

水稻土甲烷产生、氧化和排放过程的相互影响

——以水分历史处理为例

徐 华¹, 蔡祖聪¹, 八木一行²

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 日本国立农业环境技术研究所, 日本筑波 305)

摘 要: 通过盆栽和培养试验研究了不同水分历史水稻土 CH_4 产生、氧化及排放间的相互影响。水稻土 CH_4 产生、氧化和排放皆受土壤水分历史条件的强烈影响, 非水稻生长期土壤水分含量越高, 随后水稻生长期 CH_4 排放量越大, 产生和氧化能力也越强。无论是水稻生长期平均值还是季节变化, CH_4 排放皆受 CH_4 产生的显著影响。 CH_4 产生量和排放量的相对差值很好地说明了各处理间土壤 CH_4 氧化潜力的差异。水稻土 CH_4 排放通量主要受 CH_4 产生率, 而不是 CH_4 氧化潜力的影响, 但 CH_4 氧化能牵制 CH_4 产生率对 CH_4 排放通量的影响, 水稻土这种自然调节 CH_4 排放量的特性对减少稻田 CH_4 排放具有重要的意义。

关键词: 水稻土; 甲烷产生; 甲烷排放; 甲烷氧化; 水分历史

中图分类号: S131; X511

在所有的温室气体中, CH_4 对温室效应的相对贡献为 19%, 其重要性仅次于 CO_2 ^[1]。水稻田 CH_4 排放是导致大气 CH_4 浓度不断升高的重要原因之一。

稻田 CH_4 产生是严格厌氧条件下产甲烷菌作用于产 CH_4 基质的结果。尽管稻田土壤以淹水还原条件为主, 但在土水界面及根土界面也存在氧化区域, 导致土壤中产生的 CH_4 在排放至大气前相当一部分被土壤中的甲烷氧化菌所氧化。稻田 CH_4 排放主要是土壤中 CH_4 的产生、氧化这两个方向相反的过程共同作用的结果, 同时进行 CH_4 的产生、氧化和排放以及其相互影响的研究将有助于更深入全面地阐明试验处理对水稻生长期 CH_4 排放的控制作用及机理。

本文选择水分历史 (非水稻生长期土壤水分含量) 作为处理因素, 通过盆栽和培养试验研究了水稻土 CH_4 产生、氧化及排放的相互影响。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

两个水稻田土样分别采自无锡安镇和中国科学

院鹰潭红壤国家生态实验站水稻田, 土壤经风干、碾碎、过 5 mm 筛后进行盆栽试验。采自无锡水稻田土样的有机 C 含量、全 N 含量及 pH 值分别为: 19.5 g/kg、0.176 g/kg、5.57; 采自鹰潭水稻田土样的分别为: 1.71 g/kg、0.145 g/kg、5.05。

1.2 盆栽试验

盆栽试验在温室进行。盆钵为圆柱形, 外径、内径和高分别为 22 cm、20 cm 及 30 cm, 试验于 1999 年 10 月 26 日开始, 每盆钵装供试土壤 6 kg。试验按非水稻生长期土壤水分含量共分为 5 个处理: 风干水分条件 (I); 田间持水量的 25%~35% (II); 田间持水量的 50%~60% (III); 田间持水量的 75%~85% (IV) 及田间持水量的 107% (淹水) (V)。风干土壤水分含量为田间持水量的 3.89% (鹰潭) 和 5.37% (无锡)。每处理 3 个重复, 共 30 个盆钵, 呈随机分布。各盆钵于 2000 年 6 月 10 日翻土泡水, 同时施入基肥, 每盆施 CaH_2PO_4 2.0 g、KCl 0.3 g 和尿素 0.8 g。水稻于 6 月 12 日移栽, 10 月 12 日收获, 其间分别在 7 月 8 日和 8 月 10 日追施尿素 0.4 g, 水稻品种为武育粳。各盆钵水稻生长期维持至少 2 cm 深的水层。

①基金项目: 国家自然科学基金 (40371068) 和中国科学院全国优秀博士学位论文专项基金共同资助。

作者简介: 徐华 (1966—), 男, 江苏如东人, 博士, 研究员, 主要从事农田温室气体排放及其减缓对策研究。E-mail: hxu@issas.ac.cn

1.2 CH₄ 产生率厌氧培养试验

称取相当于烘干土重 20 g 的经过温室非水稻生长期不同水分处理的土样放入 120 ml 培养瓶, 加入蒸馏水使培养瓶内土水比为 1:2, 晃动培养瓶使土壤成泥浆状。用硅橡胶塞塞住瓶口, 瓶塞周围以 704 胶密封。硅橡胶塞中间打一小孔, 内插玻璃管, 管外再套一段硅橡胶软管, 以合适的硅橡胶塞塞紧硅橡胶软管通气口, 作为气体取样口。再在塞住瓶口的硅橡胶塞的两边打两个孔, 插入玻璃管, 一根较长, 插入泥浆中, 作为 N₂ 进口; 另一根较短, 稍稍插入培养瓶即可, 作为 N₂ 出口。每次测定 CH₄ 产生率时, 通过 N₂ 进口用高纯 N₂ 以 300 ml/min 的流速冲洗 10 min, 造成充分的厌氧培养条件。将培养瓶放入 28℃ 培养箱中培养, 每隔 1 周左右测定 1 次 CH₄ 产生率。CH₄ 产生率通过分析密闭培养一定时间后培养瓶内气相 CH₄ 浓度的变化获得。

1.3 CH₄ 氧化培养试验

称取相当于烘干土重 20 g 的经过温室非水稻生长期不同水分处理的土样放入 120 ml 培养瓶, 调节土壤水分含量为田间持水量的 80%。氧化培养试验的装置与产生率厌氧培养试验相似 (只有中间取样口), 通过取样口向培养瓶注入一定体积的纯 CH₄, 使瓶内 CH₄ 浓度为 9000 μl/L 左右 (准确的初始浓度通过时间测定确定)。试验设有 CH₄ 浓度相同但不加土样的对照, 以消除可能存在的泄漏产生的误差。所有处理均 2 次重复。将培养瓶放入 28℃ 培养箱中培养, 根据瓶内 CH₄ 浓度的变化情况每隔一定时间测定 1 次瓶中剩余的 CH₄ 浓度。

1.4 气体样品的采集与测定

水稻生长期每隔 4 ~ 5 天采样 1 次。采集气样时, 首先将盆钵放置在一特殊设计的木架上, 然后将尺寸为 50 cm × 50 cm × 100 cm 的有机玻璃采气箱的下边卡进木架上宽 2 cm, 深 1 cm 的水槽。采样时, 将两通采样针一头插进安装于采气箱侧面的密封采样垫, 另一头插进 18 ml 真空气瓶瓶塞, 气样即由采集箱内进入采气瓶, 每隔 10 min 采 1 次样, 共 4 次。培养试验直接用精密进样器从培养瓶内采样进行气相色谱测定。

1.5 CH₄ 排放通量计算公式

CH₄ 排放通量由下式计算:

$$F = \rho \times (0.5 \times 0.5 \times 0.99 + 0.000314 \times h) / 0.0314 \times d/dt \times 273/T \quad (1)$$

式中 F 为 CH₄ 排放通量, 单位为 mg/(m²·h); ρ 为标

准状态下 CH₄ 密度, 其值为 0.714 kg/m³; h 为盆钵顶部至水面的高度, 单位为 cm; d/dt 为单位时间内密闭箱内 CH₄ 浓度的变化, 单位为 mg/(L·h); T 为密闭箱内温度, 单位为 K。

1.6 CH₄ 产生率计算公式

土壤 CH₄ 产生率由下式计算:

$$P = d/dt \times V/MV \times MW/W \times 273/T \quad (2)$$

式中 P 为 CH₄ 产生率, 单位为 μg/(g (干重)·d); d/dt 为培养瓶内气相 CH₄ 浓度单位时间的变化, 单位为 mg/(L·d); V 为培养瓶内气体体积, 单位为 L; W 为干土重, 单位为 g; MW 为 CH₄ 的分子量, 单位为 g; MV 为标准状态下 1 mol 气体的体积, 单位为 L; T 为培养温度, 单位为 K。

2 结果与分析

2.1 CH₄ 排放通量与产生率之间的关系

水稻生长期平均 CH₄ 排放通量与平均 CH₄ 产生率之间呈显著正相关 (图 1)。图 1 中数据包括了无锡和鹰潭两种土壤各水分历史处理的 CH₄ 排放通量和厌氧 CH₄ 产生率结果, 所有数据可用线性方程很好地拟合, 而不是如两种土壤的 CH₄ 排放通量和土壤有机 C 含量等土壤性质拟合时出现两条直线^[2], 这说明 CH₄ 产生率是比有机 C 含量等土壤性质更好的 CH₄ 排放通量的指示因子。如果通过进一步试验, 观测尽可能多类型水稻土水稻生长期 CH₄ 排放通量和实验室厌氧培养时 CH₄ 的产生率, 建立 CH₄ 排放通量和 CH₄ 产生率间更科学、更准确的定量关系, 就可通过 CH₄ 产生率结果去估算同一土壤水稻生长期 CH₄ 排放量, 这样大大节省田间观测所需的大量人力和物力。

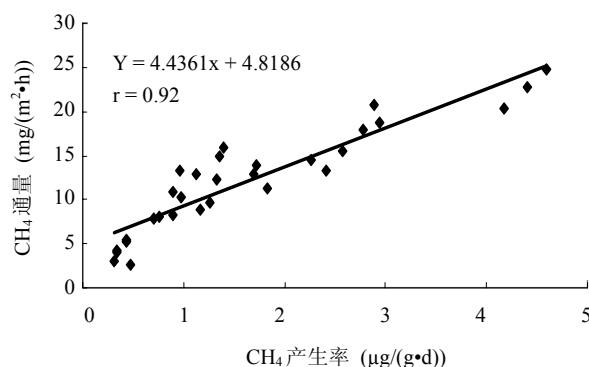


图 1 水稻生长期平均 CH₄ 排放通量与平均厌氧 CH₄ 产生率的关系

Fig. 1 Relationship between mean CH₄ flux and production rate in rice-growing season

图1反映的是整个培养期 CH_4 产生率的整体状况对水稻生长期平均 CH_4 排放通量的影响,那么培养期一定时间 CH_4 产生率对水稻生长期相应时间 CH_4 排放通量又有怎样的影响呢?从表1可知,水稻移栽后一定时间 CH_4 排放通量与培养开始后相应时间厌氧 CH_4 产生率间大多存在显著相关性。水稻生长对种稻土壤的 CH_4 产生、氧化和排放影响很大。在 CH_4 从土壤向大气排放的3个途径中,水稻通气组织的运输最重要,有时可占到稻田 CH_4 排放总量的95%以上^[3];不仅如此,水稻植株也能传输大气中的 O_2 到根系,以维持根的呼吸,它能很大程度地影响根部区域 CH_4 的氧化;水稻植株还能通过根系分泌物和腐败物质给土壤提供额外的产 CH_4 基质从而影响 CH_4 的产生。另外,种稻土壤的 CH_4 产生、氧化和排放还受气温、光照等气候因子和施肥等其他因素的影响。由此可见,种稻土壤 CH_4 排放和通过实验室培养试验观测到的 CH_4 产生率之间出现量的差异及时间上的错位,并因此有时不存在显著相关性是正常的。处理V水稻生长及培养观测中前期就有大量 CH_4 排放及产生,水稻生长后期仍有较高 CH_4 排放,而厌氧培养由于产 CH_4 基质的大量消耗并得不到补充,至培养后期 CH_4 产生率已很低^[2],这可能是处理V水稻移栽后和培养开始后相应时间 CH_4 排放通量与 CH_4 产生率之间不存在显著相关性的主要原因(表1)。而处理I、II、III和IV CH_4 排放通量和厌氧产生率都有一个水稻移栽后或培养开始后按不同速率增加的过程,且观测后期 CH_4 排放通量及产生率相对于观测中期的变化也较一致^[2],所以水稻移栽后和培养开始后相应时间 CH_4 排放通量与 CH_4 产生率之间存在显著相关性(表1)。

表1 各处理水稻移栽后和培养开始后相应时间 CH_4 排放通量与 CH_4 产生率之间直线回归的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of linear regression between CH_4 flux and production rate observed at the same time after rice transplanting and incubation initiation

处理	无锡土样	鹰潭土样
I	0.467*	0.476*
II	0.500*	0.470*
III	0.772**	0.707**
IV	0.841**	0.785**
V	0.005	0.100

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

CH_4 排放通量受土壤 CH_4 产生率、氧化率及 CH_4 从土壤向大气传输能力的综合影响,其中 CH_4 产生应该是 CH_4 排放的最基本的条件。Sigren等^[4]在研究水稻品种对 CH_4 排放的影响时,发现不同水稻品种 CH_4 排放通量只受土壤醋酸浓度的显著影响,而与水稻植株对 CH_4 的传输能力无关,从而推断 CH_4 排放通量和 CH_4 产生率之间存在显著相关性。Yagi等^[5]观测到稻田 CH_4 排放通量与同一时间田间原位培养测定的 CH_4 产生率间的显著相关性。原位培养时培养温度与土壤温度一致,这就消除了两者温度不一致对 CH_4 排放通量和产生率之间统计显著性的影响。

2.2 CH_4 产生、氧化和排放的相互影响

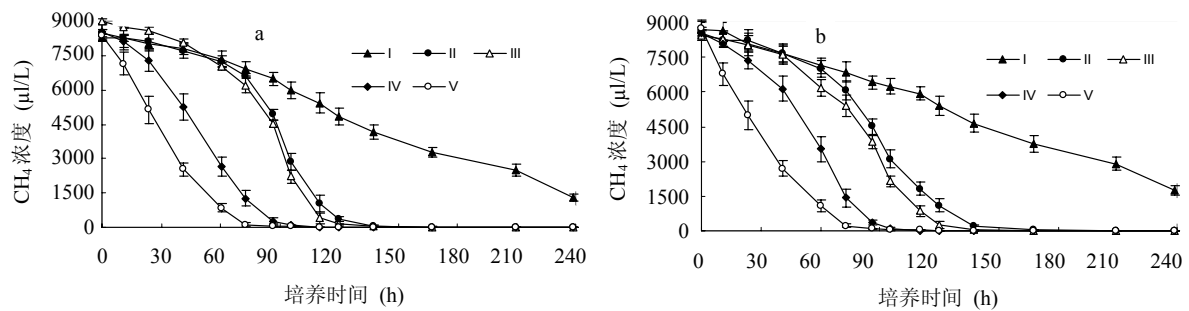
种稻土壤 CH_4 氧化量理论上应该是 CH_4 产生量减去水稻生长期 CH_4 排放量和试验结束时土壤中闭蓄的 CH_4 后所剩余的部分。由于试验结束时土壤中闭蓄的 CH_4 与水稻生长期 CH_4 总排放量相比很小,所以直接用 CH_4 产生量与排放量的相对差值应该能较合理地反映 CH_4 氧化能力。表2为使用相同单位表示的各处理平均厌氧 CH_4 产生率、平均水稻生长期 CH_4 排放通量及其相对差值。由于水稻根系分泌和根表皮细胞的脱落以及水稻生长期可能自然生长的各种水生植物等供给有机基质,水稻种植能显著提高土壤 CH_4 产生率^[6],种稻土壤实际 CH_4 产生率要大于实验室厌氧培养获得的结果,因而土壤实际 CH_4 氧化率要大于表2中的相对差值结果。Yagi等^[5]也观测到部分 CH_4 排放通量大于 CH_4 产生率的结果。虽然表2中相对差值的结果不能代表土壤实际 CH_4 氧化率,但一定程度上应该能合理地说明处理间土壤 CH_4 氧化潜力的差异。从表2可知,土壤 CH_4 氧化率随着非水稻生长期土壤水分含量的增加而增加,这与实验室 CH_4 氧化培养实验结果一致(图2)。

水稻土对稻田内源 CH_4 的氧化是稻田 CH_4 排放的重要自然调节机制。田间或盆栽测定结果表明种稻土壤 CH_4 氧化率为44%~97%^[3]、19%~90%^[7]、80%~90%^[8]、10%~70%^[4]、7%~73%^[9]。因为水稻植株生理特性的季节性变化及水肥等农业管理措施的不同, CH_4 氧化率结果变异很大。考虑到田间条件下长时间风干水分条件存在的可能性极小以及表2结果对土壤实际 CH_4 氧化率的低估,我们观测到的 CH_4 氧化率结果与已报道的结果基本上是一致的(表2)。

表 2 各处理水稻生长季节平均 CH₄ 排放通量和厌氧 CH₄ 产生率及其相对差值Table 2 Seasonal mean CH₄ flux and production rate and their relative difference

处理	厌氧 CH ₄ 产生率 ($\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$)		CH ₄ 排放通量 ($\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$)		相对差值* (%)	
	无锡土样	鹰潭土样	无锡土样	鹰潭土样	无锡土样	鹰潭土样
I	1.36 ± 0.04	0.99 ± 0.11	1.86 ± 0.35	1.59 ± 0.17	-36.8	-60.6
II	0.45 ± 0.02	0.33 ± 0.02	0.57 ± 0.09	0.48 ± 0.08	-26.6	-45.4
III	1.11 ± 0.05	0.81 ± 0.04	1.16 ± 0.10	1.12 ± 0.16	-4.5	-38.3
IV	2.42 ± 0.22	1.75 ± 0.09	1.87 ± 0.14	1.64 ± 0.17	22.7	6.2
V	4.39 ± 0.30	2.87 ± 0.12	2.92 ± 0.26	2.48 ± 0.24	33.5	13.6

* 相对差值 = (平均厌氧 CH₄ 产生率 - 水稻生长期平均 CH₄ 排放通量) / 平均厌氧 CH₄ 产生率 × %。

图 2 水稻土氧化高浓度 CH₄ 的过程 (a: 无锡水稻土; b: 鹰潭水稻土)Fig. 2 Course of CH₄ oxidation in paddy soils

与 CH₄ 产生率对 CH₄ 排放通量的影响相反, 较高的 CH₄ 氧化能力导致 CH₄ 排放通量的减少, 各处理中最大 CH₄ 产生率是最小 CH₄ 产生率的 13.3 倍, 而最大 CH₄ 排放通量只有最小 CH₄ 排放通量的 6.1 倍 (表 1)。但非水稻生长期较高水分含量下土壤较高的 CH₄ 氧化能力未能改变 CH₄ 排放通量随冬季水分含量增加而增加的变化趋势, 说明土壤 CH₄ 排放通量更大程度上受 CH₄ 产生率, 而不是 CH₄ 氧化潜力的影响。

3 小结

水稻土 CH₄ 产生、氧化和排放是相互影响的 3 个过程, CH₄ 产生量与排放量的相对差值能较合理地反映土壤 CH₄ 氧化能力的差异。CH₄ 排放通量受 CH₄ 产生率的显著影响, 土壤 CH₄ 产生率是比土壤 CH₄ 氧化潜力更重要的 CH₄ 排放量的控制因子。

虽然水稻土 CH₄ 排放通量随 CH₄ 产生率的增加而显著增加, 但水稻土 CH₄ 氧化率也随 CH₄ 产生率的增加而增加。各水分历史处理土壤 CH₄ 氧化能力和 CH₄ 排放通量这种相似的变化趋势说明土壤 CH₄

氧化能牵制 CH₄ 产生率对 CH₄ 排放通量的影响, 水稻土这种自然调节 CH₄ 排放量的特性对减少稻田 CH₄ 排放具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Bouwman AF. Introduction//Bouwman AF. Soils and the Greenhouse Effect. Chichester: John Wiley and Sons, 1990: 25-32
- [2] Xu H, Cai ZC, Tsuruta H. Soil moisture between rice-growing seasons affects methane emission, production, and oxidation. Soil Sci. Soc. Am. J., 2003, 67: 1147-1157
- [3] Schutz H, Seiler W, Conrad R. Processes involved in formation and emission of methane of rice paddies. Biogeochemistry, 1989, 7: 33-53
- [4] Sigren LK, Byrd GT, Fisher FM, Sass RL. Comparison of soil acetate concentrations and methane production, transport, and emission in two rice cultivars. Global Biogeochemical Cycles, 1997, 11: 1-14
- [5] Yagi K, Kumagai K, Tsuruta H, Minami K. Emission,

- production and oxidation of methane in a Japanese rice paddy field // Lal R. Soil management and greenhouse effect. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995: 231–243
- [6] Liang JY, Lin HC. Decomposition of organic matter and methane emission from soil of rice pot culture. Journal of the Chinese Agricultural Chemical Society, 1996, 36: 91–98
- [7] Sass RL, Fisher FM, Harcombe PA, Turner FT. Methane production and emission in a Texas rice field. Global Biogeochem. Cycles, 1990, 4: 47–68
- [8] Frenzel P, Rothfuss F, Conrad R. Oxygen profiles and methane turnover in a flooded rice microcosm. Biology and Fertility of Soils, 1992, 14: 84–89
- [9] Jia ZJ, Cai ZC, Xu H, Li ZP. Effect of rice plants on CH₄ production, transport, oxidation and emission in rice paddy soil. Plant and Soil, 2001, 230: 211–221

Interactions among CH₄ Production, Oxidation and Emission in Paddy Soil ——A Case Study of Soils with Different Water History

XU Hua¹, CAI Zu-cong¹, YAGI Kazuyuki²

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

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

Abstract: Interactions among CH₄ production, oxidation and emission in paddy soils with different moisture history was studied by pot and incubation experiments. Emission, production and oxidation of CH₄ in paddy soils were all strongly affected by soil moisture history. The wetter the soil in non-rice-growing season, the higher CH₄ flux and also the stronger CH₄ production and oxidation capacities in rice-growing season. Significant correlation existed not only between mean CH₄ flux and mean CH₄ production capacity, but also between their seasonal variations in rice-growing season. The relative difference of CH₄ production and emission explained very well the CH₄ oxidation potential of different treatments. It was CH₄ production, not CH₄ oxidation capacity, that mainly affected CH₄ emission in rice-growing season, but CH₄ oxidation buffered obviously CH₄ emission as CH₄ production increased. The ability of paddy soil itself to adjust its CH₄ oxidation capacity would be important to mitigate CH₄ emissions from rice fields.

Key words: Paddy soil, CH₄ production, CH₄ oxidation, CH₄ emission, Moisture history