

# 土壤水分状况和质地对稻田 $N_2O$ 排放的影响\*

徐华 邢光熹 蔡祖聪

鹤田治雄

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(日本国立农业环境技术研究所)

**摘 要** 1994 年在中国科学院封丘生态试验站通过小区试验研究了土壤质地和水分状况对稻田  $N_2O$  排放的影响。结果表明稻田  $N_2O$  排放主要受土壤水分状况的影响, 淹水状态下,  $N_2O$  排放很少, 水分落干期间  $N_2O$  排放量占水稻生长期  $N_2O$  排放总量的 87.50%~98.65%。土壤质地显著影响稻田平均  $N_2O$  排放通量, 砂质土壤排放的  $N_2O$  显著或极显著高于壤质和粘质土壤, 水稻生长期砂质、壤质及粘质土壤的平均  $N_2O$  排放通量分别为 137.63、87.54 和 63.46  $\mu\text{g}N_2O-N / \text{m}^2 \cdot \text{h}$ 。

**关键词** 稻田,  $N_2O$ , 土壤质地, 土壤水分状况

**中图分类号** S153

$N_2O$  是一种受人类活动影响的重要的温室气体<sup>[1]</sup>, 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<sup>[2]</sup>。土壤, 特别是热带土壤和农田土壤, 是大气中  $N_2O$  的最主要来源, 其贡献高达 70%<sup>[3]</sup>。对于农田土壤  $N_2O$  排放的研究多集中于旱地, 因为早期的稻田  $N_2O$  排放的研究都报道稻田  $N_2O$  排放量很小, 仅占施氮量的 0.04% 左右<sup>[4-5]</sup>。早期研究的皆是长期淹水稻田的  $N_2O$  排放, 而约 57% 的中国稻田水稻生长期采取间隙灌溉的水分管理措施, 间隙灌溉造成稻田水分状况干湿交替, 这些稻田应有不同于长期淹水稻田的  $N_2O$  排放规律。因此研究间隙灌溉稻田  $N_2O$  排放规律对全面正确地认识稻田对大气  $N_2O$  的贡献是很有意义的。

土壤质地影响土壤通透性和水分含量, 因而影响土壤硝化作用和反硝化作用的相对强弱及  $N_2O$  在土壤中的扩散速率; 土壤质地还影响土壤有机质的分解速率, 进而影响产  $N_2O$  微生物的基质供应。所以土壤质地是影响土壤  $N_2O$  排放的重要因素之一, 但土壤质地对稻田  $N_2O$  排放通量影响的研究还未见报道。

本文介绍 1994 年在中国科学院封丘生态试验站不同质地试验小区在间隙灌溉的水分管理措施下  $N_2O$  排放通量的观测结果。

\* 本研究受国家自然科学基金会资助(批准号49371039)

收稿日期: 1999-06-01; 收到修改稿日期: 2000-03-17

# 1 材料与方 法

## 1.1 试验小区

试验在中国科学院封丘生态试验站内进行,共三个处理:砂土、壤土及粘土。为了观察方便和便于比较,用砖和水泥砌成 3 个紧密相连的水稻田小区,面积均为  $2 \times 1.5\text{m}$ ,挖去其中 2 个小区的上层 40cm 土壤,分别用砂质和粘质土壤回填,壤质土壤保留原土,以比较土壤质地对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响。供试土壤的一些性质见表 1。

表1 供试土壤的基本性质  
Table 1 Selected properties of studied soils

供试土壤 Soil	pH	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	粘粒含量 (g/kg) Clay content
砂土	9.00	1.90	0.12	28
壤土	8.60	7.79	0.58	196
粘土	8.24	7.63	0.50	350

## 1.2 水肥管理

水稻品种为郑根 654,6 月 21 日移栽,10 月 7 日收获。基肥为过磷酸钙和碳铵各  $750\text{kg}/\text{hm}^2$  和猪粪约  $5000\text{kg}/\text{hm}^2$ 。7 月 5 日和 8 月 10 日二次追肥,每次施尿素  $300\text{kg}/\text{hm}^2$ 。各处理水分管理都与当地稻田的常规水分管理相同,自水稻移栽至开始成熟,采取间隙灌溉的水分管理措施,水稻成熟期土面保持落干以利于水稻收割。

## 1.3 采样和测定

气体采样采用静态箱方法。箱高 1m,底面为  $51 \times 51\text{cm}$ 。间隔 6 天采一次样。在同一小区内固定二个采样点,采样时放置二个采样箱同时采样。样品  $\text{N}_2\text{O}$  浓度用气相色谱测定,ECD 作检测器。

# 2 结果与讨论

## 2.1 土壤水分状况对稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响

图 1 是水稻从移栽至收获期间稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的季节变化。各处理在水稻移栽后第 1、7、13、25、37、49 及 67 天几乎没有  $\text{N}_2\text{O}$  排放,但在水稻移栽后第 19、55、61 天及水稻移栽 72 天后的所有采样日皆有较高的  $\text{N}_2\text{O}$  排放,特别是水稻移栽后第 55 及 61 天各处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量高达  $270\mu\text{g N}_2\text{O-N} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$  以上,砂土处理在水稻移栽后第 61 天  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量更是高达  $1100\mu\text{g N}_2\text{O-N} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$ 。在水稻移栽后第 31 及 43 天,壤土和粘土处理皆有一定量的  $\text{N}_2\text{O}$  排放,而砂土处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量则为零。各处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的季节变化是由什么引起的呢? 追肥似乎能解释水稻移栽后第 19、55 及 61 天的  $\text{N}_2\text{O}$  排放,但为何大量基肥的施入没能促进  $\text{N}_2\text{O}$  排放呢? 看来要解释  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的季节变化还得从施肥外的其它因素着手。

图 2 表示各处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与田面水层厚度的关系。从图 2 可看出,各处理较高的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量皆出现在田面无水层,即田面落干的水分状态下,当田面有水层时, $\text{N}_2\text{O}$  排

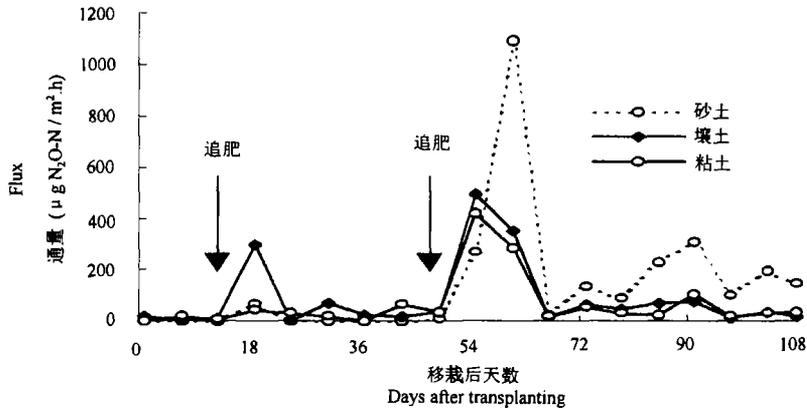


图1 封丘生态试验站小区稻田N<sub>2</sub>O排放通量季节变化  
 Fig.1 Seasonal variations of N<sub>2</sub>O fluxes from the rice paddy fields in the Fengqiu Ecological Experimental Station

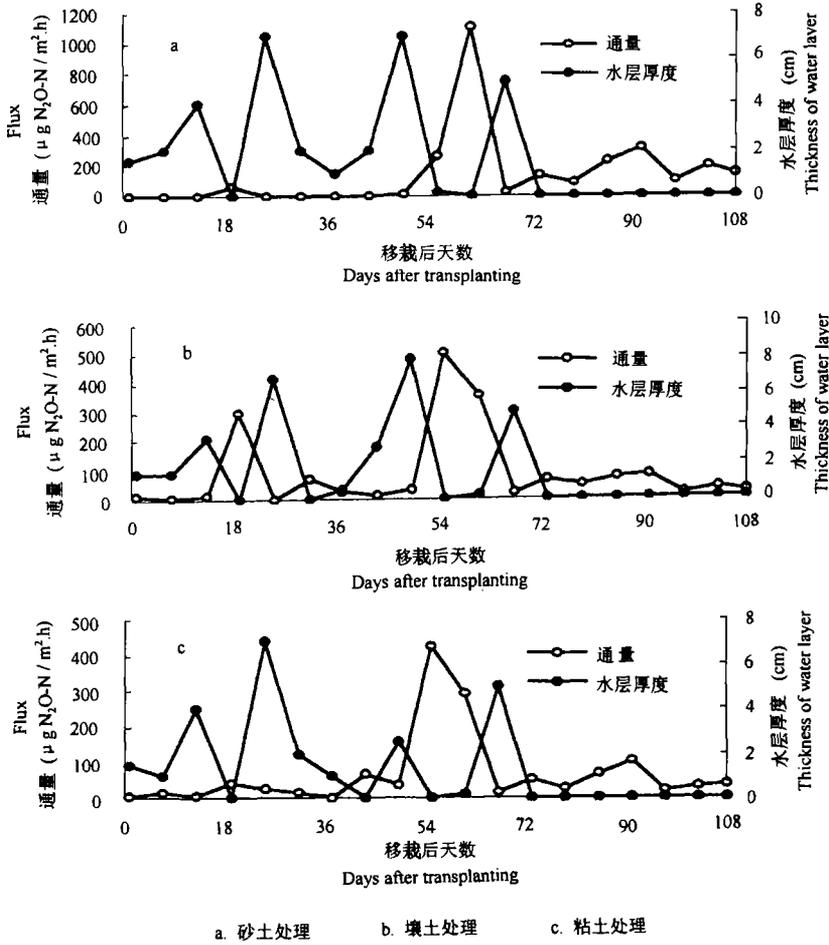


图2 各处理N<sub>2</sub>O排放通量与田面水层厚度的关系

Fig.2 Relationship between N<sub>2</sub>O flux and thickness of water layer above soil surface of different treatment

表2 水稻生长期各处理淹水及落干期间平均 $N_2O$ 排放通量Table 2 Mean  $N_2O$  fluxes during flooding and soil drying periods of rice growth ( $\mu\text{g } N_2O\text{-N/m}^2 \cdot \text{h}$ )

处理 Treatment	淹水期 Flooding period	落干期 Soil drying period	百分比 <sup>1)</sup> Percentage (%)
砂土	3.98	261.75	98.65
壤土	13.87	130.17	90.37
粘土	14.87	104.07	87.50

1) 水分落干期间 $N_2O$ 排放量占水稻生长期 $N_2O$ 排放总量的百分比。

放通量则很小。水稻生长后期, 尽管没有肥料施入, 但由于田面无水层,  $N_2O$  排放通量一直较高。这说明水稻生长期  $N_2O$  排放通量主要受土壤水分状况的影响, 只有在适宜  $N_2O$  产生和排放的土壤水分条件下, 氮肥施用及其它因素对稻田  $N_2O$  排放的影响才有可能显示出来。例如水稻移栽后第 55 及 61 天出现最高的  $N_2O$  排放, 这除了主要与田面水分落干有密切关系外, 可能还与水稻移栽后第 49 天追肥及较高的土温有关。

为进一步说明稻田  $N_2O$  排放与土壤水分状况的密切关系, 表 2 列出了水稻生长期淹水及落干状态下各处理的平均  $N_2O$  排放通量。从表 2 可知, 砂土、壤土及粘土处理水分落干期间  $N_2O$  排放量分别占水稻生长期  $N_2O$  排放总量的 98.65%、90.37% 及 87.50%。由此可见, 稻田  $N_2O$  排放基本上来自水分落干阶段, 淹水期间  $N_2O$  排放量极为有限, 这与国内其它一些测定结果一致<sup>[7,8]</sup>。

土壤中  $N_2O$  的产生主要来源于土壤中微生物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度的水、气、热条件。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。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。在田面落干期间, 土壤含水量适中, 通气性良好, 这时土壤硝化作用和反硝化作用都能以较快速率进行且以  $N_2O$  为主要产物。而稻田淹水时, 土壤处于缺氧和强还原状态,  $N_2O$  的产生以反硝化作用为主, 但这时反硝化作用产生的  $N_2O$  可被  $N_2O$  还原酶还原为  $N_2$ , 加上水层对  $N_2O$  向大气扩散的阻隔及对  $N_2O$  的少量溶解, 所以稻田在淹水状态时向大气排放的  $N_2O$  量很少。

## 2.2 土壤质地对稻田 $N_2O$ 排放通量的影响

表 3 为不同质地土壤水稻生长期  $N_2O$  平均排放通量。表 3 表明供试土壤水稻生长期平均  $N_2O$  排放通量非常高, 远高于国外淹水稻田  $N_2O$  平均排放通量<sup>[4,5]</sup>。造成供试土壤较高  $N_2O$  排放量的主要原因有: (1) 间隙灌溉造成的干湿交替的水分条件促进了土壤  $N_2O$  的

表3 不同质地土壤水稻生长期 $N_2O$ 平均排放通量Table 3 Mean  $N_2O$  fluxes of soils with different texture during rice-growing period ( $\mu\text{g } N_2O\text{-N/m}^2 \cdot \text{h}$ )

土壤质地 Soil texture	A <sup>1)</sup>	B <sup>1)</sup>	平均 Average	空间变异系数 <sup>2)</sup> CSV(%)
砂质	164.81	110.44	137.63	27.93
壤质	70.62	104.45	87.54	27.33
粘质	45.35	81.57	63.46	40.35

1) 同一小区的两个采样点。2) Coefficient of spatial variability.

产生和排放。(2)供试土壤水稻生长期共施入  $750\text{kg} / \text{hm}^2$  碳铵、 $600\text{kg} / \text{hm}^2$  尿素和  $5000\text{kg} / \text{hm}^2$  猪粪, 约合  $400\text{kg} / \text{hm}^2$  无机氮及  $20\text{kg} / \text{hm}^2$  有机氮。大量化肥和有机肥的施用不仅增加了土壤中硝化作用和反硝化作用的氮源, 并且为参与硝化作用和反硝化作用的土壤微生物提供了足够的营养和能源, 因而大大增加土壤  $N_2O$  排放量。

稻田  $N_2O$  气样的人工静态箱采集费时费力, 如为处理设置重复则需要很大的经费和人力投入。由于处理没有重复, 故不能通过方差分析和多重比较来确定各处理水稻生长期  $N_2O$  平均排放通量的差异显著性。但由于每次采样均在相同的条件下同时进行, 那么就可以采用成对数据  $t$  检验的方法进行数理统计。这样在不作处理重复的情况下, 仍然可以获得统计结果。Wassmann 等<sup>[9]</sup>曾用  $t$  检验方法研究各种施肥处理对稻田  $CH_4$  排放量影响的统计显著性。

但是用成对数据  $t$  检验的方法有一定的局限性。一是该方法本身的局限性。如处理个数多时, 测验次数大量增加, 处理数与测验数有如下关系: 测验数 =  $k(k-1) / 2$ ,  $k$  为处理数; 同时容易犯第一类错误<sup>[10]</sup>。二是当处理使  $N_2O$  排放的季节变化模式发生变化时, 如排放峰值提前或延后, 成对数据  $t$  检验方法可能不能正确反映真实情况。因此, 在进行成对数据  $t$  检验之前, 首先应考察各处理的  $N_2O$  排放季节变化模式是否一致。从图 1 可以看出, 不同质地稻田的  $N_2O$  排放的季节变化模式并无实质性差异。因此, 本文可以采用成对数据  $t$  检验方法进行不同质地稻田  $N_2O$  排放量差异的显著性检验。

不同质地的稻田土壤  $N_2O$  排放通量有明显的不同。从表 3 可以看出, 砂质土壤的  $N_2O$  排放通量远远高于壤质和粘质土壤, 壤质土壤的  $N_2O$  排放通量也明显比粘土高。对各处理小区两个采样点的测定结果平均后, 用成对数据  $t$  检验的方法进行统计分析表明, 砂土的  $N_2O$  排放通量极显著大于壤土和粘土, 壤土又显著大于粘质土壤。

土壤质地对旱作土壤  $N_2O$  排放通量的影响已有一些研究<sup>[11, 12]</sup>, 总的说来, 重质地旱作土壤  $N_2O$  排放通量要高于轻质地土壤, 这主要是由重质地旱作土壤较强的保水能力引起的。有关土壤质地对稻田  $N_2O$  排放通量影响的研究迄今还未见报道。在本试验中, 砂质土壤排放较多  $N_2O$  的主要原因为: (1) 砂质土壤的气体扩散较粘质土壤快, 有利于土壤中产生的  $N_2O$  向大气排放, 这一点对土壤水分状况以湿潮为主的稻田土壤尤为重要。(2) 砂质土壤对氧化还原电位变化的缓冲作用较弱, 土壤氧化还原电位易于变化, 土壤硝化作用和反硝化作用易于交替发生, 从而促进土壤  $N_2O$  产生和排放。(3) 砂质土壤对有机质的保持作用较弱, 因而即使砂质土壤有机质含量较粘质土壤低(表 1), 但对产  $N_2O$  微生物的有机基质供给可能较多<sup>[6]</sup>。

### 2.3 $N_2O$ 排放的空间变异性

由于土壤性质的空间变异, 更由于该稻田的渗漏水性好, 经常不能维持完整的水层, 因此小区内  $N_2O$  排放通量具有较大的空间变异性。从表 3 可知, 砂质、壤质及粘质处理小区内相邻两采样点水稻生长期  $N_2O$  排放通量的空间变异系数分别为 27.93%、27.33% 及 40.35%, 但相邻两点水稻生长期  $N_2O$  平均排放通量的差值要小于平均值。图 3 为壤土小区相邻两点同时测定的  $N_2O$  排放通量差异及平均值。图 3 表明大部分采样日相邻两点同时测定的  $N_2O$  排放通量差异等于或大于平均值, 只有第 1、11、15 及 17 次例外。比较表 3 和图 3  $N_2O$  排放通量的空间变异结果可知, 19 次采样结果平均后, 相邻两采样点的  $N_2O$

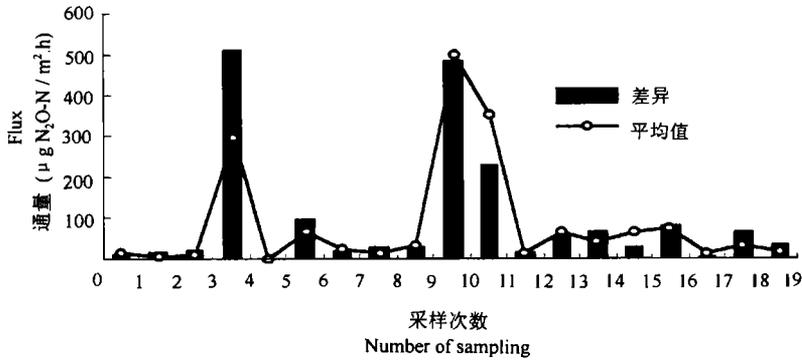


图3 壤土小区相邻两点同时测定的N<sub>2</sub>O排放通量差异及平均值

Fig.3 The difference and average value of N<sub>2</sub>O fluxes observed at two points in loam plot

排放通量趋于接近。上述结果说明,一般情况下,小区内空间变异带来的每次采样的偶然误差可以通过足够多次的采样平均得以降低。另外更重要的是,只有在全国各主要植稻区选择尽可能多的试验点进行观测,才能科学准确地评价我国稻田对大气N<sub>2</sub>O的贡献。

### 参 考 文 献

1. Yung Y L, Wang W C, Lass A A. Greenhouse effect due to atmospheric nitrous oxide. *Geophys. Res. Lett.*, 1976, 3:619~621
2. Cruzen P J, Enhalt D H. Effects of nitrogen and combustion on the stratospheric ozone layer. *Ambio*, 1974, 3:201~210
3. Prather M, Derwent R, Enhalt D, Fraser P, Sanhueza E, Zhou X. Other trace gases and atmospheric chemistry. In: Houghton J T et al. ed. *Climate Change 1994*. Cambridge University Press, 1995, 77~126
4. Denmead O T, Freney J R, Simpson J R. Nitrous oxide emission during denitrification in a flooded field. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1979, 43:716~718
5. Smith C J, Brandon M, Patrick Jr W H. Nitrous oxide emission following urea nitrogen fertilization of wetland rice. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1982, 28:161~171
6. Jenkinson, D S. The fate of plant and animal residues in soil. In Greenland D J, Hayes M H B eds. *The Chemistry of Soil Processes*. John Wiley & Sons Ltd, 1981, 505~561
7. Xu Hua, Xing Guangxi, Zu-Cong Cai, Haruo Tsuruta. Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49:23~28
8. 陈冠雄, 黄国宏, 黄斌, 吴杰, 于克伟, 徐慧, 薛晓华. 稻田N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>的排放及养萍和施肥的影响. *应用生态学报*, 1995, 6(4): 378~382
9. Wassmann R, Wang M X, Shanguan X J, Xie X L, Shen R X, Wang Y S, Papen H, Rennenberg H, Seiler W. First records of a field experiment on fertilizer effects on methane emission from rice fields in Hunan-province (P R China). *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20(19):2071~2073
10. 南京农业大学主编. *田间试验和统计方法*. 北京: 农业出版社, 1987
11. Skiba U, Hargreaves K H, Fowler D, Smith K A. Fluxes of nitric and nitrous oxides from agricultural soils in a cool temperate climate. *Atmos. Environ.*, 1992, 26A:2477~2488
12. Vinther F P. Measured and stimulated denitrification activity in a cropped sandy and loamy soil. *Biol. Fertil. Soils*, 1992, 14:43~48

## EFFECT OF SOIL WATER REGIME AND SOIL TEXTURE ON N<sub>2</sub>O EMISSION FROM RICE PADDY FIELD

Xu Hua Xing Guang-xi Cai Zu-cong

(*Institute of soil science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

H. Tsuruta

(*National Institute of Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Japan*)

### Summary

Plot experiment was carried out to study the effect of soil water regime and soil texture on N<sub>2</sub>O emission from rice paddy field in Fengqiu ecological experimental station, Chinese Academy of Sciences in 1994. The results showed that N<sub>2</sub>O emission was mainly affected by soil water regime. N<sub>2</sub>O emission was very low when the soil was flooded, while N<sub>2</sub>O emission during soil drying period accounted for as high as 87.50%~98.65% of the total seasonal N<sub>2</sub>O emission. Soil texture significantly influenced N<sub>2</sub>O emission from rice paddy field. N<sub>2</sub>O emission from sandy soil was significantly higher than that from loam and clay soils. Seasonal mean N<sub>2</sub>O fluxes from sandy, loam and clay soils were 137.63, 87.54 and 63.46 μg N<sub>2</sub>O-N · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>, respectively.

**Key words** Rice paddy field, Nitrous oxide, Soil texture, Soil water regime