

氮肥水平对不同土壤 CH₄ 排放的影响

焦燕¹, 黄耀^{2,3}, 宗良纲², 周权锁², Ronald L. Sass⁴

(1. 内蒙古师范大学化学与环境科学学院, 呼和浩特 010022; 2. 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095; 3. 中国科学院大气物理研究所 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 4. 美国莱斯大学生态与进化生物学系, 德克萨斯 77005-1892)

摘要: 鉴于氮肥施用对农田 CH₄ 排放的影响还有很大不确定性, 室外盆栽试验于 2002 年在南京农业大学实施. 选取 3 个供试土壤, 各土壤设置对照和低、中、高 3 个不同氮肥水平, 施入尿素量分别为 0 g/盆钵 (对照), 0.64g/盆钵 (低氮水平), 1.28 g/盆钵 (中氮水平), 1.93 g/盆钵 (高氮水平). 结果表明在水稻生长季, 不同氮肥 (尿素) 施用量对稻田土壤 CH₄ 排放影响表现为不同土壤之间, 及不同氮肥水平之间 CH₄ 排放均存在显著差异. 无氮肥施入的情况下, 3 种土壤的 CH₄ 季节性累积排放量存在显著差异, 分别为 6.7 g/m², 12.6 g/m² 和 8.3 g/m². 施加氮肥后, 3 种土壤的 CH₄ 排放量随氮肥施入量的增加, 均表现为降低趋势, 不同土壤 CH₄ 排放量存在差异, 土壤背景氮含量最高的 F (江苏溧水) 土壤的 CH₄ 排放都比相应氮肥水平下的 G (江苏涟水) 和 H (江苏农科院) 土壤的 CH₄ 排放低 1 倍左右. 更进一步发现从低氮到中氮水平, 3 种土壤 CH₄ 排放量随氮肥用量的增加降低幅度最大, 而此时各土壤的 NH₄⁺-N 含量随氮肥用量增加明显提高, 推断造成 CH₄ 排放降低的主要可能原因是各土壤的氨态氮含量的增加所致. 从中氮到高氮水平 3 种土壤的 CH₄ 排放量的变化不尽相同, G 和 H 土壤的 CH₄ 排放量随氮肥用量的增加而降低, 而 F 土壤在中氮和高氮水平下的 CH₄ 排放量没有明显变化, 值分别为 3.0 g/m² 和 3.4 g/m².

关键词: CH₄ 排放; 氮肥; 稻田; 盆栽试验

中图分类号: X132 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)03-0021-04

Impact of Different Levels of Nitrogen Fertilizer on CH₄ Emission from Different Paddy Soils

JIAO Yan¹, HUANG Yao^{2,3}, ZONG Liang-gang², ZHOU Quan-suo², Ronald L. Sass⁴

(1. College of Chemistry and Environmental Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. LAPC, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China; 4. Department of Ecology and Evolutionary Biology, Rice University, Houston, TX 77005-1892, USA)

Abstract: To investigate the effect of different urea incorporation amount in different soils on CH₄ emission, a pot experiment was carried in 2002. Four treatments were designed as the control (without urea incorporation); low N fertilizer level (0.64g urea/pot); middle N fertilizer level (1.28g urea/pot); high N fertilizer level (1.93g urea/pot). During rice growing season, incorporation of urea into different soils yielded different influence on CH₄ emission. Without urea incorporation, significance differences existed among CH₄ emission flux of three soils, with the values of 6.7 g/m², 12.6 g/m² and 8.3 g/m², respectively. Incorporation of urea reduced considerably CH₄ emission of three soils. A further investigation indicate that CH₄ emission of three soils largely decreased and three soils NH₄⁺-N content obviously increased from low N fertilizer level to middle N fertilizer level. It concluded that soil NH₄⁺-N content is a key influence factor on CH₄ emission after incorporation of urea into soils. From middle N level to high N level, CH₄ emission of soil G (Lianshui, Jiangsu) and H (Jiangsu Academy of agricultural sciences) reduced, while CH₄ emission of soil F (Lishui, Jiangsu) had no obvious significance with the value of 3.0 g/m² and 3.4 g/m².

Key words: CH₄ emission; N fertilizer; rice paddy soils; pot experiment

CH₄ 是仅次于 CO₂ 的重要温室气体之一. 根据 CH₄ 的单位分子增温潜能、大气残留时间及它在大气中的浓度计算, 它对全球变暖的贡献为 19 %^[1]. 水稻田被认为是大气 CH₄ 的一个重要来源. 据估计, 在各种人为的 CH₄ 排放源中, 稻田 CH₄ 的排放量约占总排放量的 10 % ~ 30 %^[2]. 化学氮肥、有机肥施用对稻田 CH₄ 排放的影响已有较多研

究^[3-10], 它们对稻田 CH₄ 排放的影响主要依赖于肥料类型、施用量和施用方式^[5]. 各类化肥对稻田 CH₄ 排放的影响机理还存在很大争议, 其中关于施

收稿日期: 2004-05-26; 修订日期: 2004-09-13

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (G199011850); 美国航天航空总署 TECO/NASA 资助项目

作者简介: 焦燕 (1977 ~), 女, 博士, 主要研究方向农田温室气体与全球变化.

尿素对农田 CH₄ 排放的影响不确定性表现在诸如, 尿素是水稻种植上最常用的氮肥, 目前关于尿素对 CH₄ 排放的影响观点不一: ①稻田甲烷排放量随尿素用量增加而增加^[3]; ②尿素对甲烷排放无影响^[4]; ③施用尿素后甲烷排放通量下降^[5,6]. 中国水稻产量占世界的 38.0 %^[11], 研究氮肥施入对水稻田 CH₄ 排放的影响, 对于准确估算和减少温室气体排放具有重要意义. 同时已有研究表明在类似的气候条件和农业管理措施下, 不同土壤由于其不同的理化特性对稻田 CH₄ 排放的影响不同^[12]; 培养实验研究也表明不同土壤影响 CH₄ 排放的土壤因素不同^[13], 但不同氮肥用量施入到不同土壤在类似的气候条件和农业管理措施下会对稻田 CH₄ 排放产生何种影响还鲜有研究. 鉴于此, 本研究在同一农业管理措施和基本相同的气候条件下, 在 3 种不同土壤下设置几种不同氮肥水平, 并结合考虑土壤的特性, 通过盆栽试验试图探讨外源氮输入对稻田 CH₄ 排放的影响.

1 材料与方法

1.1 供试土壤与测定项目

3 个供试土壤分别于 2001 年采自江苏溧水县柘塘镇乌山新春、江苏涟水洪泽县高涧镇王庄村及江苏农科院试验农场境内的水稻土耕作层. 土壤样品代码分别为 F、G 和 H. 按照中国土壤学会出版的土壤农业化学分析方法分别测定土壤质地、pH 值、

有机碳、全氮、硝态氮、铵态氮, 测定结果见表 1. 鉴于笔者以往研究^[12]发现土壤氨态氮含量是影响 CH₄ 的关键因素, 本研究试图探讨氨态氮含量在氮肥用量增加的情况下对不同土壤甲烷排放的影响, 于 2002-09-01 (最后一次追肥一周后) 测定各个土壤不同氮肥水平下的氨态氮含量.

1.2 盆栽试验与农业管理

室外盆栽试验于 2002 年在南京农业大学实施. 盆钵用紫砂泥烧制而成, 钵高和内圆直径均为 20 cm 左右, 盆钵上口有 1.5 cm 深的凹型槽用以在采样时注水与采样箱密封. 每盆装供试土壤 4 kg (风干土) 左右. 为使盆钵土壤的温度与大田土壤温度一致并减小盆钵间的温度差异, 盆钵的 4/5 高度埋入土壤. 试验选取 3 个土壤, 各供试土壤设对照和低、中、高 3 个不同氮肥水平, 各处理 3 个重复. 整个水稻生长季设置的低、中、高氮肥水平的施尿素量为 1.28 g/盆钵; 2.58 g/盆钵; 3.86 g/盆钵. 供试水稻品种为粳稻 9516, 移栽期为 06-21, 每盆移栽 8 株. 水稻的抽穗期和收获期分别为 09-01 和 10-19. 水分管理为常规农业管理措施, 07-20 ~ 07-23 进行烤田, 整个生育期施肥 3 次, 基肥于移栽前施入, 所施用尿素量分别为 0 g/盆钵 (对照); 0.64 g/盆钵 (低氮水平); 1.28 g/盆钵 (中氮水平); 1.93 g/盆钵 (高氮水平), 每盆施 KH₂PO₄ 0.76 g、K₂SO₄ 0.89 g, N: P₂O₅: K₂O 为 0.15: 0.10: 0.15, 另 2 次追肥分别在 07-20 和 08-24, 施肥量为基肥的 1/2.

表 1 供试土壤理化特性/ mg·kg⁻¹

Table 1 Physico-chemical properties of air-dried soil sample/ mg·kg⁻¹

土壤代码	采样地	粘粒 < 0.002 mm / %	砂粒 > 0.02 mm / %	总有机碳	总氮	C/ N	pH	氨态氮	硝态氮
F	溧水	30.3	21.9	1.28	0.14	9.14	5.90	13.70	7.23
G	涟水	23.0	31.1	0.93	0.11	8.45	5.20	11.95	1.43
H	江苏农科院	24.2	30.8	0.75	0.09	8.33	6.00	11.91	5.37

1.3 采样与分析

气体样品采集采用封闭箱法, 采样箱为圆筒型, 用 PVC 材料制成, 高 1 m, 箱体直径与盆钵凹型槽直径一致. 采样箱外侧先包有一层约 5 cm 厚的海绵, 然后覆盖一层铝箔以减小采样期间由于太阳辐射引起的箱内温度变化. 气体样品用带有开关的针筒采集, 采样时间为上午 08:30 到 11:00, 每周 1 次. 各盆钵每次采样 3 个, 时间间隔为 10 min, 样品量为 50 mL. 样品的 CH₄ 混合比用气相色谱仪 (HP4890) 检测. 通过对每组 3 个样品的 CH₄ 混合比与相对应的采样间隔时间 (0.10, 20 min) 进行直线回归, 可求

得该盆钵土壤的 CH₄ 排放速率. 继而根据大气压力、气温、普适气体常数、采样箱的有效高度和 CH₄ 分子量等, 求得单位面积 CH₄ 排放通量.

2 结果与讨论

2.1 稻田 CH₄ 排放通量的季节变化

由图 1 看到不同土壤 CH₄ 排放季节变化模式不同: F 土壤的对照和 3 种肥料水平的 CH₄ 排放在整个生育期只出现 1 个排放高峰, 而 G 和 H 土壤出现 2 个 CH₄ 排放峰, 不同土壤 CH₄ 排放季节变化模式不同, 这与笔者 2000 年研究结果一致^[12]. 具体从

整体趋势看 H 土壤在水稻成熟期段 CH_4 排放量相对较高,G 土壤抽穗期 CH_4 排放相对较高.同时从图 1 也可发现,3 种土壤在对照和 3 种不同肥料水

平下排放量都存在差异.整个水稻生育期内,3 种土壤高氮水平下的 CH_4 排放量与其各自低氮和中氮水平相比都较低.

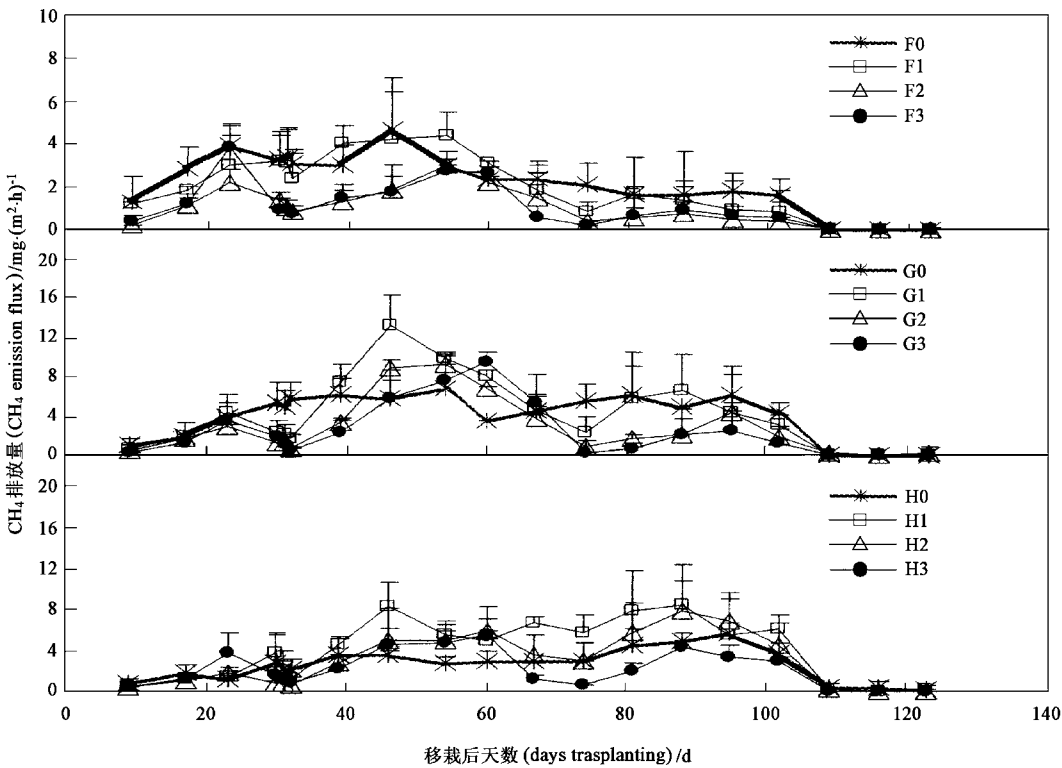


图 1 不同土壤不同肥料水平 CH_4 排放的季节变化模式

Fig.1 Seasonal pattern of CH_4 emissions from different rice paddy soils with different fertilizer level

2. 1. 1 CH_4 季节排放总量

方差分析表明 CH_4 排放量在土壤之间($p = 0.000$) 和不同氮肥水平的处理之间($p = 0.000$) 均存在显著差异.不同土壤在氮肥施用后对 CH_4 排放影响不同.如图 2 所示,在不施氮肥的情况下,F、G、H 3 种土壤的 CH_4 排放量存在显著差异,分别为 6.7 g/m^2 , 12.6 g/m^2 和 8.3 g/m^2 .施加氮肥后,3 种土壤的 CH_4 季节性累积排放量随氮肥施入量的增加,均表现为降低趋势,不同土壤在不同氮肥水平下的 CH_4 排放量存在差异,F 土壤的 CH_4 排放都比相应水平下的 G 和 H 土壤的 CH_4 排放低 1 倍左右.更进一步发现 3 种土壤 CH_4 排放从低氮到中氮水平随氮肥用量增加 CH_4 排放量的降低幅度最大,F 土壤 CH_4 季节性累积排放量从 6.7 g/m^2 降到 3.0 g/m^2 ,G 土壤从 13.1 g/m^2 降到 8.6 g/m^2 ,H 土壤从 12.2 降到 9.3 g/m^2 ;而从中氮到高氮水平 3 种土壤的 CH_4 排放量的变化不尽相同,G 和 H 土壤的 CH_4 排放量随氮肥用量的增加而降低,分别从 8.6 g/m^2 降到 7.3 g/m^2 ; 9.3 g/m^2 降到 6.6 g/m^2 ;而 F

土壤在中氮和高氮水平下的 CH_4 排放量没有明显变化,值分别为 3.0 g/m^2 和 3.4 g/m^2 .

2. 1. 2 CH_4 季节排放总量与氨态氮含量

根据已有的研究^[12]氮含量越高的土壤则 CH_4 排放越低.在本研究中,结合表 1 分析证明 F 土壤的全氮、氨态氮含量、硝态氮含量均明显高于其它 2 种土壤,故 F 土壤高的氮含量导致其 CH_4 排放明显低于 G 土壤和 H 土壤.而 3 种不同土壤在氮肥施用后对 CH_4 排放影响效应不同,各土壤 CH_4 排放随氮肥施用量的增加表现出不同降低程度的可能原因就是不同土壤中的原有 NH_4^+ 、全氮等氮素水平不同,及甲烷氧化菌群的性质不同导致在施肥后所表现出的趋势不一致.

本研究中测定了水稻抽穗期(最后 1 次施肥 1 周后)的土壤氨态氮含量.图 3 是 CH_4 排放量及土壤氨态氮含量随氮肥用量增加的变化趋势图,图例中 C 代表 CH_4 排放量,N 代表土壤氨态氮含量,发现从低氮到高氮水平,各土壤 NH_4^+-N 含量明显提高,而此时各土壤的 CH_4 累积排放量显著降低;随

土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加,明显的降低了 CH_4 排放(图3). Bronson 等推测施用尿素后降低 CH_4 排放的原因是 CH_4 氧化能力的提高^[14], Paul 等还发现氮含量限制甲烷氧化,土壤中在 NH_4^+ 缺乏的情况下,甲烷氧化菌处于不活跃或不占优势状态,增加 NH_4^+ 明显增加甲烷氧化菌数量并促进其活动^[15]. 由于在本研究中并未对土壤氨态氮含量进行连续监测,关于氮肥施入不同土壤后,土壤氨态氮含量对甲烷排放的影响及其机理还有待进一步研究.

排放均呈现降低趋势,不同土壤在不同氮肥水平下的 CH_4 排放量存在差异,原有氮含量高的土壤 CH_4 排放量低.更进一步发现3种土壤 CH_4 排放量从低氮到中氮水平降低幅度最大,此时各土壤的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量明显提高,推断造成 CH_4 排放降低的主要原因是各土壤氨态氮含量的提高;而从中氮到高氮水平3种土壤的 CH_4 排放量的变化不尽相同.

参考文献:

[1] Bouwman A F. Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1990, 46:53 ~ 70 .

[2] Crutzen P J. Methane sinks and sources [J]. Nature, 1991, 350:380 ~ 381 .

[3] Lindau CW, Bollich PK, Delaune RD, *et al.* Effect of urea fertilizer and environmental factors on methane emissions from a Louisiana, USA rice field [J]. Plant and Soil, 1991, 136: 195 ~ 203 .

[4] Whalen SC, Reeburgh WS, Kizer KS. Methane consumption and emission by taiga [J]. Global Biochem. Cycles, 1991, 5: 261 ~ 273 .

[5] Schütz H, Holzapfel ~ Pschorn A, Conrad R, *et al.* A 3-year continuous record on the influence of daytime, season and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy field [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94: 16405 ~ 16416 .

[6] 上官行健,王明星. 稻田 CH_4 排放的控制措施[J]. 地球科学进展, 1993, 8(5) : 1 ~ 12 .

[7] Neue HU, Lantin RL, Wassmann R, *et al.* Methane emission from rice soils of the Philippines [A]. In: Minami K, Mosier AR, Sass RL. CH_4 and N_2O -global emissions and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources NIAES Series 2 [C]. Tokyo, Japan: 1994. 55 ~ 77 .

[8] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Characters of greenhouse gas (CH_4 , N_2O , NO) emissions from croplands of southeast China [J]. World Resource Review, 1999, 11: 229 ~ 246 .

[9] Yagi K, Minami K. Effect of organic mater application on methane emission from Japanese rice fields[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1990, 36: 599 ~ 610 .

[10] 邹建文,黄耀,宗良纲,等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 20 (4) : 7 ~ 12 .

[11] Wang M X, Shangguan X J. CH_4 emission from various rice fields in P. R. China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 1996, 55:129 ~ 138 .

[12] 焦燕,黄耀,宗良纲,等. 土壤理化特性对稻田甲烷排放的影响[J]. 环境科学, 2002, 23(5) : 1 ~ 7 .

[13] Yao H, Conrad R, Wassmann R, *et al.* Effect of soil characteristics on sequential reduction and methane production in sixteen rice paddy soils from China, the Philippines, and Italy [J]. Biogeochemistry, 1999, 47(3) : 267 ~ 293 .

[14] Bronson K F, Mosier A R. Effect of encapsulated calcium carbide on dinitrogen, nitrous oxide, methane and carbon dioxide emissions from flooded rice [J]. Biol. Fertil. Soils, 1997, 11: 116 ~ 120 .

[15] Paul L E, Bodelier Alexandera P, Hahn Inko R, *et al.* Effects of ammonium based fertilisation on microbial processes involved in methane emission from planted with rice [J]. Biogeochemistry, 2000, 51: 225 ~ 257 .

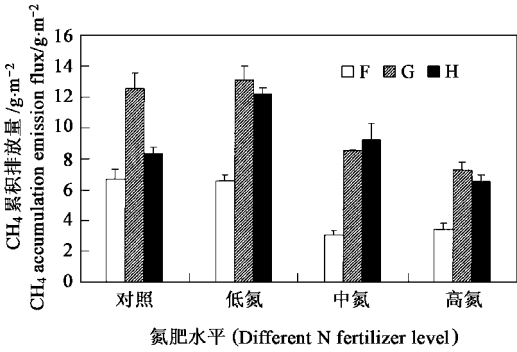


图2 不同土壤不同氮肥水平的 CH_4 累积排放量

Fig.2 Seasonal average of CH_4 emissions from various rice paddy soils

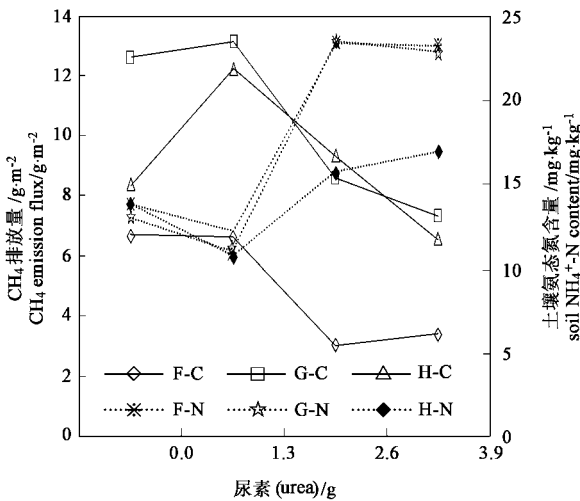


图3 不同土壤不同氮肥水平的 CH_4 累积排放量

Fig.3 Seasonal average of CH_4 emissions from various rice paddy soils

3 结论

盆栽试验结果表明在水稻生长季,不同氮肥施用量对不同稻田土壤 CH_4 排放影响表现为不同土壤之间,及不同氮肥水平之间 CH_4 排放均存在显著差异.在不施氮肥的情况下,3种土壤的 CH_4 排放量存在显著差异;随氮肥用量的增加,各土壤的 CH_4