

环境因素和作物生长对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响

蒋静艳¹, 黄 耀^{1,2}, 宗良纲¹

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要: 采用大田试验方法, 研究了常规灌溉和持续淹水条件以及不同水平有机质(小麦秸秆)投放量(0、2.25、4.5 t·hm⁻²)条件下各环境因素(包括土壤温度、灌溉水层深度和土壤 Eh)对 CH₄ 和 N₂O 排放的影响以及水稻生长与 CH₄ 排放的关系。结果表明, 在 2 种水分管理下, CH₄ 的累积排放量均与水稻冠层高度呈显著正相关($P < 0.001$)。连续淹水条件下, 无论有无外源有机质投放, 稻田 CH₄ 排放的季节性变化均与土壤温度呈指数相关($P < 0.001$), 而 N₂O 排放的季节性变化则仅取决于土壤水分条件。

关键词: CH₄ 和 N₂O 排放; 烤田; 持续淹水; 有机质施用; 土壤温度; 水稻冠层高度

中图分类号: S131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672–2043(2003)06–0711–04

Influence of Environmental Factors and Crop – Growing on Emissions of CH₄ and N₂O from Rice Paddy

JIANG Jing-yan¹, HUANG Yao^{1,2}, ZONG Liang-gang¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. Institute of Atmospheric Physics, Beijing 100029, China)

Abstract: To investigate impact of environmental factors and crop – growing on CH₄ and N₂O emissions, a field experiment with different levels of organic matter application under conditions of normal irrigation and permanent flooding was performed at a county of Jiangning near Nanjing during 2000 rice – growing season. Field measurements in rice – growing season showed that under two water regimes the accumulative CH₄ emission was positively related to rice canopy height ($P < 0.001$); The seasonal variation of CH₄ emissions from permanent flooding plots were mostly depended on soil temperature. Further analysis of methane fluxes against soil temperature demonstrated that the seasonal courses of methane emissions under 0, 2.25 and 4.5 t·hm⁻² levels of organic matter application in Nanjing were mainly attributed to soil temperature changes, which can be quantitatively described by three exponential functions ($P < 0.001$), respectively. In contrast, N₂O emission was only dependent on soil moisture changes.

Keywords: CH₄ and N₂O emission; drainage; permanent flooding; organic matter application; soil temperature; rice canopy height

气候变暖是当今全球性的环境问题,其主要原因是大气中温室气体浓度的不断增加。CH₄ 与 N₂O 是大气中两种主要的痕量温室气体,以摩尔当量计其温室效应分别是 CO₂ 的 15~30 倍和 150~200 倍^[1]。农田是大气 CH₄ 和 N₂O 的重要来源。农田 CH₄ 和 N₂O 的排放是土壤—作物系统中 CH₄ 和 N₂O 产生和传输

过程的综合结果,影响这些过程的因素包括土壤特性(理化性质和水热条件)、气候条件(温度、降水和光照)和农业技术措施(肥水管理、作物类型)等^[2,3]。农业管理措施被普遍认为是调控农田土壤 CH₄ 和 N₂O 排放的重要手段,尤其在中国,烤田和秸秆还田是比较盛行的农业措施。为此,本试验通过监测南京稻麦轮作地区在不同的农业管理措施(如水分管理、不同水平的有机质施用等)条件下稻田 CH₄ 与 N₂O 的排放量,并同步监测各环境影响因子(如土壤温度、土壤 Eh 以及水稻冠层高度等),试图阐明影响稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的主要因素,为提出合理的减排措施提供科学依据。

收稿日期: 2003–01–19

基金项目: 中国科学院大气物理所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室(LAPC)开放课题(LAPC–KF–2002–04);中国科学院“百人计划”项目

作者简介: 蒋静艳(1972—),女,讲师,硕士。

E–mail: lilacjy@hotmail.com

1 材料与方法

大田试验于 2000 年水稻生长季实施, 试验区设在江苏省南京市江宁县秣陵镇 (31°51'47"N, 118°49'85"E), 土壤为潜育型水稻土, 耕层土壤质地为粘壤, 粘粒含量为 49%。土壤 pH(H₂O) 为 6.7, 有机碳、全氮(N)、全磷(P₂O₅) 和速效钾(K₂O) 的含量分别为 19.4 g·kg⁻¹、1.9 g·kg⁻¹、1.3 g·kg⁻¹ 和 102 mg·kg⁻¹。2000 年水稻生长季内 (2000-06-29—10-20) 平均温度为 25.7℃, 降水总量为 428.7 mm。

供试水稻品种为粳稻 9516, 供试有机质为小麦秸秆。试验设水分与秸秆还田二因子正交处理。水分管理为连续淹水灌溉与当地常规灌溉——干湿交替, 在本文中分别以 F 和 D 代表; 秸秆还田设 3 种水平即不还田 (仅留 10 cm 左右残茬)、50% 秸秆直接还田 (约 2.25 t·hm⁻²)、100% 秸秆直接还田 (约 4.5 t·hm⁻²), 在本文中分别以 0、1、2 代表 3 种秸秆还田水平。

供试田块泡田时间为 5 月 24 日, 水稻生长季田间管理记载见表 1。整个生育期施肥总量约为 276.6 kgN·hm⁻², 无有机肥施加。

表 1 水稻生长季试验田间管理	
Table 1 Field log of CH ₄ and N ₂ O emissions from the rice field	
日期(月-日)	生育期及农事活动
05-30	播种
06-28	基肥施用: 121.3 kg N·hm ⁻² , 占全生育期 44%
	移栽: 常规灌溉区 28.5 万穴·hm ⁻² ; 连续灌溉区 24 万穴·hm ⁻² , 每穴 4~5 苗。采样箱框架内栽植 9 穴, 每穴 5 苗。
06-29	
07-14	分蘖肥: 69 kg N·hm ⁻² , 占全生育期 25%
07-29	常规灌溉区烤田开始
08-03	促花肥: 51.8 kg N·hm ⁻² , 占全生育期 19%
08-08	烤田结束, 复水
08-10	保花肥: 34.5 kg N·hm ⁻² , 占全生育期 12%
09-03	抽穗
10-15	持续淹水区落干
10-22	成熟, 采样箱框架内水稻收获

大田 CH₄ 和 N₂O 样品的采集使用不锈钢静态封闭箱, 横截面积为 0.5 m×0.5 m, 箱体高度随作物高度而增加。水稻自移栽后第 7 d 起, 每周采样两次, 各处理设两个采样重复。烤田期间每天 1 次。各采样点每次采样 5 个, 每个间隔 5 min, 样品量为 60 mL。样品的 CH₄ 和 N₂O 混合比用日本产气相色谱仪 (Shimadza, GC-14A) 检测, 通过对每组 5 个样品的 CH₄ 和 N₂O 浓度与相对应的采样间隔时间 (0、5、10、

15、20 min) 进行直线回归, 可求得该采样点的 CH₄ 和 N₂O 排放速率。继而根据大气压力、气温、普适气体常数、采样箱的有效高度、CH₄ 和 N₂O 分子量等, 求得单位面积的排放量。同时观测灌溉水深度、8 cm 深度土壤氧化还原电位 (用便携式 Eh 计测定)、10 cm 深度土壤温度 (用 Temp Log 自动记载)、水稻生育期 (播种期、出苗期、移栽期、抽穗期、成熟期) 以及水稻植株生物量 (烘干称重法) 和群体叶面积 (用 LAI-2000 作物冠层分析仪测定)。在收获时, 进行常规考种和计产并分析各采样框内的土壤理化性质。

2 结果与讨论

2.1 环境因素对稻田 CH₄ 排放的影响

稻田 CH₄ 的产生主要是 CO₂/H₂ 及乙酸 (CH₃COO⁻) 等基质在极端厌氧的条件下 (Eh ≤ -200 mV), 被产甲烷菌利用还原生成的^[4]。从理论上来说, 温度影响有机物的分解和产甲烷菌的数量及活性, 进而影响甲烷的排放。设置连续淹水处理的目的之一就是为研究温度对 CH₄ 排放的影响。因为烤田改变了厌氧环境严重抑制 CH₄ 的排放, 使得温度不是影响烤田处理 CH₄ 排放季节变化的主要因子。

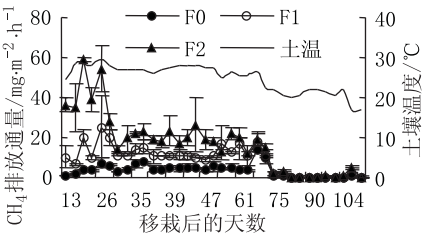


图 1 连续淹水处理 CH₄ 排放通量和土壤温度的季节变化
Figure 1 Seasonal trends of CH₄ emission and soil temperature under flooding condition

图 1 给出了连续淹水处理 CH₄ 排放通量和 10 cm 深度土壤温度随时间变化的趋势, 可以看出二者变化趋势基本吻合。假定温度对连续淹水处理 CH₄ 排放通量的影响可用温度系数 (Q₁₀) 来定量描述, 则 CH₄ 排放通量与温度之间的非线性关系可用下式表达:

$$F_T = F_{10} \times Q_{10}^{(T-10)/10}$$

上式中 F_T 和 F₁₀ 分别代表土壤温度为 T 和 10℃ 时 CH₄ 的排放通量 (mg·m⁻²·h⁻¹)。根据南京江宁地区 CH₄ 排放通量和土壤温度的测定值, 用非线性方法确定上述公式中的参数 F₁₀ 和 Q₁₀^[5]。F₀、F₁ 和 F₂ 处理的 F₁₀ 值分别为 0.350、0.386 和 0.072 mg·m⁻²·h⁻¹; Q₁₀ 值分别为 4.6、7.5 和 28.7 (见图 2)。从上述数字可知施加有机质越多的处理, 其 Q₁₀ 值越大,

也就是说土壤温度对 CH_4 排放通量的影响越大。可能的原因是施加有机质越多的处理, 基质供应充足, 产甲烷菌活性主要受土壤温度变化的控制。

另外, 图 2 同时也反映了不同处理拟合曲线与田

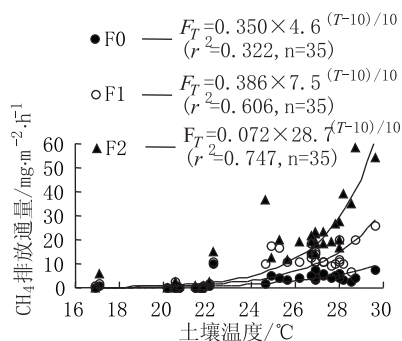


图 2 连续淹水处理 CH_4 排放通量与土壤温度的关系

Figure 2 Relationship between CH_4 emission and soil temperature under flooding condition

间实测值的符合程度, F_0 、 F_1 和 F_2 的拟合曲线方程的 r^2 分别为 0.322、0.606 和 0.747 ($P < 0.001$), 说明温度严重影响南京地区稻田 CH_4 的排放。水稻田产甲烷菌的最适温度范围为 $30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6]。从理论上来说, 当温度低于最适温度时, 产甲烷微生物的活性随土壤温度的升高而提高。南京地区气候温度变化范围比较大, 导致土壤温度波动范围也很大, 整个 2000 年水稻生长季土壤温度最高为 $29.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最低为 $16.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度跨度为 $12.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。所以温度是南京地区连续淹水稻田 CH_4 的季节排放的主要影响因素之一。

对烤田和连续淹水处理 CH_4 排放通量与土壤 Eh 的变化趋势分析表明, 各处理均未发现它们之间的相关性。可能的原因是田间测定 Eh 存在一定的时空差异, 需要足够的重复试验, 才具有一定的代表性。

2.2 CH_4 累积排放总量与水稻冠层高度的同步增长关系

分别对持续淹水小区 CH_4 排放累积量和水稻冠层高度进行一元线性回归分析, 得出 CH_4 累积排放量无论有无有机质的加入皆与水稻植株的冠层高度 (水稻冠层高度 $> 30\text{ cm}$) 呈显著线性相关 (图 3)。 F_0 、 F_1 和 F_2 处理的 r^2 分别为 0.975 0、0.994 8 和 0.970 2 ($P < 0.001$)。可能的解释是植株高度代表了一定植物的生理活动和产甲烷基质的水平。

从图 3 还可以看出施加有机质越多的处理其趋势线的斜率 k 越大, 即单位水稻冠层高度 CH_4 排放量越大。如果进一步分析可见 k 值与有机质的施加量 (OM) 成正比, 假定用下式来表达: $k = B_1 + B_2 \times OM$

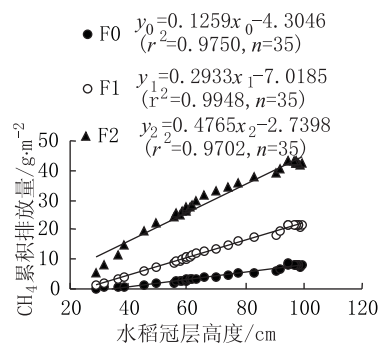


图 3 连续淹水条件下 CH_4 累积排放量与水稻冠层高度的关系

Figure 3 Relationship between accumulative CH_4 emission and rice canopy height under flooding condition

(B_1 和 B_2 为参数), 这样 CH_4 累积排放量 ($\sum \text{CH}_4$) 可由水稻冠层高度 (h) 及外源有机质 (OM) 来定量描述, 即设

$$\sum \text{CH}_4 = B_0 + (B_1 + B_2 \times OM) \times h (h > 30\text{ cm})$$

这里 B_0 、 B_1 和 B_2 为未知参数, 可用统计软件 [5] 根据田间实测的水稻冠层高度和外源有机质的施加量及 CH_4 累积排放量来确定其值。经用非线性方法进行估算, B_0 、 B_1 和 B_2 分别为 -4.683 、 0.113 和 0.082 , 该方程的 r^2 为 0.972 ($P < 0.001$, $n = 105$)。丁爱菊等在美国观测到不同水稻品种 CH_4 排放的季节累积总量与各自齐穗后的冠层高度有很好的线性关系 [7], 为将来能否利用卫星图像进行 CH_4 地区性或全球性估测提供了一定的依据。本试验的结果更进一步肯定遥感估测稻田 CH_4 排放的可能性。至于不同的水稻品种和土壤类型是否也有相似的规律, 还有待更进一步的研究。

有研究表明, 在土壤条件一致的情况下, 同一品种水稻的生物产量和经济产量越高, 稻田甲烷的排放也高 [8]。分析本试验的考种数据显示, 各小区采样框内水稻的生物产量和经济产量无显著差别, 平均经济产量为 $695.1\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 变异系数为 5.9%; 平均秸秆产量为 $828.2\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 变异系数为 13.3%。说明上述处理 CH_4 排放的差异不是因水稻生物产量和经济产量的差异引起的。

2.3 环境因素对稻田 N_2O 排放的影响

水稻生长季内, 田间水分状况是决定 N_2O 季节变化的主要因素。从图 4 可以看出, 在水稻移栽时直至烤田前, 淹水阶段几乎检测不到 N_2O 的排放。但在排水晒田期 (即移栽后 33 ~ 43 d 内) 却引起 N_2O 排放的显著增加, 其持续的时间和强度决定于烤田的时间和强度, 恢复灌水后, N_2O 排放立即降低至零。在移栽后

85 d 左右停止灌水后, N₂O 排放一直处在较低的水平,主要是田间水分管理和降雨的影响。在该时期总降雨量为 191.7 mm, 日平均为 6.4 mm, 主要集中在水稻移栽后 88 至 96 d。水稻移栽后 101 ~ 111 d 又一直处于阴雨连绵天气, 因排水不畅田间稻田几乎一直处于淹水状态, 如水稻移栽后 97 d 土壤水层深达 73 mm, 所以几乎未观测到 N₂O 的排放。

农田 N₂O 主要产生于土壤微生物硝化和反硝化

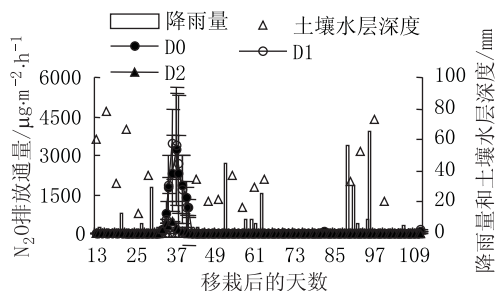


图 4 烤田处理 N₂O 的排放与降雨、土壤水层深度变化

Figure 4 Seasonal variations of N₂O emission, precipitation and water depth of paddy soil under drainage events

过程, 温度不但影响 N₂O 产生的生物学过程, 还影响土壤中 N₂O 的传输速率, 因此从理论上来说, 温度是影响 N₂O 产生和排放的一个重要因素。但大田观测结果表明, N₂O 排放的季节性变化与土壤温度的关系不明显。在水稻整个生育期内, 10 cm 土层温度在 15 °C ~ 30 °C 之间, 这一温度变化期间皆适宜硝化和反硝化作用发生。但 N₂O 的排放只发生在排水晒田时, 因而进一步说明影响稻田 N₂O 的排放的主要因素是土壤水分, 这与郑循华^[9]的报道一致。

3 小结

稻田试验结果表明, 在南京江宁地区水稻生长季连续淹水条件下, 不同水平有机质处理稻田 CH₄ 排放通量与土壤温度呈指数相关, 且有机质施用越多其 CH₄ 排放通量的季节变化越取决于土壤温度的变化; CH₄ 的累积排放量与水稻的冠层高度显著线性正相关。相对 CH₄ 而言, 稻田 N₂O 的排放仅取决于土壤水分的控制。

参考文献:

- [1] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. *Science*, 1990, 248: 1217 - 1219.
- [2] Neue H - U. Methane Emission from Rice Fields[J]. *Bioscience*, 1993, 43(7): 466 - 474.
- [3] 蒋静艳, 黄 耀. 农业土壤 N₂O 排放的研究进展[J]. *农业环境保护*, 2001, 20(1): 51 - 54.
- [4] Takai Y. The mechanism of methane formation in flooded paddy soil[J]. *Soil Sci and Plant Nutr*, 1970, 16: 238 - 244.
- [5] Systat. Statistics. SYSTAT Inc. 2000. 313 - 323.
- [6] 陈美慈, 闵 航, 钱泽澍. 水稻田优势产甲烷细菌的分离和特性[J]. *浙江农业大学学报*, 1992, 18(3): 79 - 84.
- [7] Ding A J, Willis C R, Sass R L, et al. Methane emissions from rice fields: Effect of plant height among several rice cultivars[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 1045 - 1052.
- [8] Huang Yao, Sass R L and Fisher F M. Methane emission from Texas rice paddy soils. 2. Seasonal contribution of rice biomass production to CH₄ emission[J]. *Global Change Biology*, 1997, 3: 491 - 500.
- [9] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. *环境科学*, 1997, 18(5): 1 - 5.