第 40 卷 第 5 期
2003 年 9 月

土 壤 学 报
ACTA PEDOLOGICA SINICA

Vol. 40, No. 5
Sep., 2003

豆科绿肥和化肥氮对双季稻稻田氧化亚氮排放贡献的研究*

熊正琴[1] 邢光熹[1] 鹤田治雄[2] 施书莲[1] 沈光裕[1] 杜丽娟[1]
(1 中国科学院南京土壤研究所物质循环开放研究实验室, 南京 210008) (2 日本国立农业环境研究所)

摘 要 研究了大田条件下施用绿肥与化肥 N 后, 双季稻区稻田土壤氧化亚氮(N_2O) 的排放。结果表明, 在早稻生长季节既施绿肥又施化肥的处理(VN) N_2O-N 的排放量高达 2.75 kg hm^{-2}, 显著高于只施绿肥不施化肥(V0)、只施化肥不施绿肥(FN) 或既不施绿肥也不施化肥(F0) 的处理(后三者在早稻生长季节 N_2O-N 的排放量分别为 0.29 kg hm^{-2}、0.35 kg hm^{-2}和 0.18 kg hm^{-2}), 也显著高于在晚稻生长季节各处理 N_2O-N 的排放量(VN、V0、FN 和 F0 处理分别为 0.34、0.26、0.28 和 0.23 kg hm^{-2})。绿肥不仅影响稻田土壤 N_2O 的排放量, 还影响其排放模式。VN 处理 N_2O 的排放主要集中早稻生长季节的中期烤田之后, 其它处理则在整个水稻生长季节均有排放。在早稻生长季节绿肥与化肥 N 间还存在极显著的交互效应。

关键词 N_2O 排放, 水稻田, 双季稻, 豆科绿肥
中图分类号 X16

N_2O 既是一种重要的温室气体, 又是破坏臭氧层的重要参与者, 在大气中的浓度从工业革命前的 275 m^3 km^{-3}, 以平均每年 0.2% ~ 0.3% 的速度增加到目前的 312 m^3 km^{-3}[1]。人为活动增加的 N_2O 约 90% 与农业生产有关[2]。

对农业土壤 N_2O 排放的研究, 早期多集中在旱地, 而认为水田的 N_2O 排放量很小[3]。然而, 近来的研究表明, 水田的 N_2O 排放量不可忽视[4], 特别是在水旱轮作的未淹水阶段[5] 以及水分干湿交替过程中[6]。作为世界主要水稻生产国之一, 我国 90% 的稻田采取水旱轮作以及水稻生长中期烤田和末期排干的水分管理方式, 双季稻占我国稻田面积的 66%[7], 是 N_2O 排放的又一重要来源[4]。

种植豆科绿肥是改善土壤结构、缓解土地退化、实现农业可持续发展的重要措施, 我国南方冬绿肥播种面积就达 8.6× 10^6 hm^2[8]。然而, 豆科作物固定的氮是 N_2O 排放的重要来源[9], 豆科绿肥能同时为土壤微生物提供底物及能量需要, 从而促进土壤反硝化作用的进行[10, 11], 但稻田施用豆科绿肥后对 N_2O 排放的影响鲜见报道[12]。

本文报道了我国双季稻区在冬季旱作条件下种植豆科作物并作为早稻绿肥施用后, 在双季稻水稻生长季节稻田 N_2O 的排放情况。本文同时比较了(1) 施用绿肥和化肥、(2) 只施绿肥不施化肥、(3) 只施化肥不施绿肥、以及(4) 既不施绿肥也不施化肥四种处理 N_2O 的排放, 旨在探索稻田施用绿肥后对双季稻区 N_2O 排放的影响或者绿肥和化肥 N 之间对 N_2O 排放是否存在交互效应, 从而为绿肥对稻田 N_2O 排放影响的评价提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验设置

田间试验在中国科学院红壤生态实验站江西鹰潭(28°15′N, 116°55′E) 进行, 试验地土壤含有机碳 14.0 g kg^{-1}, 全氮 0.76 g kg^{-1}, pH 值(水提) 5.5。试验设置 4 种处理, 包括 2 种肥料(绿肥与化肥) 各 2 个水平(施与不施), 分别为 VN: 既施绿肥又施化肥; V0: 只施绿肥, 不施化肥; FN: 只施化肥, 不施绿肥;

* 国家自然科学重大项目基金(39790100) 资助
收稿日期: 2002-03-31; 收到修改稿日期: 2002-09-10

F0: 既不施绿肥, 也不施化肥。各处理重复 3 次, 每小区为 5× 5 m^2。施用绿肥处理将紫云英在早稻移栽前(4 月 11 日) 作为绿肥翻耕入土, 相当于施绿肥氮 124 kg hm^{-2}。化肥处理在早、晚稻均施化学氮肥, 施氮量采用当地最高水平, 每季 276 kg hm^{-2}, 其中一半作为基肥施用, 另一半作为追肥施用。P、K 施用量采用当地平均水平, KCl 150 kg hm^{-2}, 钙镁磷肥 1 200 kg hm^{-2}作为基肥于早稻、晚稻移栽时分别施入。早稻和晚稻品种分别为浙 733 和 4015, 于 2000 年 5 月 7 日和 7 月 23 日移栽, 移栽当天施基肥, 8 天后再施追肥, 6 月 16 日和 9 月 24 日中期烤田, 之后保持干干湿湿, 至收获前排干, 7 月 18 日和 10 月 31 日收获。

1.2　N_2O 采集、测定

N_2O 气体样品采用密闭箱法采集, 密闭箱为 50 cm× 50 cm× 50 cm 或者 50 cm× 50 cm× 100 cm 的透明有机玻璃箱。每隔 7 d 观测一次, 施肥后和中期烤田阶段每天观测一次, 冬季每 2 周观测一次。观测时, 每隔 10 min 采一次气样, 共 4 次, 同时测定箱温、5 cm 处土温、气温和土壤含水量或氧化还原电位。N_2O 样品用带十通阀控制的反吹装置和^{63}Ni 电子捕获器的气相色谱(HP 5890 Ⅱ) 测定, 测定条件为: 进样口温度 100℃, 炉温 85℃, 检测器温度320℃。前置柱和分析柱分别为 0.3 cm× 1 m 和 0.3 cm× 3 m 的不锈钢 Porapak Q 柱。载气为 95% 氩气+ 5% 甲烷, 流速为 30 ml min^{-1}。

1.3　数据分析

N_2O 排放通量根据徐华等提供的公式进行计算[13]。N_2O 通量用 3 个重复的平均值及标准偏差表示, 累积排放量以 N_2O 排放通量平均值与相邻 2 次观测间隔时间相乘后再相加而得, 季节排放量指水稻移栽至收获的累积排放量。N_2O 季节排放通量平均值是将3 个重复的每次观测值按间隔时间加权平均后再平均。处理间比较以 3 个重复的平均值进行方差分析及多重比较, 绿肥与化肥的交互效应则按照 2 因子× 2 水平的双因素方差分析及多重比较。

2　结果与分析

2.1　早稻季节稻田 N_2O 的排放

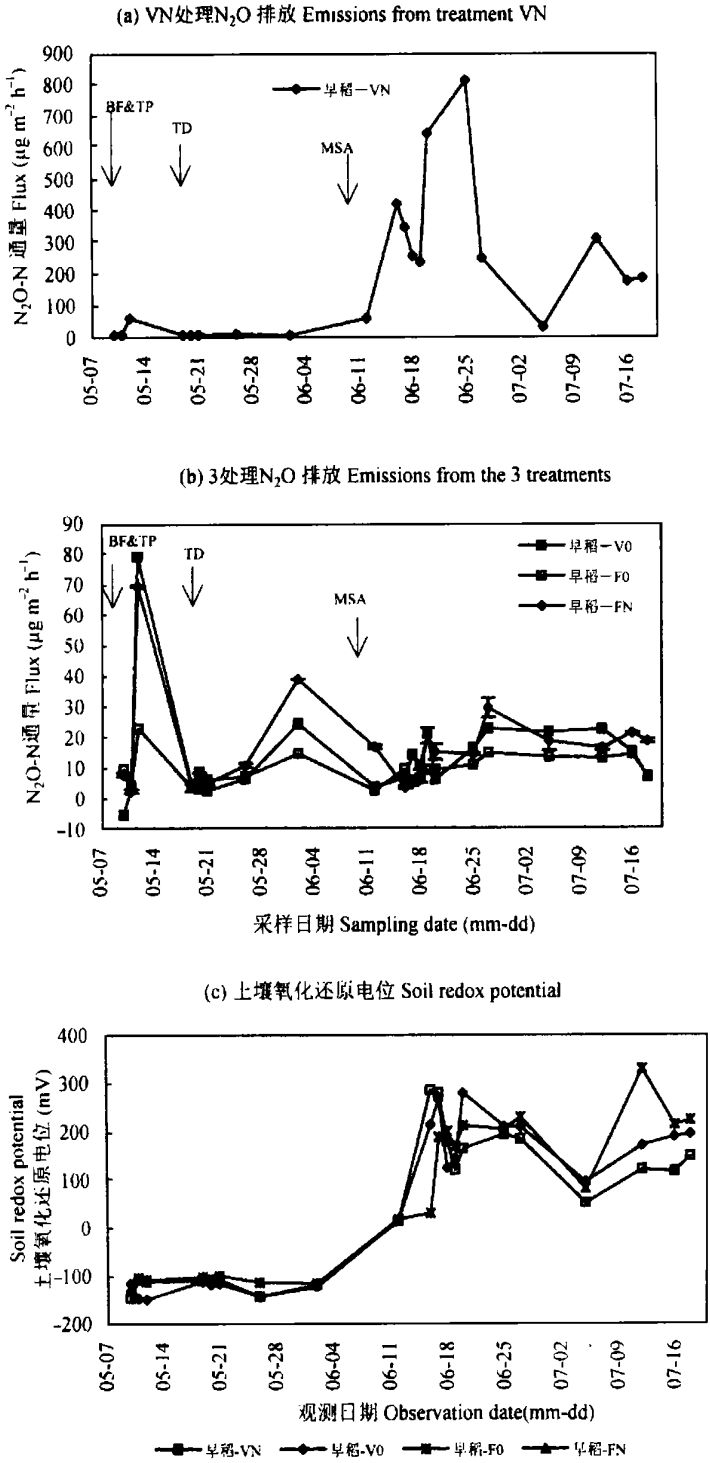
在早稻季节, 既施绿肥又施化肥的处理(VN) 稻田 N_2O-N 的排放通量平均为 164 μg m^{-2} h^{-1}, 季节排放量高达 2.75 kg hm^{-2}, 显著高于其它处理(表 1)。尤其是在中期烤田后, 其 N_2O 排放量陡增, 从 59.4 μg m^{-2} h^{-1}陡增到 422 μg m^{-2} h^{-1}, 继而高达 812 μg m^{-2} h^{-1}, 最后又降低, 至收获前排放通量为 186 μg m^{-2} h^{-1}(图 1a) 。与中期烤田之后土壤氧化还原电位一直维持在较高水平一致(图 1c) 。该处理 N_2O 的排放与土壤温度及土壤氧化还原电位均存在显著或极显著的正相关关系(表 2) , 但其空间变异性很大, 变异系数高达 137% , 平均为 59% 。

表 1　双季稻稻田 N_2O 的季节排放量

Table 1　Seasonal N_2O emissions during double-cropping rice growing season (1999~ 2000, Yingtan, Jiangxi)

作物季节 Crop season	处理 Treatment	排放通量 N_2O-N flux (μg m^{-2} h^{-1})	季节排放量 Seasonal N_2O-N emission (kg hm^{-2})	占施氮量的% % of N added
早稻	F0	10.6 Bb[2]	0.18 Bb	—
(70) [1]	FN	20.6 Bb	0.35 Bb	0.061
	V0	17.4 Bb	0.29 Bb	0.092
	VN	164 Aa	2.75 Aa	0.891
晚稻	F0	9.66 Bb	0.23 Bb	—
(98)	FN	11.9 Bb	0.28 Bb	0.019
	V0	10.9 Bb	0.26 Bb	—
	VN	14.2 Bb	0.34 Bb	0.028

1) 括号内数值为生长天数; 2) 同一列中数值后相同的大写/ 小写字母表示根据 Ducan' s 测验在 α= 0.01 或 α= 0.05 水平上差异不显著



BF: 基肥;TP: 移栽;TD: 追肥; MSA: 中期烤田。

图 1 早稻季节 (a) VN 处理 N_2O 的排放通量(b) 3处理 N_2O 的排放通量(c)土壤氧化还原电位

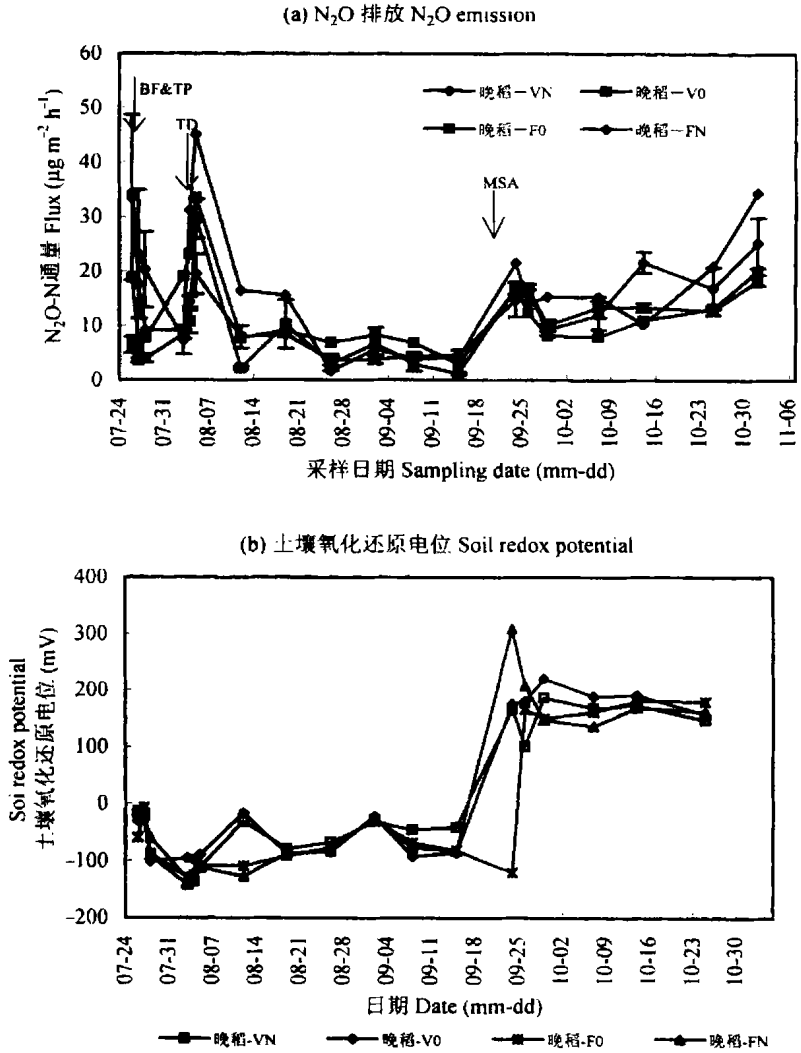
Fig 1 Temporal changes in (a) N_2O flux from treatment VN, (b) N_2O flux from the 3 treatments, and (c) soil redox potential during the early rice-growing season

表 2　N_2O 排放通量与土壤温度(T)、氧化还原电位(Eh)的相关系数

Table 2　Coefficients of correlation between N_2O flux and soil temperature (T) or soil redox potential (Eh)

作物季节 Crop season	相关项目 Items	处理 Treatment			
		VN	V0	F0	FN
早稻	N_2O 和 T	0.321 5*	0.094 8	0.417 3**	0.162 4
	N_2O 和 Eh	0.767 3**	−0.070 7	0.164 2	−0.004 9
晚稻	N_2O 和 Eh	−0.114 6	−0.121 2	0.379 3*	−0.046 2
	N_2O 和 T	0.011 0	0.084 7	−0.265 1	−0.159 2

* 和 ** 表示在 α = 0.05 和 0.01 水平上的相关性



BF: 基肥; TP: 移栽; TD: 追肥; MSA: 中期烤田。

图 2　晚稻季节(a) N_2O 的排放通量(b) 土壤氧化还原电位

Fig 2　Temporal changes in (a) N_2O flux and (b) soil redox potential during the late rice-growing season

为了便于比较这另外 3 个处理 N_2O 的排放, 将这 3 个处理另作图 1b。图 1b 表明, 只施化肥不施绿肥(FN) 和只施绿肥不施化肥(V0) 的处理 N_2O 的排放量要高于既不施绿肥也不施化肥(F0) 的处理, 在基肥施用后出现 N_2O 排放峰值, 其它时间排放量均较低, 这与基肥施用及刚从旱作变为水田条件有关。在整个生长季节均有少量的 N_2O 排放, 3 个处理平均排放通量分别为 20.6 $\mu g\ m^{-2}\ h^{-1}$、17.4 $\mu g\ m^{-2}\ h^{-1}$ 和 10.6 $\mu g\ m^{-2}\ h^{-1}$(表 1), 变异系数平均值分别为 21%、20% 和 22%。

2.2 晚稻季节稻田 N_2O 的排放

晚稻季节稻田 N_2O 的排放总体均低, VN、V0、FN 和 F0 4 处理排放通量平均值分别只有 14.2、10.9、11.9 和 9.66 $\mu g\ m^{-2}\ h^{-1}$, 基肥与追肥后均迅速出现排放峰值, 中期烤田之后的干湿循环有利于稻田 N_2O 的排放, 排放通量维持在较高水平, 直至收获(图 2a), 与中期烤田之后土壤氧化还原电位也维持在较高水平一致(图 2b)。

2.3 双季稻不同阶段稻田 N_2O 的排放

水稻基肥、追肥和中期烤田各阶段的划分分别为移栽施基肥起到追肥前一日、追肥起到中期烤田前一日、中期烤田到水稻收获止。各阶段 N_2O 排放量占整个生长季节排放量百分数的计算表明, VN 处理中, 92% 的 N_2O 在中期烤田之后排放出来, 其它处理中期烤田之后的排放量约为 50% 左右, 与该阶段时间占全生长期天数一半的比例接近(图 3)。这表明即使在淹水条件下的生长前期, 也有 N_2O 的排放。

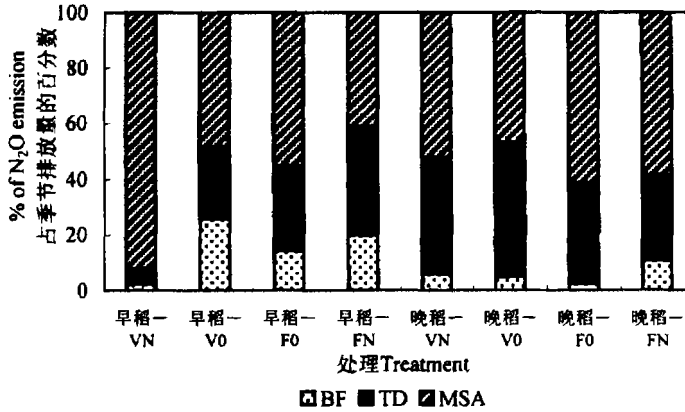


图 3 各处理不同阶段 N_2O 的排放占季节排放量的百分数

Fig. 3 Percentage of N_2O emission at different stages in seasonal accumulative emission in different treatments

2.4 绿肥与化肥对双季稻稻田 N_2O 排放的影响

对照处理 (F0) N_2O 的排放在早稻季节与温度呈极显著正相关, 在晚稻季节与土壤氧化还原电位显著正相关, 表明稻田土壤本底 N_2O 的排放主要来自土壤矿化作用。既施绿肥又施化肥的 VN 处理 N_2O 的排放则与土壤温度及土壤氧化还原电位均存在显著或极显著的正相关关系, 土壤温度越高, 氧化还原电位越高, N_2O 排放量越高(表 2)。

在早稻生长季节既施绿肥又施化肥的处理(VN) 稻田 N_2O 的排放量高达 2.75 $kg\ hm^{-2}$, 显著高于其它 3 个处理的排放量, 同时也显著高于晚稻季节各处理的排放量(表 1)。只施绿肥不施化肥(V0)、只施化肥不施绿肥(FN) 和既不施绿肥也不施化肥(F0) 的处理三者早稻季节排放量分别为 0.29、0.35 和 0.18 $kg\ hm^{-2}$; VN、V0、FN 和 F0 处理在晚稻季节排放量则分别为 0.34、0.26、0.28 和 0.23 $kg\ hm^{-2}$。早稻季节既施绿肥又施化肥处理 N_2O 排放量显著增加, 表明绿肥与化肥间对 N_2O 的排放存在显著的交互效应(表 3)。

表 3　绿肥与化肥 N 对稻田 N_2O 季节排放量的影响[1)]

Table 3　Effects of N sources on seasonal N_2O emission from paddy field (kg hm^{-2})

作物季节 Crop season	因子 Factor	不施 N 肥 No N fertilizer	施 N 肥 N fertilization	平均 Average
早稻	不施绿肥	0.18 Bb	0.35 Bb	0.26 a
	施绿肥	0.29 Bb	2.75 Aa	1.52 a
	平均	0.24 a	1.55 a	
晚稻	不施绿肥	0.23 a	0.28 a	0.25 b
	施绿肥	0.26 a	0.33 a	0.30 a
	平均	0.24 B	0.31 A	

1) 平均一栏为一因素在另一因素所有水平下的平均, 其后的大写/ 小写字母表示双因素在各水平下的平均值在同一作物季节内的显著性比较结果。表内其它值及其后的大写/ 小写字母表示各处理平均值及其交互效应在同一作物季节内的多重比较结果

3　讨　论

本试验结果表明, 绿肥的施用影响了稻田 N_2O 排放的时间模式。既施绿肥又施化肥的处理 92% 的 N_2O 集中在中期烤田之后水分干湿交替阶段释放(图 3) 。这与前人研究结果一致, 认为水分状况极大地制约着稻田 N_2O 的排放, 水田 N_2O 的排放主要集中在水稻收获后的未淹水阶段[5] 以及水稻生长期间水分干湿交替过程中[6] 。然而, 其它处理在淹水条件下的水稻生长前期也存在相对较高的 N_2O 排放, 表明稻田即使在淹水状态下仍有大量的 N_2O 排放到大气中, 这与实行水旱轮作制度以及收获前落水排干的水分管理方式有关, 同时也与本试验施肥量偏高有关。因此, 本研究再次证实水旱轮作制度下稻田是 N_2O 排放不可忽视的源[4], N_2O 排放不仅发生在没有水层存在的情况下, 也发生在有水层存在的情况下。这与多数国外学者认为淹水状况下稻田 N_2O 的排放量很低的结论不同[3] 。

绿肥的施用不仅影响了稻田 N_2O 排放的时间模式, 还极大地影响着稻田 N_2O 的总排放量。既施绿肥又施化肥的处理在早稻生长季节 N_2O 的排放量显著高于其它处理, 约是其它处理的 10 倍之多; 绿肥与化肥间的交互效应也达到极显著水平(表 3) 。到了晚稻季节, 绿肥与化肥各自的效应均达到显著水平或极显著水平, 不论是绿肥还是化肥都能显著促进晚稻生长季节稻田 N_2O 的排放; 但绿肥与化肥间无明显的的交互效应(表 3) 。因此, 豆科绿肥在稻田土壤条件下能同时满足土壤微生物反应底物和能量的需要, 从而促进了土壤反硝化作用的进行, 对稻田土壤 N_2O 的排放有极大的促进效应, 为豆科绿肥在稻田施用后对 N_2O 排放的影响提供了试验数据。这与前人对豆科绿肥在旱地以及实验室培养条件下的研究结果一致[10~12] 。

本试验还表明豆科绿肥易于矿化分解, 作为绿肥施用后, 能在早稻季节迅速矿化分解, 供早稻生长所需, 从而可降低化学氮肥的施用量, 减少稻田 N_2O 的排放。绿肥与化肥之间还存在显著的交互效应, 因此关于绿肥与化肥氮的配合比例及施用水平尚需深入研究, 以达到既不增加温室气体 N_2O 的排放, 同时也不减少水稻产量的双重目标, 确保我国农业及环境的可持续发展。

参考文献

1. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change/ Organization for Economic Cooperation and Development) . Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Paris: OECD/ OCDE, 1996
2. Duxdury J M. The significance of agricultural sources of greenhouse gases. Fert. Res. , 1994, 38: 151~ 163
3. Freney J R. Emission of nitrous oxide from soils used for agriculture. Nutr. Cycl. Agroecosyst. , 1997, 49: 1~ 6
4. Xing G X. N_2O emission from cropland in China. Nutr. Cycl. Agroecosyst. , 1998, 52: 249~ 254
5. Cai Z C, Xing G X, Shen G Y. Measurements of CH_4 and N_2O emissions from rice paddies in Fengqiu, China. Soil Sci. Plant Nutr. , 1999, 45 (1): 1~ 13

6. Zheng X, Wang M, Wang Y, *et al*. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands: A case study on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China. Chemosphere-Global Change Science, 2000, (2): 207~224
7. 李庆逵. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992. 108~125, 474~490
8. 李庆逵, 朱兆良, 于天仁主编. 中国农业持续发展中的肥料问题. 南昌: 江西科学技术出版社, 1998. 112~119
9. Mosier A, Kroeze C, Nevison C. Closing the global N_2O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle: OECD/IPCC/IEA phase II development of IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory methodology. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 1998, 52: 225~248
10. Aulakh M S, Doran J W, Waiters D T. Crop residue type and placement effects on denitrification and mineralization. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55: 1 020~1 025
11. McKenney D J, Wang S W, Drury C F. Denitrification and mineralization in soil amended with legume, grass, and corn residues. Soil Sci. Soc. Am. J., 1993, 57: 1 013~1 020
12. Aulakh M S, Khera T S, Doran J W. Denitrification, N_2O and CO_2 fluxes in rice-wheat cropping system as affected by crop residues, fertilizer N and legume manure. Biol. Fertil. Soils, 2001, 34: 375~389
13. 徐华, 邢光熹, 张汉辉. 太湖地区水田土壤 N_2O 排放通量及其影响因素. 土壤学报, 1995, 32(增刊): 144~150

NITROUS OXIDE EMISSIONS FROM PADDY SOILS AS AFFECTED BY INCORPORATION OF LEGUMINOUS GREEN MANURE AND FERTILIZATION DURING DOUBLE-CROPPING RICE-GROWING SEASON

Xiong Zheng-qin[1] Xing Guang-xi[1] Tsuruta H[2] Shi Shu-lian[1] Shen Guang-yu[1] Du Li-juan[1]

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tsukuba 305, Japan)

Summary

A field study was conducted to investigate effects of leguminous green manure and chemical fertilizer N on nitrous oxide (N_2O) emissions from paddy soils under double-crop rice systems. Results demonstrated that during the early rice growing season, the treatment that received both green manure and synthesized N fertilizer emitted significantly more N_2O than the other three treatments did, which received only green manure (V0), only synthesized N fertilizer (FN), or neither green manure nor chemical N fertilizer (F0), separately. The seasonal accumulative N_2O-N emission was 2.75 kg hm^{-2} with the former, and 0.29 kg hm^{-2}, 0.35 kg hm^{-2} and 0.18 kg hm^{-2}, respectively with the other three. During the late rice growing season, 0.34, 0.26, 0.28 and 0.23 kg hm^{-2} was emitted from those four treatments respectively, all much lower than that from Treatment VN during the early rice growing season. Besides its effect on N_2O emission rate, the incorporation of green manure also affected N_2O emission time pattern. In Treatment VN, N_2O evolution was concentrated mainly after the mid-summer drainage during the early rice growing season, while in the other three treatment the N_2O emission was distributed evenly throughout the entire rice growing season. The results also indicated that there existed great interaction between green manure and chemical N fertilizer during the early rice growing season.

Key words N_2O emission, Paddy soil, Double-cropping rice, Leguminous green manure