

# 有机肥化肥配施对红壤丘陵区稻田土壤氮淋失特征的影响

焦军霞<sup>1</sup>, 杨文<sup>1,2</sup>, 李裕元<sup>1\*</sup>, 彭福元<sup>3</sup>, 鲁耀雄<sup>3</sup>, 崔新卫<sup>3</sup>, 吴金水<sup>1</sup>

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2.湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410012; 3.湖南省农业科学院农业生物资源利用研究所, 长沙 410125)

**摘要:** 化肥过量施用导致土壤养分累积引起的氮(N)磷(P)淋失是农业面源污染的重要形式。基于有效提高养殖废弃物的资源化利用率和保护地下水水质等目的,通过田间小区试验研究了有机肥(M)与化肥(F)不同配施比例对100 cm深度稻田土壤N淋失特征的影响。结果表明:在整个晚稻生长期,渗漏水中不同形态溶解态N浓度的动态变化不尽一致,其中总氮(TN)和铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)的浓度在每次施肥之后1~3 d出现淋失高峰,最大分别达到1.985、1.165 mg N·L<sup>-1</sup>,而硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)浓度的变化比较平缓,无明显峰值。就组成成分而言,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N为淋失TN的主要成分,平均占54.2%;其次是有机态氮(ON),占45.1%;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度很低(<0.2 mg N·L<sup>-1</sup>),仅占0.7%。随着有机肥比例的增高,晚稻产量表现为显著(P<0.05)的先增后降变化趋势,与TN及NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N淋失量和淋失率的变化趋势相似,但N的峰值比产量略有滞后。综合考虑施肥的增产作用与土壤N的淋失风险,研究区稻田化肥与有机肥的配比采用7:3较为适当。

**关键词:** 亚热带;稻田土壤;有机肥化肥配施;氮素淋失;面源污染

中图分类号:S143.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)06-1159-08 doi:10.11654/jaes.2014.06.016

## Impact of Combined Manure and Chemical Fertilization on Nitrogen Leaching from Paddy Field in Red Earth Hilly Area of China

JIAO Jun-xia<sup>1</sup>, YANG Wen<sup>1,2</sup>, LI Yu-yuan<sup>1\*</sup>, PENG Fu-yuan<sup>3</sup>, LU Yao-xiong<sup>3</sup>, CUI Xin-wei<sup>3</sup>, WU Jin-shui<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2.Hunan Normal University, College Resources and Environmental Science, Changsha 410012, China; 3.Institute of Agricultural and Biological Resources Utilization, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China)

**Abstract:** Excessive applications of chemical fertilizers cause nitrogen(N) and phosphorus(P) leaching and thus agricultural non-point source pollution. Here, we conducted a field experiment to study the impact of manure(M) and chemical fertilizer(F) combination on soil N leaching at a depth of 100 cm in paddy field in red earth hilly area, Hunan Province of China. The results showed that the peak concentrations of total nitrogen(TN) and ammonium nitrogen(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) in leachates occurred 1~3 d after fertilizer addition and the maximum values were 1.985 mg N·L<sup>-1</sup> and 1.165 mg N·L<sup>-1</sup> for TN and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, respectively. However, nitrate(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) concentrations in the leachates were at a relatively low level(<0.02 mg N·L<sup>-1</sup>) and varied little without any obvious peaks. Of TN in the leachates, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N was the main form (54.2%), followed by organic nitrogen(45.1%) and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N least(0.7%). The grain yield of late rice increased in treatments with manure ratios of 0 to 30%, but decreased with 30% to 60% of total nitrogen addition. Leaching amounts and rates of TN and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N showed similar trends during growth of late rice. Taking into consideration of rice yield and leaching risk of soil N, an application ratio of 7:3 chemical to manure fertilizer is recommended in the studied area.

**Keywords:** subtropics; paddy soil; manure-fertilizer combined application; nitrogen leaching; non-point source pollution

收稿日期:2013-11-10

基金项目:国家支撑计划课题(2012BAD14B17);国家自然科学基金(41171396)

作者简介:焦军霞(1990—),女,河南鹤壁人,硕士研究生,主要研究方向为流域环境生态。E-mail:jiaojunxia90@126.com

\*通信作者:李裕元 E-mail:liy@isa.ac.cn

化肥过量施用导致的土壤养分累积是造成土壤氮(N)磷(P)淋失和地表水富营养化的重要原因<sup>[1]</sup>。稻田是我国亚热带地区最主要的农业土地利用方式,研究稻田 N 的迁移规律对于揭示农业面源污染机理、寻求科学控制途径具有重要意义。稻田渗漏水与耕作层、作物根层区土体的水分、物质交换较为密切,农田土壤中过量的养分和农药等在很大程度上通过渗漏进入农田浅层地下水体中,因而可以认为农田浅层地下水环境是农业生态系统中一个比较脆弱的部分,农田渗漏水水质的变化能够及时反映农田土壤中的养分盈亏状态<sup>[2]</sup>。目前,对 N 迁移的研究主要以地表径流流失规律为主,而对 N 淋失机理的研究,尤其是野外观测研究尚比较薄弱<sup>[3-4]</sup>。西方国家由于使用化肥较早,土壤养分累积导致 N 淋失的研究开展较早<sup>[5-6]</sup>。近年来的一些研究<sup>[7-8]</sup>表明,养分的不平衡施用会带来严重的环境问题,如土壤中 N 累积引起的地下水污染问题。我国自 20 世纪 80—90 年代也逐渐开始关注 N 淋失对地下水污染的研究<sup>[9-10]</sup>,多数研究表明,氮肥的施用主要导致硝态氮淋失量显著增加,并降低氮肥的利用率<sup>[11-12]</sup>。据初步估测,全世界施入土壤中的氮肥,大约有 30%~50%经土壤淋失进入地下水<sup>[13]</sup>。第一次污染普查的结果也显示,我国 N 的淋失量高达 20.74 万 t·a<sup>-1</sup>,占 N 流失总量的 13%<sup>[14]</sup>。国内关于 N 淋失的研究主要以旱地土壤的研究相对较多<sup>[15-16]</sup>,而对稻田土壤 N 渗漏淋失的研究相对较少,且主要以土柱模拟试验为主<sup>[17-19]</sup>。

畜禽养殖业粪便的无序排放已经成为我国农村地区主要的农业面污染源,也是制约我国养殖业良性发展的主要瓶颈<sup>[20]</sup>。我国每年畜禽养殖业粪便产生量 2.43 亿 t、尿液产生量 1.63 亿 t<sup>[14]</sup>,而资源化利用的比例很低,因此将养殖废弃物转化为有机肥,并逐步实现有机肥与化肥的合理配施是降低养殖业环境风险、提高养分循环利用率的有效途径<sup>[21]</sup>。但有研究表明,施用畜禽有机肥会不同程度地降低土壤对 P 的吸附容量和增加 P 在土壤中的移动性,从而导致 P 向环境迁移的风险增大<sup>[22-23]</sup>。但也有研究发现,由于在有机肥中 N 的矿化需要一个过程,其肥效较化肥更稳定,且淋失风险会有所降低<sup>[1,24-25]</sup>。因此,探讨有机肥与化肥的合理配施比例,不仅可为提高养殖废弃物的资源化利用率提供重要的理论依据,对于养殖业较密集的地区还具有重要的环境保护意义<sup>[26-27]</sup>。本研究针对稻田土壤肥料配施与氮素淋失研究方面存在的不足,通过田间小区试验,初步研究了有机肥与化肥配施比

例对典型亚热带稻田 N 淋失特征的影响,以期为基于环境保护目的的养殖废弃物的资源化利用提供理论依据和数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

田间试验设在位于湖南省长沙县金井镇的中国科学院长沙农业环境观测研究站(28°33'0"E, 113°19'50"N)。研究区年平均降水量 1200~1400 mm,年平均温度 17.2 °C,无霜期 274 d,年日照时数 1663 h,属于典型的亚热带湿润季风气候。当地地下水水位常年变幅在 120~140 cm,地面高程为 78.5 m。研究区为典型红壤丘陵地貌类型,土壤为河流冲积物发育的水稻土。试验地 0~20 cm 耕层土壤基本理化性质为:pH 6.1,砂粒(>0.05 mm)41.6%,粘粒(<0.002 mm)10.0%,质地为粉砂壤土,土壤有机质 19.1 g·kg<sup>-1</sup>,土壤全氮 0.84 g·kg<sup>-1</sup>、全磷 0.51 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 61.4 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 16.8 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

采用田间小区试验,小区面积 45 m<sup>2</sup>(5 m×9 m),小区间用泥起田埂,埂高 30 cm,用农膜包裹以防止小区间养分的侧渗,小区外留进水通道,每个小区留进水口。试验以施肥量为标准设置处理,各处理施 N 量均等,磷钾保持充足供应,试验用有机肥(M)由猪粪、食用菌糠、鸡粪三种原料堆制腐熟而成,三种原料所占比重为 4:4:2。设置 5 个等氮量处理:M0(100% F),M15(15% M+85% F),M30(30% M+70% F),M45(45% M+55% F),M60(60% M+40% F)。每个处理 3 次重复,共计 15 个小区,完全随机区组排列。稻田 N 施用量为 180.0 kg N·hm<sup>-2</sup>,施肥方式为:全部有机肥作基肥施用,其中 5 个处理含有 N 肥的比例依次为 0%、15%、30%、45%和 60%,处理中基肥 N 用量不足 30%的,用尿素补足;分蘖期追施尿素使各处理施 N 量达 70%;其余氮肥在孕穗期施入。各处理肥料用量见表 1。供试水稻品种为优质稻——湘晚籼 12 号,采用常规田间管理方法,2012 年 7 月 21 日插秧,2012 年 10 月 26 日收割,晚稻整个生育期内除排水烤田(8 月 1—20 日)和收获前 1 周左右落干以外,田面皆保持 3~5 cm 水层。

### 1.3 样品采集与分析

本研究主要研究稻田 100 cm 深度土壤 N 的淋失特征,插秧前在每个小区中间分别垂直埋设 PVC 渗漏水采样管以定期采集渗漏水样。管直径 5 cm,总长

表1 试验处理设置与肥料用量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )  
Table 1 Experimental treatments and application rates of fertilizers ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

| 处理                  | 基肥       |       |     |      | 分蘖肥<br>(尿素) | 穗肥    |      | 纯 N 量 |
|---------------------|----------|-------|-----|------|-------------|-------|------|-------|
|                     | 有机肥      | 尿素    | 普钙  | 氯化钾  |             | 尿素    | 氯化钾  |       |
| 处理 1(M0,100%F)      | 0        | 117.5 | 750 | 95.3 | 156.5       | 117.5 | 95.3 | 180.0 |
| 处理 2(M15,15%M+85%F) | 2 851.1  | 58.7  | 0   | 59.6 | 156.5       | 117.5 | 95.3 | 180.0 |
| 处理 3(M30,30%M+70%F) | 5 702.3  | 0     | 0   | 23.9 | 156.5       | 117.5 | 95.3 | 180.0 |
| 处理 4(M45,45%M+55%F) | 8 553.3  | 0     | 0   | 0    | 97.7        | 117.5 | 83.3 | 180.0 |
| 处理 5(M60,60%M+40%F) | 11 404.4 | 0     | 0   | 0    | 39.0        | 117.5 | 47.4 | 180.0 |

注:①有机无机肥料配比主要依据 N 肥的用量,即各处理间施氮量相等;②F 和 M 分别表示化肥和有机肥;③供试肥料的养分含量:有机肥 N 0.95%、P 1.47%、K 0.66%,尿素 N 46%、普钙 P 5.24%( $\text{P}_2\text{O}_5$  12%)。

度 1.5 m,其中地下埋深 1.3 m,地表预留 0.2 m,在管子下端距田面 110~115 cm 深度不同方向分别错位预留直径 3 mm 的进水孔 24 个(6 排,每排 4 个),将下端密封,渗漏水可通过进水孔侧渗进入管子,采用微型泵定期采集渗漏水。每次采样前一天的下午先把陈水抽干,隔夜后再抽取管内收集的新鲜渗漏水,每次采样均在 2~3 h 内完成。采样的时间间隔在不同阶段有所不同,在插秧到水稻分蘖(最初 20 d)每 5 d 取 1 次,之后为每 10 d 取 1 次。整个晚稻生育期内共取 11 次样。水样采集后用放置冰块的保温箱带回实验室,经  $4000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心以去除泥沙等颗粒态物质,取上清液冷冻贮藏,然后集中进行测定,方法依次为:总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解-连续流动分析仪(AA3)法; $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  均采用连续流动分析法直接测定,其中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量包含亚硝态氮(在测定程序中加硫酸脲还原剂)。此外,在水稻收获期测定小区实际稻谷产量。

#### 1.4 数据处理与统计

本文所用数据为 3 个重复的均值,方差分析采用 SPSS 18.0 统计软件包进行,首先对 5 个处理各个指标分别进行方差分析,以比较分析肥料配比对 N 淋失特征的影响,差异达到统计显著水平( $P<0.05$ )的则进一步进行多重比较。文内插图采用 Origin 8.6 绘图分析软件绘制。

N 淋失量的计算公式见式(1),淋失率的计算公式见式(2)。

$$LA=10^3 \times C \times \lambda \times t \quad (1)$$

$$LR=100 \times LA/FA \quad (2)$$

式中:LA 为水稻生育期内 N 的淋失总量, $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;C 为水稻生育期内渗漏水中 N 的平均浓度, $\text{mg N}\cdot\text{L}^{-1}$ ;λ 为土壤入渗率, $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ,采用双环法<sup>[28]</sup>实地测定的土壤入渗率日均为  $4.5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ;t 为水稻生育期内淹水天

数,d,以 92 d 计;LR 为 N 的淋失率,%;FA 为水稻生育期内施用 N 肥总量, $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 渗漏水中氮素的浓度及构成特征

对稻田不同阶段 100 cm 深渗漏水 165 个不同形态 N 浓度的分析结果按照 5 个处理作箱式图予以展示,由图 1 可见:TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  与  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的浓度总的变化范围分别为 0.270~2.599、0.127~1.493、0~0.122  $\text{mg N}\cdot\text{L}^{-1}$ ,变化幅度不大,TN 与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  变异系数 CV 分别为 42.5%和 43.7%,处理间无显著差异( $P>0.05$ )。5 个处理  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的平均浓度分别为 0.457、0.478、0.581、0.665、0.508  $\text{mg N}\cdot\text{L}^{-1}$ ,其中处理 M30、M45 和 M60 的平均浓度均超出了国家地下水 V 类水质标准( $\text{NH}_4^+-\text{N}>0.5 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$ ),污染较为严重,不宜饮用,超标率分别达到 48.5%、57.6%和 51.5%,表明随着有机肥比例的增大,稻田  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的淋失强度有增大的趋势,且对浅层地下水水质有一定的影响。但是从各处理  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的变化来看,总体上影响相对较小,均在  $0.2 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$  以下(图 1),未对地下水水质构成影响,与国内外的研究结论基本一致<sup>[29-30]</sup>。

渗漏水中溶解态 N 的构成可以划分为  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  (包含少量的亚硝态氮)以及有机氮(ON)三类,从图 2 可见:5 个处理中除了 M30 的 ON 略高于  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  以外,其余 4 个处理均以  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  所占的比例最高,分别达到 54.7%、56.2%、49.6%、60.4%和 50.2%;其次是 ON,依次为 44.3%、42.7%、50.1%、39.0%和 49.4%,表明晚稻生长期稻田氮的淋失以  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 ON 为主,这与土壤的通气状况以及施肥种类有密切关系。试验所用 N 肥为尿素和畜禽有机肥,其中 N 的形态主要以有机态为主,而在淹水条件下,通过土壤微生物和酶的作用,有机氮发生水解矿化,短时间内

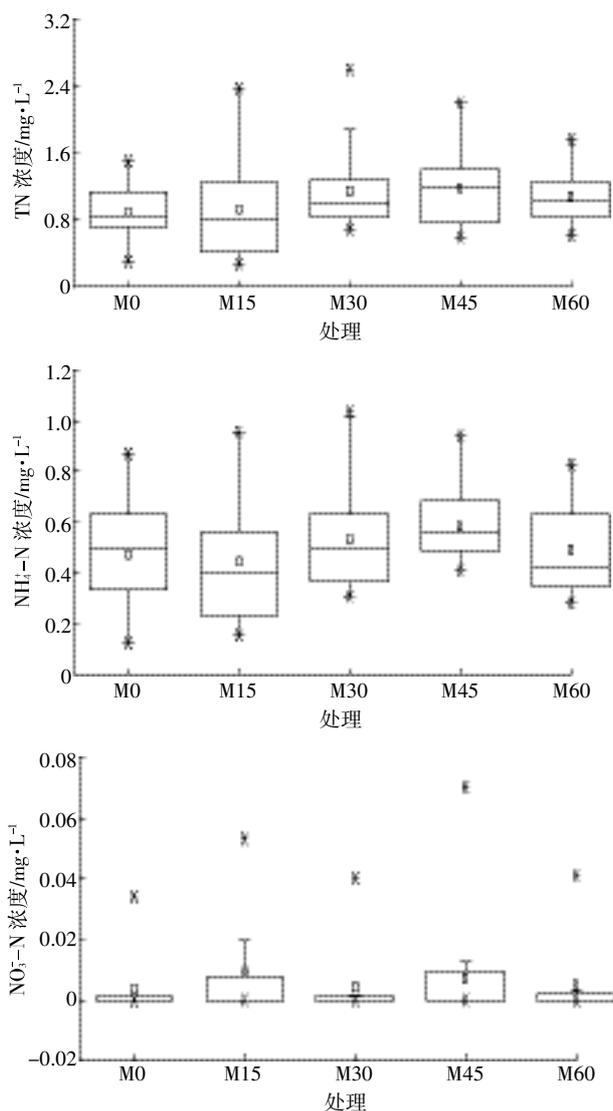


图1 稻田渗漏水各形态氮素浓度的箱体分布图

Figure 1 Box-plots of concentrations of different nitrogen forms in leachates from paddy field

会形成大量的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ，并可能导致土壤颗粒达到吸附饱和状态，从而导致部分  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  随水向深层土壤渗漏<sup>[31-32]</sup>。与此同时，由于土壤在淹水条件下氧气供应不足，进一步的硝化作用受到限制，渗漏水中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度很低，表明水稻生长期内稻田土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的淋失不是 N 淋失的主要形态。总之，在亚热带双季稻区，有机化肥配施对稻田不同形态 N 淋失浓度的影响相对较小，N 的淋失形态均以  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 ON 为主。

## 2.2 渗漏水溶解态氮的动态变化

### 2.2.1 总氮的动态变化

对 100 cm 深度稻田浅层渗漏水的观测结果（图 3）表明，在晚稻生育期内，渗漏水中 TN 的浓度总体

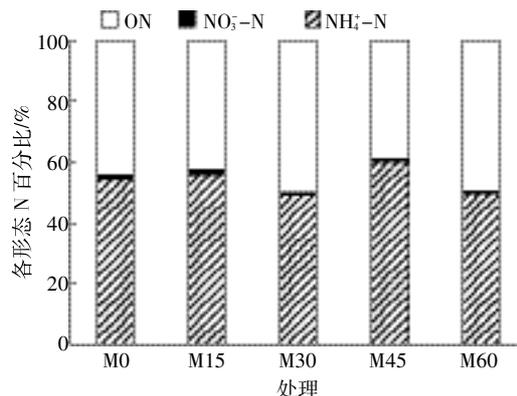


图2 各处理中不同形态氮素的比例分布

Figure 2 Distribution of different nitrogen forms in five treatments

上变化较小，总的变化趋势是在每次施肥（7月21日、8月7日、9月10日）后 1~3 d 内就有明显的上升，波动特征与施肥次数一致，各处理分别出现 3~4 个峰值，其中 M60 出现第 4 个峰的原因可能在于晚稻灌浆期晒田导致的有机肥 N 素矿化所致。根据杨蕊等<sup>[33]</sup>的研究，畜禽有机肥中 N 的释放比较缓慢，一般在施肥后 4~10 周。每个处理在第一次施肥后渗漏水中 TN 的浓度都从一个高峰迅速下降，说明施肥后 1~2 d 是 N 淋失的关键时期。这与前人的研究结果基本一致<sup>[17,34-35]</sup>，表明由于稻田具有充足的水分供应条件，其土壤 N 的淋失对人为施肥的反应十分敏感，因此控制稻田施肥量是降低 N 淋失的关键。

### 2.2.2 铵态氮和硝态氮的动态变化

在晚稻生育期内，5 个处理渗漏水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 浓度的动态变化趋势基本一致（图 3），且  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 呈极显著正相关（ $r=0.863, P<0.01$ ，见表 2）。总体而言，渗漏水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的浓度在每次施肥后都会有明显的增加，但不同处理峰值出现的时间不完全一致，其中 M0（化肥处理）的峰值出现最早，而 M60（有机肥比例最高，占 60%）渗漏水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在整个水稻生育期内的变化都很平缓，没有出现极明显的峰值，均表明施用有机肥会减缓 N 的淋失。这与前人的研究结果基本一致<sup>[25,36]</sup>，崔思远等<sup>[30]</sup>的研究也表明，稻田渗漏水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量主要受施肥的影响，同时施肥对田间水分状况也有较大影响。

渗漏水中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的浓度则一直处于较低的水平，没有超过  $0.2 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$ ，平均仅占淋失 TN 浓度的 0.7%。在渗漏水溶解态 TN 中，ON 平均占 45.1%，可见 ON 在稻田淋失 TN 中也占有相当大的比例，且与 TN 有极显著相关性（ $r=0.804, P<0.01$ ，见表 2）。不同处理结果的比较表明，随着有机肥比例的增加，ON 的

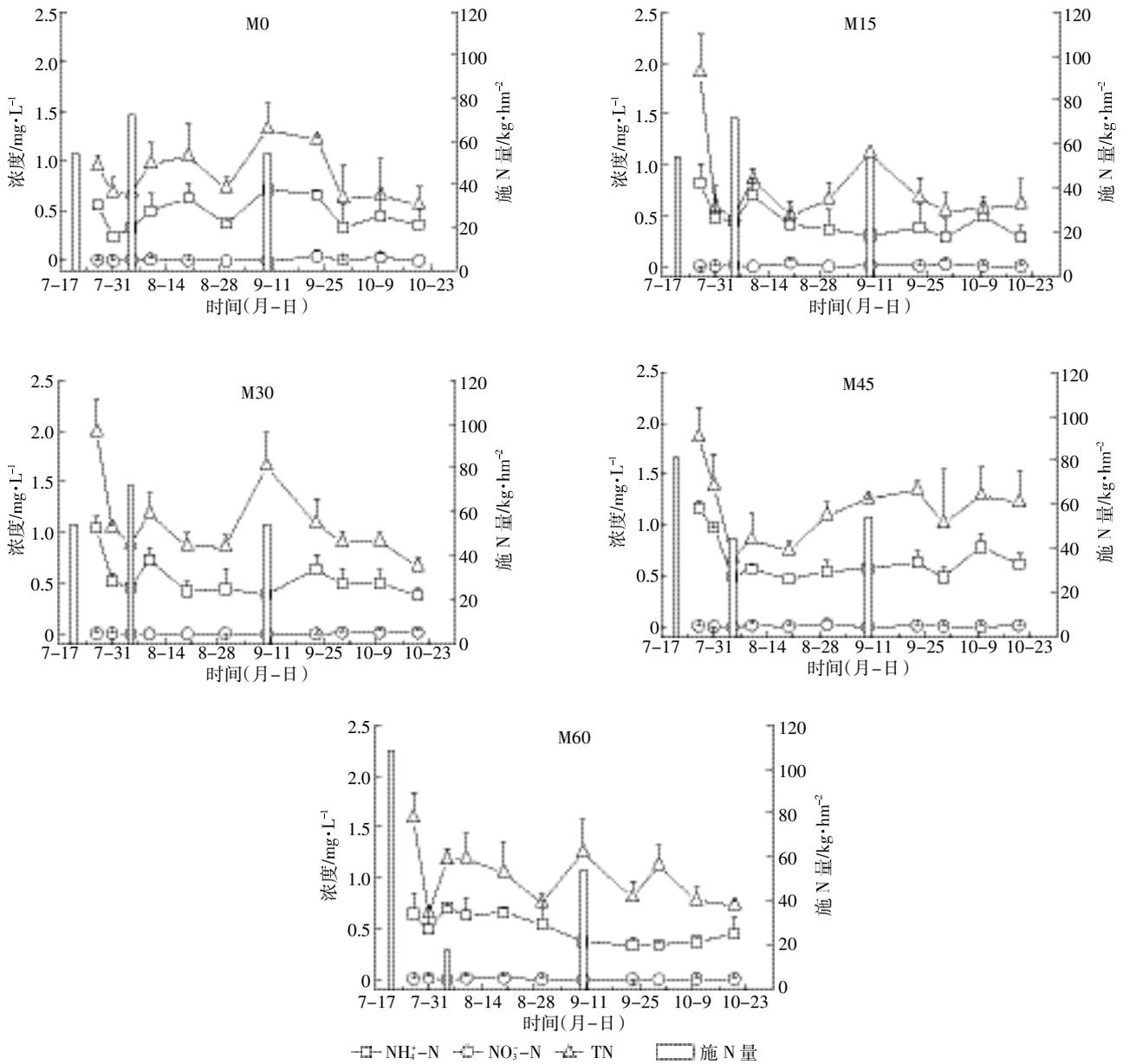


图3 稻田渗漏水中总氮(TN)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)浓度的动态变化

Figure 3 Dynamic in TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentrations of leachates from paddy field

表2 稻田渗漏水中不同形态氮素浓度的相关性分析

Table 2 Correlationship between nitrogen concentrations of different forms in leachates from paddy field

| 因子                              | r                               |                                 |         |         |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------|---------|
|                                 | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | ON      | TN      |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N |                                 | -0.016                          | 0.486** | 0.863** |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N |                                 |                                 | -0.016  | -0.019  |
| ON                              |                                 |                                 |         | 0.804** |
| 有机肥用量                           | 0.395                           | -0.275                          | 0.537*  | 0.506   |

注:有机肥用量与各因子的相关分析中 n=15,对于其他因子均为 n=165;\* 和 \*\* 分别表示在置信度为 0.05 和 0.01 时相关性达到显著。

比例有一定的增大趋势,两者呈显著的正相关关系 ( $r=0.537, P<0.05$ ),表明有机肥施用会在一定程度上增加 ON 的淋失。有研究表明,土壤黏粒对 ON 具有一定的吸附能力,但大量 ON 在土壤吸附饱和的情况下,会随渗漏水迁移至土壤下层,而下层脲酶活性很低,有机态氮通过吸附-解吸-迁移等过程交替缓慢移至渗漏水<sup>[37]</sup>。

### 2.3 稻田氮素的淋失量与淋失率

对不同形态 N 淋失总量和 TN 淋失率的估测结果(表 3)表明,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 与 TN 淋失量随有机肥施用比例的增加呈先增后减的抛物线变化趋势,TN 淋失率

表3 水稻籽粒产量与水稻生育期土壤N的淋失量和淋失率  
Table 3 Grain yields and leaching amounts and rates of nitrogen during rice growth period

| 处理  | 籽粒产量/<br>kg·hm <sup>-2</sup> | 淋失量/kg N·hm <sup>-2</sup>       |                                 |      |      | 淋失率/% |
|-----|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------|------|-------|
|     |                              | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | ON   | TN   | TN    |
| M0  | 6 133.4ab                    | 1.94                            | 0.037                           | 1.57 | 3.55 | 1.97  |
| M15 | 6 355.5b                     | 2.00                            | 0.037                           | 1.51 | 3.55 | 1.97  |
| M30 | 7 033.4c                     | 2.18                            | 0.017                           | 2.20 | 4.40 | 2.44  |
| M45 | 6 100.1ab                    | 2.89                            | 0.029                           | 1.87 | 4.79 | 2.66  |
| M60 | 5 944.5a                     | 2.09                            | 0.021                           | 2.05 | 4.16 | 2.31  |

注:同列数据后未标和标有相同字母的数据,表示处理间差异未达到统计显著水平( $P>0.05$ )。

的变化趋势也基本相似。总体而言,随着有机肥施用比例的增加TN淋失呈现增大趋势,进一步表明稻田土壤有机肥的施用量不宜过高,否则会导致N淋失,从而对地下水水质构成威胁。其主要原因可能在于有机肥的有机氮含量较高,且其矿化释放是逐步进行的,这具有双重效应,既有利于水稻生长过程对N的吸收利用,但也增加了N的淋失风险,因为土壤对ON和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的吸附作用十分微弱。而全部施用化肥条件下,由于稻田土壤长期处于厌氧环境,硝化作用十分微弱,尿素水解形成的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N很容易被土壤吸附固持,从而降低了其淋失风险。所以无论从植物养分供应的角度,还是从环境保护的角度,均应该以有机肥与化肥适当配施更为合理。

由表3可见,亚热带稻田晚稻生育期TN淋失量为3.55~4.79 kg N·hm<sup>-2</sup>,淋失率为1.97%~2.66%。从N的形态而言,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的淋失量变化范围为1.94~2.89 kg N·hm<sup>-2</sup>,ON淋失量为1.51~2.20 kg N·hm<sup>-2</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N为0.017~0.037 kg N·hm<sup>-2</sup>,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和ON的淋失量远大于NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,可见研究区晚稻生长期稻田N的淋失以NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和ON为主,而NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的淋失量非常低。吴建富等<sup>[36]</sup>在江西农大试验站进行的微区试验也表明,水稻土0~1 m土层不同深度渗漏水中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的含量明显高于NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,单施化肥TN淋失量为5.39 kg N·hm<sup>-2</sup>;纪雄辉等<sup>[35]</sup>的研究也表明,双季稻长期淹水条件下,氮素的淋失中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N占有很大比例,占TN的39.7%,TN淋失量为1.97~6.83 kg N·hm<sup>-2</sup>,占施肥量的1.50%~2.28%;Liang等<sup>[38]</sup>对稻田有无机肥配施的淋失研究结果表明,N的淋失率为3.9%~4.5%。但也有研究表明,稻田NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的淋失量远大于NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,如:王少平等<sup>[39]</sup>认为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N淋失量为37.7 kg N·hm<sup>-2</sup>;王胜佳等<sup>[40]</sup>测得NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的淋失量为8.4~12.9 kg N·hm<sup>-2</sup>,相当于同期NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N淋失量的8~14倍,占施肥

总量的5.6%~8.6%;罗良国等<sup>[41]</sup>表明北方稻田淋失的氮素养分主要以NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N为主(3 a期间平均为54 kg N·hm<sup>-2</sup>,占施肥量的28.9%),NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N占很少部分(11.3 kg N·hm<sup>-2</sup>,占施肥量的6.0%)。比较可见,本研究中TN的淋失量和淋失率与吴建富和纪雄辉等研究结果较为一致,而与王少平等稻麦轮作、罗良国等北方稻田的氮素淋失相比要低很多,这种差异与稻田的轮作制度(尤其是水分管理方式)导致的土壤理化性质差异有密切关系。南方稻麦轮作与北方稻田由于每年都有较长时间不淹水的干田期,因此土壤的通气状况比湖南等地长期淹水为主的双季稻区要好,土壤硝化作用占有较强的优势,加之土壤本身对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的吸附作用一般十分微弱,更容易产生淋失<sup>[42]</sup>,淋失量也就更大;而长期淹水条件下由于土壤的矿化作用微弱,土壤中氮素的形态以ON和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N为主,且因土壤的吸附作用其淋失强度也会相应较小。许晓光等<sup>[43]</sup>对研究区稻田N、P淋失特征的研究结果也表明,在不淹水的闲田期稻田土壤N、P的淋失均明显较高,也进一步印证了本文的推论。

各处理间产量的比较结果表明,随着有机肥比例的增高,晚稻产量表现为先增后减的变化趋势,处理间差异达到统计显著水平( $P<0.05$ ),与TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的淋失量及淋失率表现为基本一致的变化趋势,但峰值略有滞后(表3)。M0产量较低的原因可能在于化肥处理养分肥效快、淋失率高导致晚稻生长后期土壤养分供应不足,而M60产量较低则可能因为有机肥肥效缓慢而限制了晚稻生长前期所需土壤养分的充足供应。因此综合考虑肥料配施的增产效果与环境影响,研究区化肥与有机肥的配比以7:3较为合适。此外,鉴于有机肥施用对水稻品质也有重要的提升作用<sup>[44]</sup>,但究竟应该采用怎样的配施比例才能同时达到产量、品质以及环境保护的最佳目标尚待进一步的试验研究。

### 3 结论

(1)在晚稻生长期,渗漏水中各形态N浓度的动态变化不尽一致,其中TN和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度在每次施肥之后1~2 d出现淋失高峰,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的浓度变化比较平缓。稻田氮素淋失总体上受有机化肥配施的影响相对较小。

(2)亚热带稻田生态系统N淋失以NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和有机氮形态为主(分别平均占TN的54.2%和45.1%),与国家地下水V类水质标准相比,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N超标率达49.6%,而NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度很低( $<0.2$  mg N·L<sup>-1</sup>)。

(3)本试验在施肥量为  $180.0 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  条件下,稻田 N 淋失总量为  $3.55 \sim 4.79 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 淋失率为  $1.97\% \sim 2.66\%$ 。综合考虑肥料配施的增产效果与环境影响,研究区化肥与有机肥的配比以 7:3 较为适宜。

#### 参考文献:

- [1] Hansen B, Kristensen E S, Grant R, et al. Nitrogen leaching from conventional versus organic farming systems: A systems modelling approach [J]. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13(1): 65-82.
- [2] 左海军, 张奇, 马履一, 等. 不同种植方式下农田渗漏水硝态氮含量的动态变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 174-179.  
ZUO Hai-jun, ZHANG Qi, MA Lü-yi, et al. Dynamic variation characteristics of nitrate nitrogen concentration in farmland leaching water under different planting patterns[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 174-179.
- [3] 王彩绒, 杨学云, 张付申. 施肥对土壤有机质的影响研究[J]. 陕西农业科学, 2000, 7: 13-15.  
WANG Cai-rong, YANG Xue-yun, ZHANG Fu-shen. Research on the effects of fertilization on soil organic matter[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2000, 7: 13-15.
- [4] 罗璇, 史志华, 尹炜, 等. 小流域土地利用结构对氮素输出的影响[J]. 环境科学, 2010(1): 58-62.  
LUO Xuan, SHI Zhi-hua, YIN Wei, et al. Effects of land use structure on nitrogen export in Hujiaoshan watershed of Danjiangkou reservoir area, China[J]. *Environmental Science*, 2010(1): 58-62.
- [5] Bauder J W, Montgomery B R. N-source and irrigation effects on nitrate leaching[J]. *Agronomy Journal*, 1980, 72(4): 593-596.
- [6] Narang R S, Singh S.  $\text{NO}_3^-$ -N profile in relation to irrigation and nitrogen levels in India[J]. *India Journal of Agricultural Research*, 1979, 23(2): 101-108.
- [7] Gilbert N. The disappearing nutrient[J]. *Nature*, 2009, 461: 716-718.
- [8] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1519-1520.
- [9] 朱济成. 关于氮素地下流失率的初步研究[J]. 环境科学, 1983, 4(5): 35-39.  
ZHU Ji-cheng. A preliminary study on the leachate of nitrogen[J]. *Environmental Science*, 1983, 4(5): 35-39.
- [10] 文 化, 钱友山, 程 序, 等. 华北平原农业对地下水  $\text{NO}_3^-$  污染的初探: 以京郊平原窦店村为例[J]. 农业环境保护, 1990, 9(1): 1-5.  
WEN Hua, QIAN You-shan, CHENG Xu, et al. Study on the  $\text{NO}_3^-$  pollution of groundwater in North China Plain agriculture: Taking Beijing suburban plain Doudian Village as an example[J]. *Agro-environmental Protection*, 1990, 9(1): 1-5.
- [11] Spalding R F, Exner M E. Occurrence of nitrate in groundwater: A review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22(3): 392-402.
- [12] 寇长林, 巨晓棠, 张福锁. 三种集约化种植体系氮素平衡及其对地下水硝酸盐含量的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 660-667.  
KOU Chang-lin, JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Nitrogen balance and its effects on nitrate-N concentration of groundwater in three intensive cropping systems of North China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4): 660-667.
- [13] van Drecht G, Bouwman A F, Knoop J M, et al. Global pollution of surface waters from point and sources of Nitrogen[J]. *Sci World*, 2001, 1 (Suppl2): 632-641.
- [14] 中华人民共和国环境保护部. 第一次全国污染普查公报[EB/OL]. 2010-2-6. [http://www.gov.cn/jrzq/2010-02/10/content\\_1532174.htm](http://www.gov.cn/jrzq/2010-02/10/content_1532174.htm).  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Bulletin of the first national pollution census[EB/OL]. 2010-2-6. [http://www.gov.cn/jrzq/2010-02/10/content\\_1532174.htm](http://www.gov.cn/jrzq/2010-02/10/content_1532174.htm).
- [15] 王 辉, 王全九, 邵明安. 降水条件下黄土坡地氮素淋溶特征的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 61-64, 93.  
WANG Hui, WANG Quan-jiu, SHAO Ming-an. Characteristics of nitrogen leaching from sloping land on Loess Plateau under rainfall conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 61-64, 93.
- [16] 汪 涛, 罗贵生, 朱 波, 等. 施肥对紫色土坡耕地氮素淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 716-722.  
WANG Tao, LUO Gui-sheng, ZHU Bo, et al. Effects of fertilization on nitrogen leaching from hill slope cropland of purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4): 716-722.
- [17] 单艳红, 杨林章, 颜廷梅, 等. 水田土壤溶液磷氮的动态变化及潜在的环境影响[J]. 生态学报, 2005, 25(1): 115-121.  
SHAN Yan-hong, YANG Lin-zhang, YAN Ting-mei, et al. The variation of P&N contents in paddy soil water and its environmental effect [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 115-121.
- [18] Chen X, Wu H, Wo F. Nitrate vertical transport in the main paddy soils of Tai Lake region, China[J]. *Geoderma*, 2007, 142(1): 136-141.
- [19] 宁建凤, 罗文贱, 杨少海, 等. 施磷对苦苣菜生长及土壤磷素淋失的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 525-531.  
NING Jian-feng, LUO Wen-jian, YANG Shao-hai, et al. Effect of phosphorus application on growth of bitter Chinese lettuce and soil phosphorus leaching[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3): 525-531.
- [20] 孟 岑, 李裕元, 许晓光, 等. 亚热带流域氮磷排放与养殖业环境承载力实例研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(2): 635-643.  
MENG Cen, LI Yu-yuan, XU Xiao-guang, et al. A case study on non-point source pollution and environmental carrying capacity of animal raising industry in subtropical watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(2): 635-643.
- [21] Caruso B S. Comparative analysis of New Zealand and US approaches for agricultural nonpoint source pollution management[J]. *Environmental Management*, 2000, 25(1): 9-22.
- [22] Ohno T, Crannell B S. Green and animal manure-derived dissolved organic matter effects on phosphorus sorption[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25: 1137-1143.
- [23] Hooda P S, Truesdale V W, Edwards A C, et al. Manuring and fertilization effects on phosphorus accumulation in soils and potential environment implications[J]. *Advances in Environmental Research*, 2001, 5: 13-21.
- [24] Rahman M M, Liu Y H, Kwag J H, et al. Recovery of struvite from ani-

- mal wastewater and its nutrient leaching loss in soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2):2026–2030.
- [25] 张玉平, 刘 强, 荣湘民, 等. 有机无机肥配施对双季稻田土壤养分利用与渗漏淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1):23–32.  
ZHANG Yu-ping, LIU Qiang, RONG Xiang-min, et al. Effects of combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer on double cropping rice nutrient utilization and leaching loss from paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1):23–32.
- [26] Sutton A L, Jones D D, Joern B C, et al. Animal manure utilization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation (Nutrient Management Special Supplement)*, 1994, 49:57–61.
- [27] Eghball B, Power J F. Beef cattle feedlot manure management[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 49:113–122.
- [28] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
SHAO Ming-an, WANG Quan-jiu, HUANG Ming-bin. *Soil physics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [29] Ji X H, Zheng S X, Shi L H, et al. Systematic studies of nitrogen loss from paddy soils through leaching in the Dongting Lake area of China [J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6):753–762.
- [30] 崔思远, 尹小刚, 陈 阜, 等. 耕作措施和秸秆还田对双季稻田土壤氮渗漏的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10):174–179.  
CUI Si-yuan, YIN Xiao-gang, Chen Fu, et al. Effects of tillage and straw returning on nitrogen leakage in double rice cropping field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(10):174–179.
- [31] 高鹏程, 张一平, 张 海, 等. 水热耦合作用下尿素转化为铵态氮的动力学模型[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1):21–26.  
GAO Peng-cheng, ZHANG Yi-ping, ZHANG Hai, et al. The dynamic model of urea transforming into ammonium affected by interaction of temperature and water[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(1):21–26.
- [32] 潘圣刚, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 氮肥运筹对水稻氮素吸收和稻田渗漏液氮素浓度影响[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.
- [33] 杨 蕊, 李裕元, 魏红安, 等. 畜禽有机肥氮、磷在红壤中的矿化特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3):600–607.  
YANG Rui, LI Yu-yuan, WEI Hong-an, et al. Study on the nitrogen and phosphorus mineralization of livestock and chicken manure in red soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3):600–607.
- [34] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统中稻田面水的 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 floodwater of paddy fields in integrated rice-duck and rice-fish ecosystems[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(10):2125–2132.
- [35] 孙瑞娟, 王德建, 林静慧, 等. 有机肥施用对水田土壤溶液氮磷动态变化及环境的潜在影响[J]. 土壤, 2009, 41(6):907–911.  
SUN Rui-juan, WANG De-jian, LIN Jing-hui, et al. Variation of N & P contents in paddy soil water and its potential environmental effect under pig manure application[J]. *Soils*, 2009, 41(6):907–911.
- [36] 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 Jian-fu, ZHANG Mei-liang, LIU Jing-rong, et al. Effect of different structure of fertilizer on the migration of nitrogen in red rice soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(4):368–373.
- [37] 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面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 Xiong-hui, ZHENG Sheng-xian, LU Yan-hong, et al. Dynamics of floodwater nitrogen and its runoff loss, urea and controlled release nitrogen fertilizer application regulation in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(12):2521–2530.
- [38] Liang X Q, Yuan J L, He M M, et al. Modeling the fate of fertilizer N in paddy rice systems receiving manure and urea[J]. *Geoderma*, 2013.
- [39] 王少平, 俞立中, 许世远, 等. 上海青紫泥土壤氮素淋溶及其对水环境影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(6):554–557.  
WANG Shao-ping, YU Li-zhong, XU Shi-yuan, et al. Nitrogen leaching in the purple clay and analysis on its influence on water environmental quality in Shanghai[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(6):554–557.
- [40] 王胜佳, 王家玉, 陈 义. 稻田土壤氮素淋失的形态及剖面分布特征[J]. 浙江农业学报, 1997, 9(2):57–61.  
WANG Sheng-jia, WANG Jia-yu, CHEN Yi. Soil profile distribution characteristics of leached nitrogen form in paddy fields[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 1997, 9(2):57–61.
- [41] 罗良国, 闻大钟, 沈善敏. 北方稻田生态系统养分渗漏规律研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2):68–74.  
LUO Liang-gou, WEN Da-zhong, SHEN Shan-min. Study on the percolating regularity of nutrient in rice field ecosystem of Northern China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2):68–74.
- [42] 高 茹, 李裕元, 杨 蕊, 等. 亚热带主要耕作土壤硝态氮淋失特征试验研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4):839–852.  
GAO Ru, LI Yu-yuan, YANG Rui, et al. Study on nitrate leaching characteristics in arable soils in subtropical region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(4):839–852.
- [43] 许晓光, 孟 岑, 焦军霞, 等. 亚热带区稻田土壤氮磷淋失特征试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5):991–999.  
XU Xiao-guang, MENG Cen, JIAO Jun-xia, et al. The characteristics of nitrogen and phosphorus leaching in a paddy soil in subtropics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):991–999.
- [44] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10):3133–3139.  
XU Ming-gang, LI Dong-chu, LI Ju-mei, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10):3133–3139.