.3g/kg,全氮1.58g/kg,速效磷7.7mg/kg,交换性钾71mg/kg,pH6.8(水土比1:1)。

### 1.2 试验设计

试验于1998年早稻布置,2003年晚稻结束。设4个处理:1)磷钾对照(PK,不施氮,施磷、钾化肥,用量为 $\text{P}_2\text{O}_5$  100.5kg/hm<sup>2</sup>, $\text{K}_2\text{O}$  109.5kg/hm<sup>2</sup>);2)氮、磷、钾化肥(NPK,施化肥氮N 150kg/hm<sup>2</sup>,磷、钾肥同处理1);3)有机肥(M,猪粪,氮、磷、钾用量同处理2);4)有机无机配施(NPKM,有机化肥各一半,氮、磷、钾用量同处理2,一半来自有机肥猪粪,一半来自化肥)。小区面积5m×5m,重复4次,拉丁方设计,共16个小区,小区之间用水泥埂隔开。根据测定的猪粪养分含量(含N 0.6%、 $\text{P}_2\text{O}_5$  0.4%、 $\text{K}_2\text{O}$  0.44%)计算有机肥处理猪粪施用量为25000kg/hm<sup>2</sup>。所用化学肥料为尿素、过磷酸钙和氯化钾。每年种植早、晚两季水稻,移栽规格为20cm×20cm。早稻大田生育期一般在4月底5月初至7月底,晚稻大田生育期一般在7月底到10月中下旬。所有肥料于插秧前作基肥一次撒施。各处理其它田间管理措施均相同。

### 1.3 样品采集与处理

施肥后每隔5~7d采取耕层新鲜土壤,测定 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N浓度。

施肥后每天下午4:00~5:00取表层水样(不扰动土层小心取样)测定全氮、 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N浓度及pH值。取样间隔为施肥后1、2、3、5、7、10、15、20d,直到施肥处理氮浓度接近对照处理。

试验开始前一年冬季分别于土层25—30、55—

60、85—90 cm 处理设 5 cm 长陶瓷管,两端塞上纱布包裹洗净的石英砂以防止泥土浆堵塞,中部钻孔引出管道直至地面以上,采用微型真空泵抽取土壤水分。施肥后每天下午 4:00—5:00 抽取不同层次土壤水分,测定  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度和 pH 值,取样间隔为施肥后 1、3、5、7、10、14、20、35、50、70 d。

#### 1.4 测定及计算方法

水样经过滤后,用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定全氮含量,AA3 流动分析仪测定  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量。土壤自田间采回后,立即采用 1 mol/L KCl 浸提,AA3 流动分析仪测定  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量,同时测定水分含量。pH 采用 pH 计直接测定。

采用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据结果计算,SPSS11.5 软件进行结果的统计分析。

## 2 结果分析

### 2.1 稻田表面水无机氮动态

图 1 看出,施用化学肥料的 NPK 及 NPKM 处理田间表面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度在施肥后 1~2 d 内达到高峰,然后迅速下降,7~10 d 后下降至对照水平。由于氮素形态不同,施猪粪(M)处理,其主要氮形态为有机态氮,其氮素进入稻田后无机态氮逐渐释放,其

表面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度显著低于 NPK 和 PKM 处理( $P < 0.01$ )。上述这种变化趋势除与水稻氮素吸收,土壤颗粒吸附等因素有关外,与施肥后田间表面氮挥发强度有关;田间表面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度是导致挥发损失的氮素直接来源<sup>[1]</sup>。氮挥发速率高时带走大量氮素,从而迅速降低了田间表面水氮浓度。李菊梅等<sup>[1]</sup>报道,有机肥施用能显著减低稻田氮挥发损失,并得出田间表面水氮挥发速率与表面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度存在显著正相关关系。

晚稻期间表面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度高峰要显著高于早稻,但是早稻生育期间表面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  高峰持续时间比晚稻要稍为延长。NPK 和 NPKM 处理,早稻表面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  最高浓度分别达到在 60~66 和 47~65 mg/L;晚稻要显著高于早稻,其最高  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度分别在 98~114 和 50~69 mg/L。施肥后短时期内 M 处理表面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度要显著低于 NPK 和 NPKM 处理,略高于对照处理但无显著差异。

由于稻田长期处于淹水还原环境,整个水稻生育期表面水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度均处于较低水平(图 2)。有机肥处理在第 5 d 左右出现微弱峰值,约为 0.6 mg/L,其他各处理基本上保持在 0.4 mg/L 以下,整个时期各处理间表面水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度无显著差异。

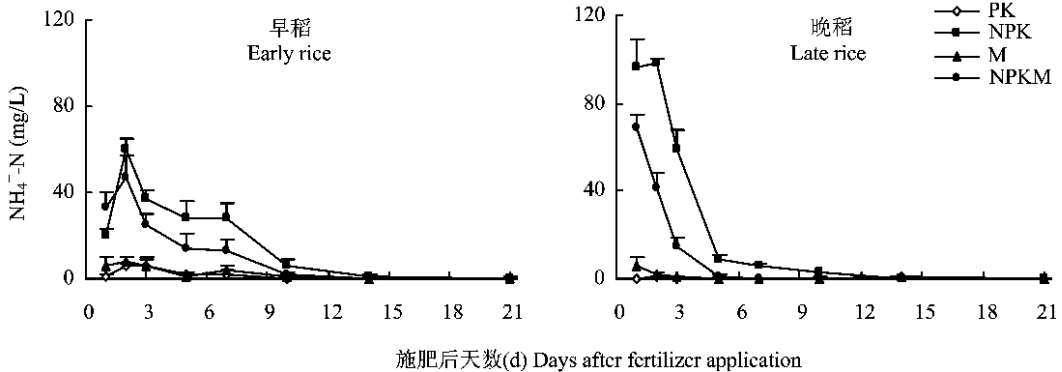


图 1 施肥后早稻及晚稻生育期间田间表面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度

Fig. 1  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration in surface water after fertilization during the growth period of early and late rice

### 2.2 稻田表面水全氮动态

施肥后田间表面水全氮浓度即发生显著变化(图 3)。凡施氮肥的处理均显著高于对照,在施肥 1~2 d 内达到高峰,随后迅速下降,10 d 后各处理下降到与对照之间无显著差异。施肥后短期内各处理全氮浓度基本表现为: NPK > NPKM > M。PK 处理表层水中只有少量的氮,这些氮素主要来自降水、灌溉水、大气非共生固氮以及土壤有机氮矿化、溶液之

间的相互渗透、扩散和交换,整个水稻生育期表面水全氮浓度无显著变化。

由于受降雨,田间表面水温度、水深等不同因素影响,早稻生育期间田间表面水全氮浓度显著低于晚稻,NPK 处理早稻表面水全氮最高浓度为 116 mg/L,显著高于 NPKM 和 M 处理( $P < 0.01$ ),后两者最高浓度分别为 86 和 84 mg/L;晚稻施肥后,NPK 处理全氮浓度最高达到 254 mg/L,显著高于 NPKM

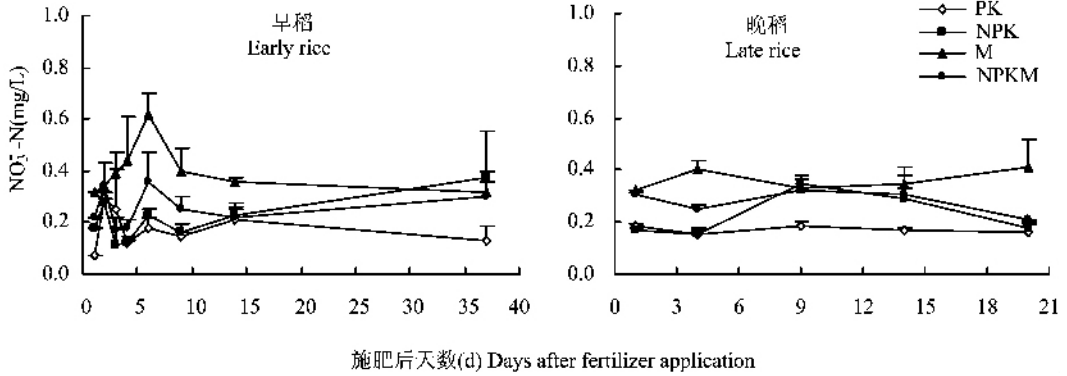


图2 施肥后早稻及晚稻生育期间田间表面水  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度

Fig.2  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration in surface water after fertilization during the growth period of early and late rice

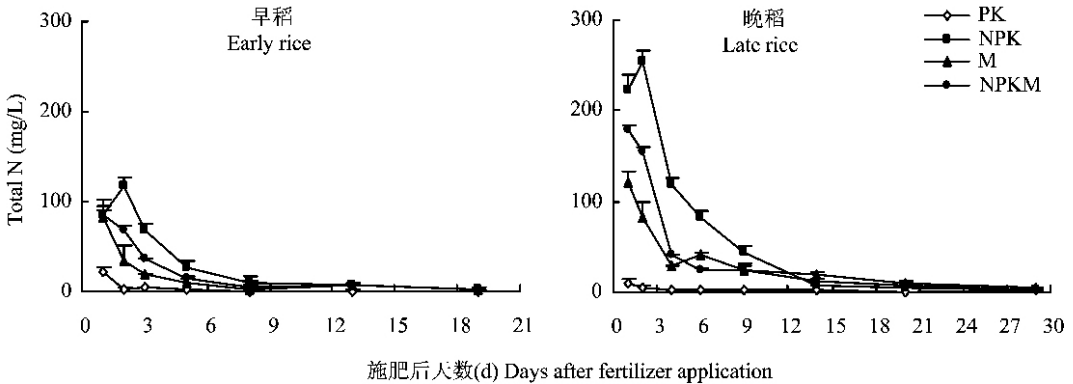


图3 施肥后早稻及晚稻生育期间田间表面水全氮浓度

Fig.3 Total N concentration in surface water after fertilization during the growth period of early and late rice

和 M 处理 ( $P < 0.01$ ), 后两者最高浓度分别为 180 和 122 mg/L (图 3)。施用有机肥 (M) 及有机无机肥配合 (NPKM) 处理, 早稻田表面水全氮最高浓度较化肥 (NPK) 处理分别下降了 26% 和 28%, 晚稻则分别下降了 29% 和 52%。由此可知, 用有机肥 (猪粪) 代替化学肥料能显著降低田间表面水全氮浓度, 减少稻田氮素流失的潜在危险。早晚稻期间各施肥处理全氮浓度高峰期主要集中在 1~2 d 内, 到第 3 d 即显著下降。如 NPK 处理早晚稻期间第 3 d 全氮浓度较最高浓度分别下降了 47 和 135 mg/L。由此可知, 施肥 3 d 内表面水全氮浓度较最高浓度可下降 50% 左右。稻田表面水迅速下降其原因已有相关文献报道<sup>[6]</sup>。水稻吸收, 土壤颗粒吸附, 降雨灌溉, 淋溶径流等均有可能引起稻田表面水全氮浓度下降, 其下降速度快慢, 取决于各因素综合影响的结果。

综合图 1~图 3 可知,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  是稻田表面水无机氮存在的主要形态, 是肥料氮施入后稻田氮素周转的关键物质<sup>[2,4]</sup>。田间表面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  状况影响稻田氮素的挥发淋溶损失, 其与全氮表现相同的变

化趋势。因此施肥后短期内 (约 5~7 d) 是控制氮素径流损失的关键时期, 以后随着水稻吸收, 土壤吸附以及挥发, 表层氮素营养水平迅速下降。施肥后 1~3 d 是稻田氮素浓度高峰期, NPK 处理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  占全氮的比例最高可达 0.5~0.9, M 处理约为 0.3 左右。

### 2.3 不同层次土壤溶液无机氮动态

$\text{NH}_4^+\text{-N}$  是肥料氮素进入土壤的最初分解产物, 是无机氮素在上层水田土壤中的主要存留形态<sup>[1]</sup>。图 4 表明, 减少无机氮用量, 施用有机肥及有机无机肥配合能显著降低土壤溶液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度。不同层次 (25—30、55—60、85—90 cm) 土壤溶液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度 NPK 处理均显著高于 M 及 NPKM 处理 ( $P < 0.01$ ), 即施用有机肥或有机无机肥配合能显著降低土壤溶液  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度, 由此可能减少由于施肥而造成的环境效应。

早稻期间不同层次土壤溶液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度略高于晚稻, 这可能是由于早稻期间稻田水分供应相

对较大,增加氮素向下迁移的数量。与田间表面水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度变化趋势相比,施氮处理(NPK、M、NPKM)土壤不同层次  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度其峰值出现时间略为滞后,且随着深度的增加,高峰期出现越晚。无氮处理(PK)不同层次土壤溶液  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度变化较为平缓,这与有关研究结果基本一致<sup>[13]</sup>。

$\text{NO}_3^-\text{-N}$  是土壤迁移和转化过程最活跃的氮素形态。土壤不同层次  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度(图5)出现峰值时间比  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  晚,浓度比  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  低。由图4~图5可

知,不同层次土壤溶液仍以  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  为主,根据土壤深度不同,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  比例也略有不同,25—30 cm 土层  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  所占比例基本上在5%以下,55—60及85—90 cm 土层  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  所占比例大都在10%左右,高的可达20%以上。

#### 2.4 耕层土壤(0—20 cm)无机氮动态

耕层土壤是作物吸收氮素的主要场所,肥料氮施入土壤最初转化为  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  被水稻吸收,剩余部分在一定氧化还原条件下可转化为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。试验表明,

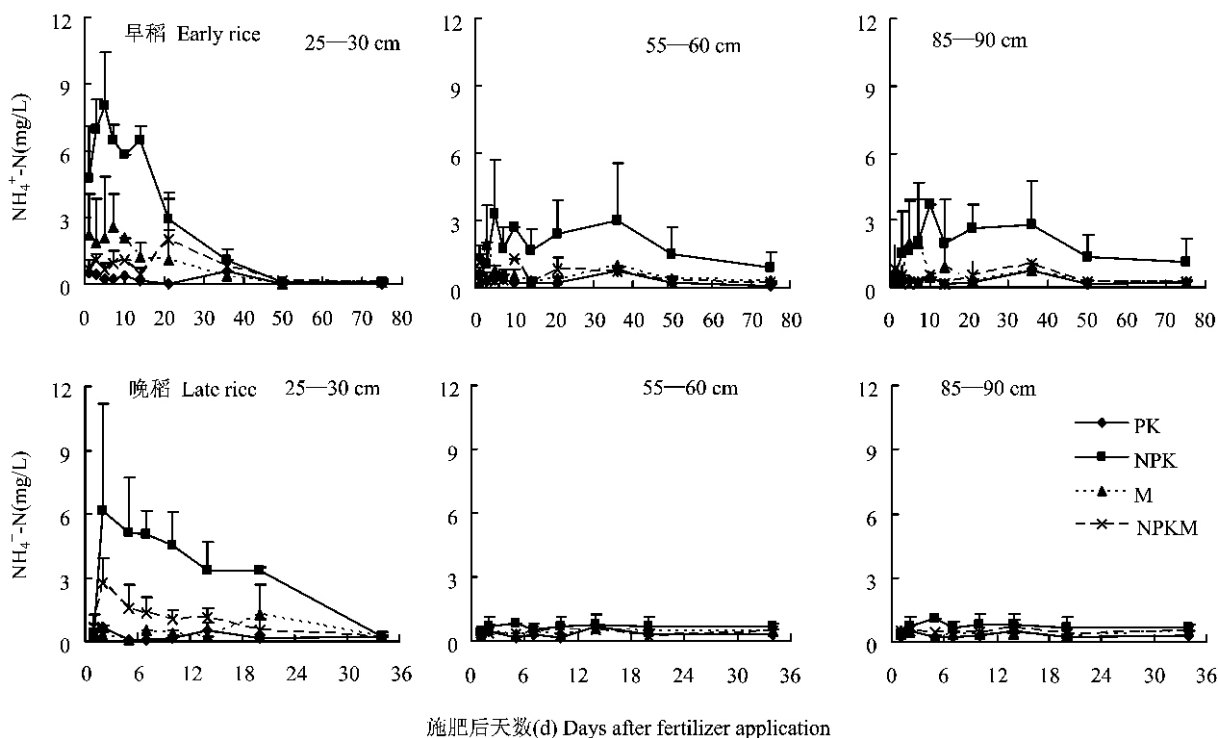


图4 施肥后早稻及晚稻稻田不同层次土壤溶液  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度

Fig.4  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration in soil solution in different layers after fertilization in early and late rice

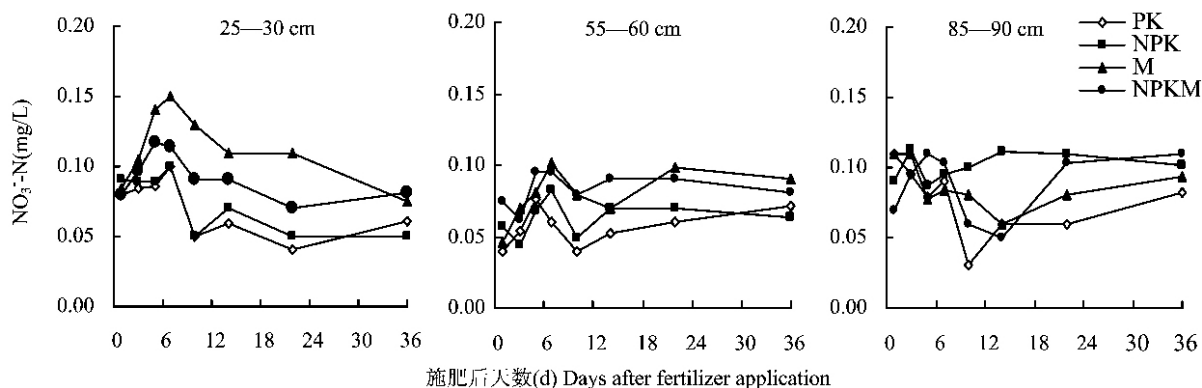


图5 施肥后早稻生育期间稻田不同层次土壤溶液中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度

Fig.5  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  concentration in soil solution in different layers after fertilization during the growth period of early rice

施用有机肥及有机无机肥配合能降低耕层土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度峰值,减少环境负荷。图 6 看出,早稻期间耕层土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度峰值高低顺序为  $\text{NPK} > \text{NPKM} > \text{M} > \text{PK}$ 。其中施氮处理显著高于对照, M 处理显著低于 NPK 处理 ( $P < 0.05$ )。晚稻  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度峰值分别为  $\text{NPK} > \text{NPKM} > \text{M} > \text{PK}$  ( $P < 0.01$ ), 施用有机肥降低土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度,主要是减少了无机氮肥的供应和施用有机肥增加了土壤碳源,刺激土壤微生物活动,增加了土壤对矿质氮素的固定。晚稻期间田间土壤温度相对较高,微生物活动强烈,也是有机肥施用晚稻期间土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度峰值差

异较早稻要明显的一个重要原因。

土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  是土壤氮素较为活跃的主要形态,其通过硝化反硝化损失恶化大气环境,通过淋失增加地下水硝酸盐含量。氮肥的过量施用常被认为是地下水硝酸盐含量增高的重要原因。在稻田长期淹水还原环境下,土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量也较  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  低,施用有机肥及有机无机肥配合 (M 和 NPKM 处理),土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度峰值较化肥处理 (NPK) 略有降低,但是各处理之间未达到显著差异,最高在 1.0~1.5  $\text{mg/kg}$  之间 (图 7)。

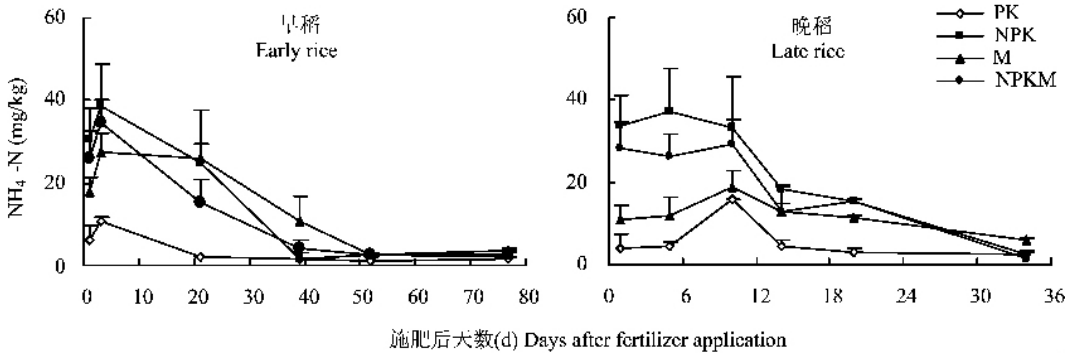


图 6 施肥后早稻及晚稻生育期间耕层 (0—20cm) 土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度

Fig. 6  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration in tillage soil (0—20cm) after fertilization during the growth period of early and late rice

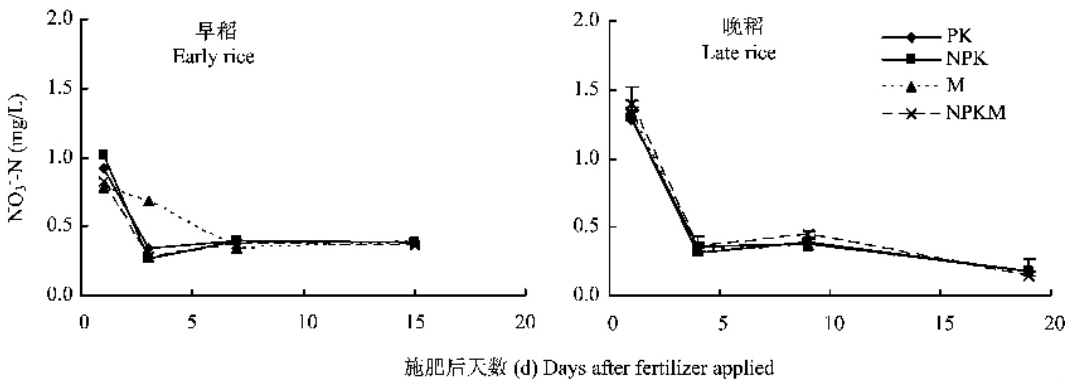


图 7 施肥后早稻及晚稻生育期间耕层 (0—20 cm) 土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度

Fig. 7  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  concentration in tillage soil (0—20 cm) after fertilization during the growth period of early and late rice

## 2.5 化肥、有机肥及其配合施用对水稻产量及其产量构成的影响

由表 1 可知,连续 6 年不同施肥下,各处理平均生物产量 NPKM、NPK、M 和 PK 处理分别为 21370、20915、20277 和 12564  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。通过对 6 年产量比较,化肥有机肥配施水稻稳产性要高于单施有机肥,

显著高于化肥和对照 (表 2)。化肥有机肥配合,一方面通过有机肥直接补充了稻田系统中的土壤养分,同时又通过调节土壤与化肥养分的释放强度和速率,使水稻各生育阶段得到更为均衡的矿质营养,从而提高了水稻产量<sup>[14]</sup>。

各处理年平均子粒产量为  $\text{NPKM} \geq \text{NPK} \geq \text{M} >$

表 1 不同施肥的水稻年平均产量及产量构成(1998~2003)

Table 1 Average rice yield annually and yield compositions under different fertilization during six years plantation

处理 Treatment	生物量 Biomass (kg/hm <sup>2</sup> )	稻谷产量 Grain yield (kg/hm <sup>2</sup> )	产量构成 Yield composition			
			总穗数 Panicle (×10 <sup>4</sup> /hm <sup>2</sup> )	每穗粒数 Filled grain (No./panicle)	千粒重 1000-grain wt. (g)	结实率 Filled grain rate (%)
PK	12564 b	7260 b	437 ± 102	84 ± 17	24.8 ± 0.9	82.2 ± 3.0
NPK	20915 a	11702 a	623 ± 115	97 ± 11	24.5 ± 1.0	79.2 ± 4.6
M	20277 a	11612 a	564 ± 96	107 ± 17	24.3 ± 1.0	83.4 ± 4.3
NPKM	21370 a	12201 a	633 ± 104	103 ± 18	24.4 ± 1.0	81.2 ± 1.6

注( Note ): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平。 Values followed by different letters in same column are significant at 5% level.

表 2 不同施肥的水稻年稻谷产量变化(kg/hm<sup>2</sup>)

Table 2 Average grain yield annually under different fertilization during six years plantation

处理 Treatment	1998	1999	2000	2001	2002	2003	平均 Average
PK	7640	8565	7570	7560	6410	5816	7260 b
NPK	11072	13620	11040	12750	11244	10484	11703 a
M	11500	12830	11700	11230	11957	10453	11612 a
NPKM	11020	13390	12300	12860	12249	11384	12201 a

PK 依次为 12201、11703、11612 和 7260 kg/hm<sup>2</sup>, 化肥有机肥配施最高, 比不施氮肥增产 68%。

### 3 讨论

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 是稻作体系无机氮素的主要存在形态<sup>[2, 14]</sup>, 水稻为喜氮作物, 稻田系统不同层次上较高 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度, 有利于水稻对氮素的吸收利用; 同时, 氮素又是最为活跃的营养元素, 过多将导致氮的挥发、硝化反硝化、淋失等造成对环境的污染, 过少则不利于作物生长。因此保持土壤作物体系适量的氮素供应是维持作物高产稳产的环境友好型农业生产。有机肥化肥配合施用, 与单施化学肥料相比显著降低了稻田水体及耕层土壤的氮素浓度峰值, 减少了氮肥的环境负荷<sup>[5-6, 15]</sup>。同时, 有机肥化肥配合施用增加了田间碳源, 有利于积累稻田土壤有机质, 提高土壤的保水保肥性能。单施有机肥料, 由于有机肥料的大量投入, 施入后短时间内微生物活动增加, 消耗碳源的同时增加了对田间矿质氮素的固定, 有可能造成水稻苗期氮素供应不足而生长缓慢。

在施用等量磷钾肥和每季 N 150 kg/hm<sup>2</sup> 条件下, 化肥有机肥配施有利于土壤均衡供给作物不同矿质养分, 各处理水稻产量均达到较高水平。与单施化肥相比, 有机无机肥配施水稻产量较高, 稳产性能增强, 土壤养分积累较快, 有利于减少氮素损失带来的环境负荷<sup>[5-6, 16]</sup>, 这与前人研究结果一致<sup>[17]</sup>。

单施有机肥由于其氮素后期矿化释放, 有可能造成水稻前期缺氮, 后期氮素供应过量, 易引起贪青晚熟, 从而为水稻增产带来一定的风险。因此, 对于南方红壤双季稻地区, 有机肥化肥配合施用模式, 能有效降低农业面源污染和减少环境负荷, 是一种简单易行的环境保护型施肥技术。

### 参考文献:

- [1] 李忠佩, 唐永良, 石华, 等. 不同施肥制度下红壤稻田的养分循环与平衡规律[J]. 中国农业科学, 1998, 31(1): 46-54.  
Li Z P, Tang Y L, Shi H *et al.* Nutrient cycling and balance of paddy fields in different fertilization systems in red soil region of subtropical China[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 1998, 31(1): 46-54.
- [2] Yoshida T, Benjamin C P. Transformation of soil and fertilizer nitrogen in paddy soil and their availability to rice plants[J]. *Plant Soil*, 1997, 47: 113-123.
- [3] Keeney D R, Sahrawat K L. Nitrogen transformations in flooded rice soil[J]. *Fert. Res.*, 1986, 9: 15-38.
- [4] 张志剑, 董亮, 朱荫湄. 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 Z J, Dong L, Zhu Y M. The dynamic characteristics and modeling of nitrogen in paddy field surface water and nitrogen loss from field drainage[J]. *Acta Sci. Circumst.*, 2001, 21(4): 475-480.
- [5] 纪雄辉, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 施用尿素和控释氮肥的双季稻田表层水氮素动态及其径流损失规律[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2521-2530.  
Ji X H, Zheng S X, Lu Y H *et al.* Dynamics of floodwater nitrogen and its runoff loss, urea and controlled release nitrogen fertilizer appli-

- cation regulation in rice[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2006, 39(12): 2521-2530.
- [6] 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 X Z, Zhu J G, Hosen Y *et al.* Dynamic changes and modeling of nitrogen in paddy field surface water after application with different doses of urea[J]. *J. Agro-Environ. Sci.*, 2004, 23(5): 852-856.
- [7] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, (9): 1-6.  
Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil Environ. Sci.*, 2000, 9: 1-6.
- [8] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国肥料[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1994.  
The Soil and Fertilizer Inst., CAAS. China fertilizer[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1994.
- [9] 徐明岗, 邹长明, 秦道珠, 等. 有机无机肥配合施用下的稻田氮素转化与平衡[J]. *土壤学报*, 2002, 39(增刊): 147-156.  
Xu M G, Zou C M, Qin D Z *et al.* Transformation and utilization on nitrogen in paddy soil under combining application of chemical and organic fertilizer[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2002, 39(Suppl.): 147-156.
- [10] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 等. 有机无机肥配施对水稻氮挥发和水稻产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1): 51-56.  
Li J M, Xu M G, Qin D Z *et al.* Effects of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia volatilization and rice yield in red paddy soil[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2005, 11(1): 51-56.
- [11] Banerjee B, Pathak H, Aggarwal P K. Effects of dicyandiamide, farmyard manure and irrigation on crop yields and ammonia volatilization from alluvial soil under a rice (*Oryza sativa* L.)-wheat (*Triticum sativum* L.) cropping system[J]. *Biol. Fert. Soils*, 2002, 36: 207-214.
- [12] 卢萍, 单玉华, 杨林章, 等. 绿肥轮作还田对稻田溶液氮素变化及水稻产量的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(3): 270-275.  
Lu P, Shan Y H, Yang L Z *et al.* Influence of green manure crop on nitrogen concentration in soil solution of paddy field and rice yield[J]. *Soils*, 2006, 38(3): 270-275.
- [13] 吴建富, 张美良, 刘经荣, 等. 不同肥料结构对红壤稻田氮素迁移的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(4): 368-373.  
Wu J F, Zhang M L, Liu J R *et al.* Effect of different structure of fertilizer on the migration of nitrogen in red rice soil[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2001, 7(4): 368-373.
- [14] 周卫军, 王凯荣, 张光远, 谢小立. 有机与无机肥配合对红壤稻田系统生产力及其土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1109-1113.  
Zhou W J, Wang K R, Zhang G Y, Xie X L. Effects of inorganic-organic fertilizer incorporation on productivity and soil fertility of rice cropping system in red soil area of China[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2002, 35(9): 1109-1113.
- [15] Elbrayi K N, Pathak H, Kalra Naveen *et al.* Simulation of nitrogen dynamics in soil using infocrop model[J]. *Environ. Mon. Ass.*, 2007, 131: 451-465.
- [16] 纪雄辉, 郑圣先, 刘强, 等. 施用猪粪和化肥对稻田土壤表面水氮磷动态的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1): 29-35.  
Ji X H, Zheng S X, Liu Q *et al.* Effect of pig manure and chemical fertilizer application on dynamics of N and P in floodwater of paddy soil[J]. *J. Agro-Environ. Sci.*, 2007, 26(1): 29-35.
- [17] 宇万太, 马强, 周桦, 沈善敏. 不同施肥模式对下辽河平原水稻生态系统生产力及养分收支的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1350-1354.  
Yu W T, Ma Q, Zhou H, Shen S M. Productivity and nutrient budget of rice ecosystem in lower reaches of Liaohe River plain under effects of different fertilization patterns[J]. *Chin. J. Ecol.*, 2007, 26(9): 1350-1354.