

# N<sub>2</sub>O Emission from Paddy Soil as Affected by Water Management and N Fertilization

Yunsheng Lou<sup>1,2</sup>, Zhongpei Li<sup>2</sup>, Inubushi Kazuyuki<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of applied meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, No 219 Ningliu Road, Nanjing 210044, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

<sup>3</sup>Laboratory of Soil Science, Faculty of Horticulture, Chiba University, Matsudo 648, Chiba 271-8510, Japan

Email: yunshlou@yahoo.com.cn

**Abstract:** A pot experiment was conducted to investigate the effect of water management and N application on nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission. Two levels of water management and N fertilization were designed, i.e., water management as continuous flooding (CF); saturation (100% of WHC); and N fertilization as NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-fertilizer (NH<sub>4</sub>Cl) and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>fertilizer (Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>). The results showed that N<sub>2</sub>O emission was mainly observed within 60 days after transplanting, with one peak occurring around 10 days, another about 50 days after transplanting. Under saturation conditions, N<sub>2</sub>O emission was higher in the treatment with ammonium than nitrate supply. In contrast, under flooding conditions, more N<sub>2</sub>O emitted in the treatment with nitrate than ammonium supply.

**Keywords:** N<sub>2</sub>O emission; paddy soil; water management; N-fertilization; nitrification; de-nitrification

## 水分及施肥管理对水稻土 N<sub>2</sub>O 排放的影响\*

娄运生<sup>1,2</sup> 李忠佩<sup>2</sup> 犬伏和之<sup>3</sup>

<sup>1</sup>南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044, 中国

<sup>2</sup>中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008, 中国

<sup>3</sup>千叶大学园艺学部土壤学研究室, 松户 648, 日本

Email: yunshlou@yahoo.com.cn

**摘要:** 通过温室盆栽试验, 研究不同施肥及水管理 (持续淹水和100%WHC) 对水稻生长期N<sub>2</sub>O 排放的影响。结果表明, 整个水稻生长期, N<sub>2</sub>O 的排放集中于移栽后60天以内, 移栽后前十天出现第一个峰值, 在第50天追肥之后出现第二个峰值。不同氮肥在不同的水分条件下对N<sub>2</sub>O排放的影响不同, 氨态氮肥在完全湿润状态下有利于N<sub>2</sub>O的排放, 硝态氮肥在长期淹水条件下排放等多的N<sub>2</sub>O。

**关键词:** N<sub>2</sub>O排放; 水管理; 氮肥; 硝化作用; 反硝化作用

### 1 引言

氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)是目前最重要的温室气体之一, 其单位分子的增温潜能是CO<sub>2</sub>的200倍, 而大气中这种气体的浓度正以每年约0.2—0.3%的速度增长<sup>[1]</sup>, 预计到2050年其体积比将从目前的3.12×10<sup>-4</sup> ml L<sup>-1</sup>增加到(3.5~4.0)×10<sup>-4</sup> ml L<sup>-1</sup>。早期的研究表明, 水田排放N<sub>2</sub>O的很少, 不到施氮量的0.1%, 但Xing et al (1998)在总结分析了中

农田N<sub>2</sub>O排放的研究结果后发现, 虽然稻田的平均排放通量小于旱地, 但其排放量却是不容忽视的<sup>[2]</sup>。一些地区水田的N<sub>2</sub>O排放通量甚至高于旱地。我国稻田面积约占世界水稻种植面积的20%, 约占我国作物总种植面积的三分之一, 因此, 研究我国水田N<sub>2</sub>O的排放控制, 对减缓全球增温效应有非常重要的意义。

此外, N<sub>2</sub>O是一种受人类活动影响的重要的温室气体, 它还是平流层中导致臭氧层破坏的光化学反应的主要参与者。据统计, 大气N<sub>2</sub>O浓度增加1倍, 平流层臭氧浓度将随之减少10%, 到达地表的

\*资助信息: 国家自然科学基金(40871151), 江苏省自然科学基金(BK2009413), 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金(081200062)和江苏省“青蓝工程”项目联合资助。

紫外辐射增加20%，从而导致人类皮肤癌的增加和其他健康问题<sup>[3]</sup>。研究控制氧化亚氮的排放量的方法不仅能够保护臭氧层，而且减少了许多因此而产生的环境和社会问题，具有十分重大的意义。该方面的研究目前也正日渐受到很多学者的重视。

影响氧化亚氮排放的因素很多，但最主要的是田间水分以及施肥管理。一般认为稻田土壤在淹水状态下只能排放少量 $N_2O$ <sup>[4]</sup>。研究表明，在长期淹水条件下，硝化过程受到限制，反硝化过程以生成 $N_2$ 为主，所以 $N_2O$ 排放量极少<sup>[5]</sup>。尽管如此，稻田土壤在干湿交替的水分条件下可能具有相当大的向大气排放 $N_2O$ 的潜力<sup>[6,7]</sup>。土壤有效氮含量是影响农田土壤 $N_2O$ 排放的重要因素之一。土壤有效氮主要来自于化学氮肥的施用，所以研究不同氮肥品种及施用量对 $N_2O$ 排放的影响就显得格外重要。本文试图根据试验分析不同水分管理及氮肥品种对稻田 $N_2O$ 排放的影响，为温室气体的综合控制提供有价值的线索。

## 2 材料与方法

### 2.1 供试土壤

采用温室土培试验。供试水稻品种为IR72，由国际水稻研究所提供。供试土壤为砂质水稻土，其基本理化性状为：有机碳 =  $7.5 \text{ g kg}^{-1}$ ；砂粒 = 91.0%；壤粒 = 8.0%；粘粒 = 1.0%；pH ( $H_2O$ ) = 6.3；CEC =  $6.1 \text{ cmol (+) kg}^{-1} \text{ soil}$ 。

### 2.2 试验设计

供试肥料为 $NH_4Cl$ 和 $Ca(NO_3)_2$ ，施肥量为 $300 \text{ kg N/ha}$ 。温室育苗，每盆移入大小一致的幼苗2株。水分管理包括淹水（5 cm 水层）和湿润（100%饱和含水量）两种处理。重复3次。

### 2.3 采样和 $N_2O$ 浓度的测定

甲烷排放通量采用密闭箱-气相色谱法测定，每两周采集一次气体样品，直到成熟。

$N_2O$ 排放通量计算公式如下：

$$F = \rho \times H \times \Delta c / \Delta t \times 273 / T$$

式中， $F$ 为 $N_2O$ 排放通量； $\rho$ 为标准状态下 $N_2O$ 密度，数值为 $1.25 \text{ kg m}^{-3}$ ； $H$ 为密闭箱高度； $\Delta c / \Delta t$ 为单位时间密闭箱内 $N_2O$ 浓度的变化量； $T$ 为密闭

箱内温度。

## 3 结果与分析

图1表明，在施用铵态氮肥（ $NH_4^+-N$ ）的前提下，不同水分管理对 $N_2O$ 排放的影响。在水稻整个生育期，湿润状态下 $N_2O$ 排放量高于淹水状态，这两种水分处理下水稻植株在移栽后的 $N_2O$ 排放趋势一致，即其增长减少变化情况一致并且在相同的时间段内出现峰值。

影响土壤 $N_2O$ 排放的主要因素包括气候、土壤和农业管理技术措施等。其中土壤通气状况、水分状况、pH等直接影响土壤中的微生物活性，因而影响硝化和反硝化作用的相对强弱，以及 $N_2O$ 在土壤中的扩散速率。大量研究证明，土壤中 $N_2O$ 的产生主要来源于土壤微生物和酶参与下的硝化及反硝化反应，硝化及反硝化细菌的活性需要适宜的水、气、热条件。土壤状况、气候及人为因素等通过影响硝化和反硝化作用，从而使得土壤的 $N_2O$ 产生和排放出现差异<sup>[8]</sup>。

土壤通气状况由水分含量、 $O_2$ 在土壤扩散的难以程度以及微生物和根系对 $O_2$ 消耗的多寡所决定。对反硝化过程而言，其速率与 $O_2$ 量呈负相关，但对于硝化过程而言，现只知道有氧时其最终产物是 $NO_3^-$ ，但绝对厌氧条件下能否硝化完全尚存争议。土壤pH对 $N_2O$ 排放的影响十分复杂，不同研究者在不同土壤上所得研究结果不尽一致。一般认为，硝化菌最适宜的pH值与异氧菌一致，为6—8，活动范围为3.5-11.2（陈文新，1998）。而对于反硝化作用而言，在3.4-8.6数值范围内与土壤的pH值呈正相关（陈文新，1989）。当土壤pH值降低时，反硝化作用产生的 $N_2O$ 的比例增大， $N_2O$ 常表现为酸性土壤中反硝化的主要产物<sup>[8]</sup>。

对稻田土壤来说，土壤水分含量始终处于较高或很高的状态，这时，土壤通气性就有可能成为微生物活性最重要的制约因素<sup>[9]</sup>。土壤处于饱和和田间持水量状态时，水分充分渗透，土壤pH降低，呈酸性状态，加上这时土壤间仍然存在不少缺氧的空隙，使得反硝化作用加强，反硝化作用产生的 $N_2O$ 的比例明显增大，而土壤含水量很低和土壤长期持续淹水都不利于硝化及反硝化细菌的生长<sup>[10]</sup>。

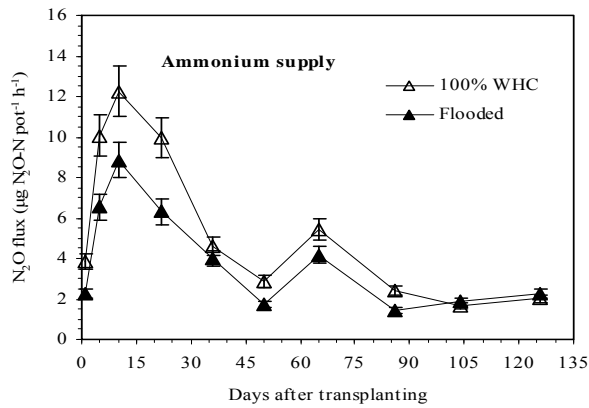


图 1 不同水分管理下施用铵态氮肥对 N<sub>2</sub>O排放的影响

图2表明，在施用硝态氮肥（NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N）前提下，不同水分处理对N<sub>2</sub>O的排放的影响。结果显示，在NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N施用前提下，淹水处理的N<sub>2</sub>O的排放量高于湿润处理下的排放量。

硝态氮肥的处理使得土壤中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度增加，为反硝化作用提供充足的底物，淹水状态下土壤氧气供应不足，更加促进了反硝化作用的进行，N<sub>2</sub>O产生量增多。相反，在湿润状态下的土壤因有较多的氧气含量而抑制了反硝化作用的进行，从而减少了N<sub>2</sub>O的生成。

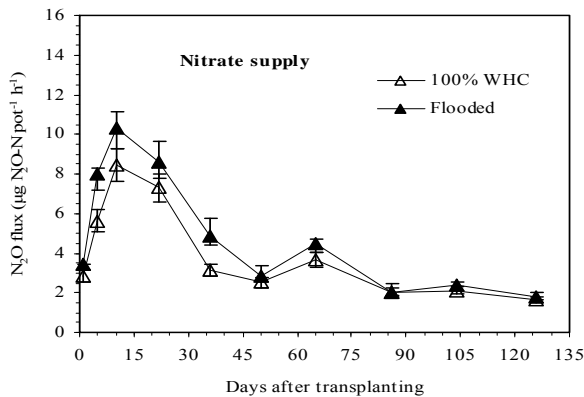


图 2 不同水分管理下施用硝态氮肥对 N<sub>2</sub>O 排放的影响

图3显示，在湿润状态下，施用铵态氮肥的土壤，其N<sub>2</sub>O排放量高于施用硝态氮肥的N<sub>2</sub>O排放量。图4说明，在淹水条件下，施用硝态氮肥更有利于N<sub>2</sub>O的排放，其排放量高于施用铵态氮肥的N<sub>2</sub>O排放量。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>态氮肥往往比NO<sub>3</sub><sup>-</sup>有利于N<sub>2</sub>O的形成<sup>[11]</sup>。一方面，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>促进了硝化作用的进行，在氧气供应受到限制时，NO<sub>2</sub><sup>-</sup>不能彻底氧化为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>，就

会导致N<sub>2</sub>O生成量增加；另一方面，大部分的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>态氮肥是生理酸性肥料，施用后pH降低，酸性条件下有利于N<sub>2</sub>O的生成。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的氧化往往比矿化作用产生NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的速度快的多，因此硝化作用通常是受NH<sub>4</sub><sup>+</sup>供应的限制，因此，施用铵态氮肥可促进硝化作用，但不同氮肥品种的促进作用不同<sup>[12]</sup>。

在饱和湿润条件下，土壤中氧气较充分，铵态氮肥的施用使得土壤中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>含量增多，促进硝化作用的进行，因为有充足的氧气存在使得反硝化作用受抑制。因此，硝态氮肥施用的N<sub>2</sub>O排放量小于铵态氮肥的施用。

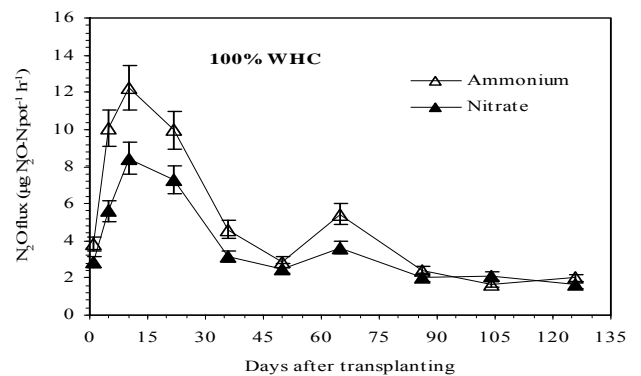


图 3 湿润条件下不同氮肥品种对N<sub>2</sub>O排放的影响

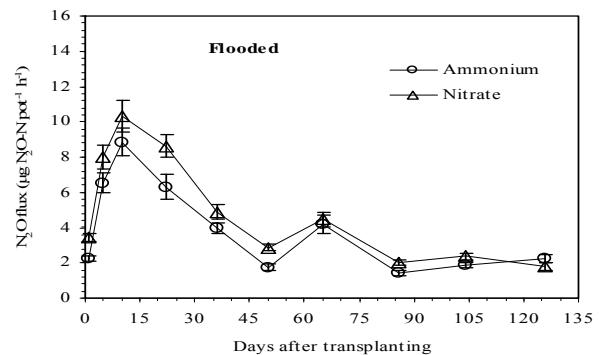


图 4 淹水条件下不同氮肥品种对 N<sub>2</sub>O 排放的影响

我们发现在移栽后的水稻生长期，不同处理下的N<sub>2</sub>O排放趋势是一致的，移栽初期呈上升变化，在第15天左右出现第一个峰值，然后排放量开始下降，直到第50天降到最小值，接着又出现一小段时间的上升趋势，此状态大概持续十天，直到第60天出现第二个排放量的峰值，接着又开始下降，大概20天后也即移栽后第85天N<sub>2</sub>O排放量趋于平缓没有

波动。

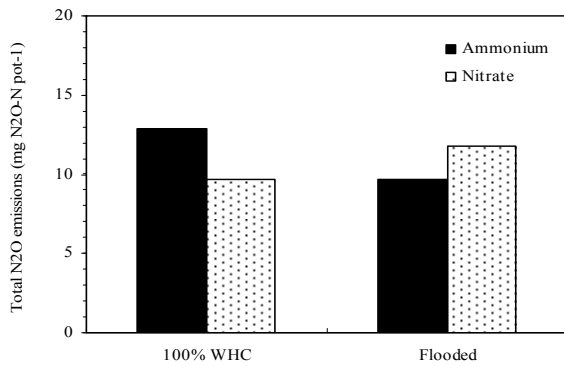


图 5 不同水分管理及氮肥品种对N<sub>2</sub>O排放总量的影响

移栽后初期植株生长较快，此时土壤中的氮肥含量也很旺盛，因此造成N<sub>2</sub>O排放的急剧增长，随着植株的生长减缓N<sub>2</sub>O排放也减少，直到移栽后第50天左右，植株进入分蘖期，生长加速，耗氮量比之前阶段有所增长，但是因为此时土壤中肥料已经不足，所以导致第二个排放高峰期的峰值比第一个少很多。可见，水稻的季节性生长对N<sub>2</sub>O的排放也起着关键性的影响。

#### 4 结论

不同水分处理对N<sub>2</sub>O的排放量不同。施用氨态氮肥的土壤，湿润状态下比淹水状态下的土壤更有利于N<sub>2</sub>O的排放，而施用硝态氮肥的土壤，则是淹水状态下释放更多的N<sub>2</sub>O；在相同的水分状态下，氮肥施用决定了N<sub>2</sub>O的排放，湿润状态下氨态氮肥有益于N<sub>2</sub>O的排放，而淹水状态下，硝态氮肥更加有利于N<sub>2</sub>O的排放。

#### References (参考文献)

[1] IPCC, Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate

Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios, Cambridge UK, Cambridge University Press, 1995.

[2] Xing GX, N<sub>2</sub>O emission from cropland in china, Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 52: 249-254.

[3] Cruzen PJ, Atmospheric chemical processes of the oxides of nitrogen including nitrous oxide // Delwiche CC. Denitrification, Nitrification and Atmospheric Nitrous Oxide, New York: Wiley, 1991, 17-44.

[4] Smith CJ, Brandon M and Patrick JrW, Nitrous oxide emission following urea - N fertilization of wetland rice. Soil Sci .Plant Nutr, 1982, 28: 161-171.

[5] Granli T, Bockman OC, Nitrous oxide from agriculture. Norwegian J. Agri.Sci., 1994, 12 (Suppl.): 34-40.

[6] Minami ,K. Emission of nitrous oxide from agro-ecosystem. *Jap. A gri . Quarterly* , 1987, 21 :21-27.

[7] Xu Hua , Xing Guangxi, Cai ZC, Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 49: 23-28.

[8] Huang Yao, Carbon/Nitrogen Exchange in Soil-Atmosphere System: From Experiment to Model, China Meteorology Press, 2003, 19-23.  
黄耀, 地气系统碳氮交换-----从实验到模型, 气象出版社, 2003, 19-23.

[9] Xu Hua, Xing Guangxi, Cai Zuchong, Effect of soil water regime and chemical N fertilizers application on N<sub>2</sub>O emission from paddy field. Chinese Journal of Applied Ecology, 10(2): 186-188.  
徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 1999, 土壤水分状况和氮肥施用及品种对稻田N<sub>2</sub>O排放的影响, 应用生态学报, 10(2): 186-188.

[10] Chen Guanxiong, Huang Guohong, Huang Bin, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from a rice field and effect of Azolla and fertilitaion on them. Chinese Journal of Applied Ecology, 1995, 6(4): 378-382.  
陈冠雄, 黄国宏, 黄斌, 稻田CH<sub>4</sub> 和N<sub>2</sub>O 的排放及养萍和施肥的影响, 应用生态学报, 1995, 6 (4) : 378-382.

[11] VERMOESON, GROOT CJ de, NOLLET, Effect of ammonium and nitrate application on the NO and N<sub>2</sub>O emission out of different soils, Plant and Soil, 1996, 181:153-162.

[12] Tian Guangming, He Yunfeng, Li Yongxian, Effect of water and fertilization management on emission of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in paddy soil. Soil and Environment, 2002, 11(3): 294-298.  
田光明, 何云峰, 李勇先, 2002, 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响, 土壤与环境, 11 (3): 294-298.

[13] Li Xianglan, Xu Hua, Cao Jinliu, Cai Zuchong, Effect of Water Management on N<sub>2</sub>O Emission in Rice-Growing Season. Soils, 2006, 38(6): 703-707.  
李香兰, 徐 华, 曹金留, 蔡祖聪, 水分管理对水稻生长期N<sub>2</sub>O排放的影响, 土壤, 2006, 38 (6): 703-707.