

不同种类有机肥施用对一季稻田 CH₄ 排放的影响

吴家梅^{1,2}, 纪雄辉^{2*}, 彭 华¹, 霍莲杰², 刘 勇³, 朱 坚²

(1.湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 2.中南大学研究生院隆平分院, 长沙 410125; 3. 湖南省植物保护研究所, 长沙 410125)

摘 要:选取不同施肥处理的一季中稻田为研究对象,采用静态箱-气相色谱法对一季稻 CH₄ 排放通量进行手动观测。结果表明,与不施肥相比,各施肥处理 CH₄ 平均排放通量均有不同程度增加。其中稻草还田+化肥处理(稻草处理)CH₄ 平均排放通量为 31.04 mg·m⁻²·h⁻¹,比化肥处理和猪粪+化肥处理(猪粪处理)分别增加 326.4%($P<0.05$)和 211.7%($P<0.05$),鸡粪+化肥处理(鸡粪处理)比化肥和猪粪处理分别增加 140.4%($P<0.05$)和 75.7%($P<0.05$)。说明稻草还田和鸡粪处理显著增加稻田 CH₄ 排放通量,而猪粪处理与化肥无显著差异。同时对有关的环境因子进行分析表明,不同处理的土壤表层 5 cm 温度、Eh 与 CH₄ 排放通量存在显著相关关系;土壤 pH 值和水层厚度与稻田 CH₄ 季节排放通量相关性不明显。猪粪处理单位产量全球增温潜势(GWP)为 0.83 kg·kg⁻¹,是较好的推荐施肥处理,对环境与产量之间效益的协调具有较好的作用。

关键词:CH₄ 排放通量;有机肥;稻田;CH₄ 累计排放量

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)08-1688-07

The Effect of Different Organic Manures Treatments on Methane Emission from Single-cropping Paddy Fields

WU Jia-mei^{1,2}, JI Xiong-hui^{2*}, PENG Hua¹, HUO Lian-jie², LIU Yong³, ZHU Jian²

(1.Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410125, China; 2.Longping Department of Central South University, Changsha 410125, China; 3.Hunan Plant Protection Institute, Changsha 410125, China)

Abstract: Methane emission fluxes from single-cropping paddy fields with application different fertilization treatments were studied by using the static chamber-gas chromatograph techniques with manual method. Results showed that the treatments with application fertilizer increased methane emission compared with no fertilizer treatments(NF). Seasonal average methane emission flux of the incorporation of rice straw and mineral fertilizer(RS) was 31.04 mg·m⁻²·h⁻¹ which increased by 326.4%($P<0.05$) and 211.7% compared with that of the mineral fertilizer(MF) and incorporation of pig manure and mineral fertilizer(PM), respectively. Seasonal average methane emission flux from the incorporation of chicken manure and the mineral fertilizer(CM) increased by 140.4%($P<0.05$) and 75.7%($P<0.05$) as compared with MF and PM, respectively. The results indicated there was the obvious influence for RS and CM to methane emission. However, there was no significant difference between NF and PM. According to the analysis of related environmental factors, there was significant correlation between methane emission fluxes and the soil temperature at 5 cm depth, and the same as the soil Eh. No significant correlation was found between CH₄ flux and water depth. The unit yield of Global warming Potential(GWP) in PM treatment was 0.83 kg·kg⁻¹ which suggested PM was a better recommend fertilization during the rice growth. The application of PM took the slight advantages not only in reducing the GWP but also in improving the grain yield.

Keywords: CH₄ emission flux; organic manure; rice paddy; CH₄ accumulation emission amount

CH₄ 是重要的温室气体之一^[1],对全球气候变暖的贡献率约为 20%^[2]。农业生产中,水稻田的排放是

最重要的人为 CH₄ 排放源之一,每年向大气排放的 CH₄ 占 CH₄ 总排放量的 15%~20%^[3]。中国是世界水稻的主产国,水稻种植面积仅次于印度。因此,如何实现稻田 CH₄ 显著减排对应气候变化具有重要意义。

我国的水稻施肥是有机、无机配合施用,水分管理一般是淹水和烤田相结合的管理方式。为了保障粮食安全,国家非常重视利用有机肥和稻草还田等以提升土壤质量。因此,研究在传统水分管理条件下有机

收稿日期:2011-02-17

基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BAD95B02,2007BAD89B11);
湖南省农科院创新项目(2010HNNKYCX33)

作者简介:吴家梅(1977—),女,湖南澧县人,博士研究生,主要从事农田土壤碳固定与温室气体减排方向研究。

E-mail:wjalee@163.com

* 通讯作者:纪雄辉 E-mail:jixionghui@sohu.com

物料（包括稻草还田）和无机肥料配合施用对稻田 CH₄ 排放的影响，弄清影响稻田 CH₄ 排放的因子，寻求稻田温室气体减排措施具有重要意义。近年来，双季稻田 CH₄ 排放特征研究颇多，而单季稻有机肥料施用对稻田 CH₄ 排放的影响报道较少，较多的研究证实不同有机肥料对稻田 CH₄ 排放影响的研究结果也不尽相同^[4-6]。因此，本研究选用生产中常用的几种有机肥，试图探讨等量外源碳输入在常规的水分管理田间下对稻田生态系统 CH₄ 排放的综合影响。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地点位于湖南省长沙县干杉乡大屋组的水稻田(N 28°08'18",E 113°12'0"),海拔 42 m,年平均温度为 17.1 ℃,年降水量 1 500 mm,年积温(≥10 ℃)5 300~6 500 ℃,为南方典型的水稻生产区。土壤类型为第四纪红壤发育的红黄泥水稻土,化学性状:土壤 pH 6.0,有机质 33.3 g·kg⁻¹、全氮 2.04 g·kg⁻¹、全磷 0.85 g·kg⁻¹、全钾 9.2 g·kg⁻¹、碱解氮 212 mg·kg⁻¹、有效磷 11.1 mg·kg⁻¹、速效钾 97 mg·kg⁻¹。

试验设置 5 个处理,不同施肥处理见表 1。每个处理 3 个重复,采用单因素随机区组设计。各个小区长 3.0 m,宽 2.8 m,每个小区田埂和区组之间的排灌水沟田埂均用塑料膜包裹隔开。前季作物为水稻,插秧前期田间保持淹水状态。氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾,有机肥为风干样品,不同有机肥类型与化肥施入稻田保持相同的 C/N。稻草剪成 20 cm 小段,踩入田间约 20 cm,其他肥料撒入田间,与土壤混匀。

水稻品种为准两优 608,2010 年 6 月 1 日播种,2 日犁田、覆水和施用有机肥,4 日装测定 CH₄ 的底座,21 日施用化肥。施用化肥时取出底座,施肥后再装上底座,施化肥后第 2 d 移栽。8 月 2 日—8 月 31 日为烤田期,9 月 9 日—9 月 25 日干湿交替,10 月 30 日

以后落干,10 月 9 日收获,其余时间田间处于淹水状态。有机肥为风干腐熟肥料,为防止一次性大量施用烧苗而提前施用有机肥。有机肥与化肥施用后与耕作层土壤充分混合。水分管理和病虫草害防治与当地大面积生产相一致。

1.2 气体采集与分析

采用密闭静态箱测定,采样箱为圆柱体,箱底直径 55 cm,高 120 cm,于水稻栽插前将不锈钢底座固定于土壤中,测定时加水注入底槽加以密封,水稻移栽后每 3~4 d 采样 1 次。采样时间固定在上午 9:00—10:00,分别为罩箱后的 0、10、20、30 min,每次抽取 45 mL 气体样品。气体样品采用 Agilent 7 890A 气相色谱仪分析,检测器 FID,检测温度 200 ℃,柱温 50 ℃,标准气体由国家标准物质中心提供。气体排放通量由 4 个气样浓度值经线性回归分析得出。每次取气的同时测定稻田水层深度、土壤表层 5 cm 处氧化还原电位以及 5 cm 和 10 cm 的土壤温度。

1.3 数据处理

稻田 CH₄ 排放通量计算公式如下^[7]:
$$F=\rho\cdot273/(273+T)\cdot H\cdot dC/dt$$

式中: F 为 CH₄ 排放通量 (mg·m⁻²·h⁻¹); ρ 为标准大气压下的 CH₄ 密度(0.714 kg·m⁻³); T 为采样过程中采样箱内的平均温度(℃); H 是采样箱箱罩的净高度(m); dC/dt 是采样箱内 CH₄ 气体浓度的变化率。

1.4 各生育期 CH₄ 累计排放量

稻田各生育期 CH₄ 累计排放量= $\sum_{i=1}^n F_i\cdot D_n$
式中: F_i 为不同生育期内 CH₄ 平均排放通量; D_n 为不同生育期的天数。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理下稻田 CH₄ 排放通量的季节变化

2.1.1 不同施肥处理对稻田 CH₄ 排放季节变化的影响
从图 1 可以看出,各个施肥处理 CH₄ 的排放主

表 1 不同处理的施肥量(kg·hm⁻²)

Table 1 Fertilizer application rates of different treatments(kg·hm⁻²)

处理	代号	化肥			有机肥	养分施入量(N 和 P 按相当于化肥 70%折算)			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O		C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
不施肥	NF	0	0	0	0	0	0	0	0
化肥	MF	270	135	180	0	0	0	0	0
猪粪+化肥	PM	112	0	0	17 285	2 850	158	197	110
鸡粪+化肥	CM	74	0	0	11 002	2 850	196	218	197
稻草+化肥	RS	234	129	68	7 500	2 850	36	6	112

要集中在施用有机肥 72 d 内。在施用有机肥 7 d 后, 稻草和鸡粪排放增加, 在施肥后的 20 d (秧苗移栽前), 稻田 CH₄ 排放通量急剧减少, 在移栽后的 7 d, CH₄ 排放量达到排放最高峰, 在分蘖期, 一季稻又有个小高峰, 高峰过后在抽穗期有个小高峰, 一直持续至 8 月 13 日以前(即移栽后 52 d), 此后 CH₄ 排放量大大减少, 一直持续到水稻成熟。不同处理中, 施用稻草处理的 CH₄ 排放通量最大, 其次是鸡粪处理, 高于猪粪、化肥和无肥处理。稻草和鸡粪有机肥施用的 CH₄ 的排放模式相同, 而猪粪处理的 CH₄ 排放与无肥和化肥排放模式保持一致。排放通量的峰值最大是稻草处理, 达到 125.43 mg·m⁻²·h⁻¹, 其次是施用鸡粪处理, 其排放通量的最大值为 77.12 mg·m⁻²·h⁻¹, 施用有机肥处理的排放通量均大于单施化肥和无肥处理。

2.1.2 不同施肥处理对稻田 CH₄ 累计排放量的影响

不同施肥处理稻田 CH₄ 排放量见表 2。不同施肥处理对稻田 CH₄ 排放有一定的影响, 施入有机肥处理的稻田平均排放量比不施肥处理和单施化肥处理要大。其中稻草处理平均排放通量最大, 达到了 31.04 mg·m⁻²·h⁻¹, 显著高于其他处理; 其次是鸡粪处理和猪粪处理, 不施肥处理的平均排放通量最低。3 个有机肥处理间 CH₄ 排放存在显著差异, 不施肥、化肥和猪粪处理间没有显著性差异。

从季节累计排放量的结果来看, 稻草还田处理的季节累积排放量达到了 916.30 kg·hm⁻², 比化肥处理增加了 326.41% ($P<0.05$), 而猪粪和鸡粪处理分别比施化肥处理增加了 36.81% 和 140.44% ($P<0.05$)。说明施用有机肥尤其是稻草直接还田显著增加 CH₄ 排放通量。

2.1.3 不同施肥处理水稻生育期 CH₄ 排放累积贡献率

表 3 显示, 不同的施肥处理中, 从施肥到孕穗

表 2 不同施肥处理稻田 CH₄ 排放量

Table 2 Methane emission fluxes under different

fertilization treatments				
处理	平均排放通量/ mg·m ⁻² ·h ⁻¹	季节累计排放量/ kg·hm ⁻²	增加量/ kg·hm ⁻²	增加百分比/ %
NF	7.19c	212.12c	—	-1.29
MF	7.28c	214.89c	2.77	—
PM	9.96c	293.99c	81.87	36.81
CM	17.50b	516.67b	304.55	140.44
RS	31.04a	916.30a	703.78	326.41

注: 每列中不同字母表示 $P<0.05$ 显著水平, 下同。

期的排放比例比较大, 占整个排放量的 76.85%~89.51%, 不同的生育时期以分蘖期排放的比例较大, 占整个排放量的 22.74%~39.50%, 稻草和鸡粪处理从施肥到移栽前这段时期的 CH₄ 排放比例占整个水稻排放的 1/5 以上。在施肥时期、移栽返青期、分蘖期的不同处理中, 施用稻草处理显著高于鸡粪处理, 鸡粪处理显著高于猪粪、化肥和无肥处理, 而猪粪、化肥和无肥处理间没有显著差异。孕穗期、齐穗期和灌浆成熟期的 CH₄ 排放量在整个排放时期的比例较小, 且不同施肥处理间没有显著差异。说明在水稻的生长后期, CH₄ 排放量小, 且不同的施肥对其排放的影响也少。由此可见, 稻草和鸡粪引起排放量显著增加主要是稻田的前期排放量大所造成的。

2.2 影响稻田 CH₄ 排放的环境因素

2.2.1 温度

整个稻季土壤 5 cm 和 10 cm 处的温度在 20.87~30.33 ℃ 之间, 通过分析可知 5 cm 和 10 cm 处的温度变化同步, 存在显著正相关关系, 而不同的施肥处理 CH₄ 季节排放通量与 5 cm 和 10 cm 土温的变化分别呈显著正相关关系。以 5 cm 处土温为例, 其与无肥、化肥、猪粪、鸡粪和稻草还田的相关系数分别为 0.807 5、0.769 4、0.810 6、0.697 6、0.656 7。

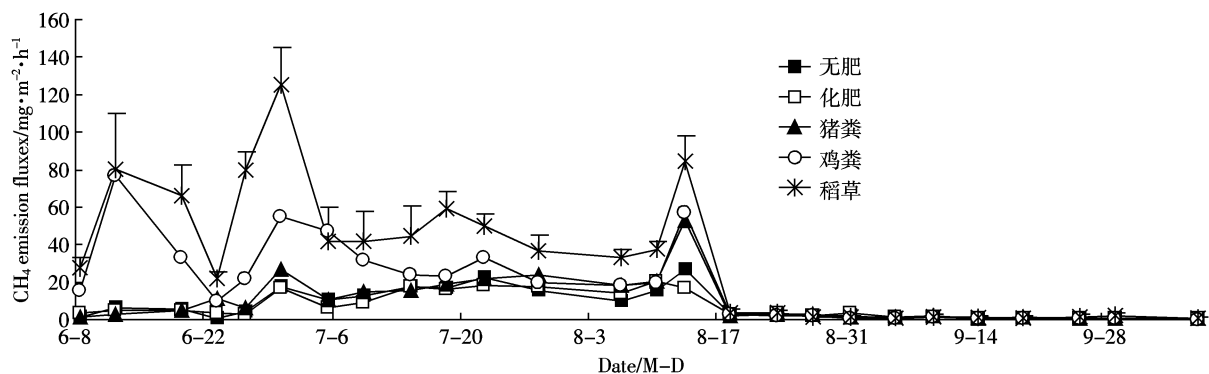


图 1 不同施肥处理稻田 CH₄ 排放通量季节变化

Figure 1 The seasonal variation of CH₄ emissions from rice paddy

2.2.2 氧化还原电位(Eh)值

从施肥到 8 月 18 日,不同处理的 Eh 值在-131.3~-273.7 mV 之间,而之后的 Eh 均为正值。CH₄ 的排放通量也是在 8 月 18 日后显著下降,通过数据分析,用逻辑斯蒂模型拟合可见不同的施肥处理下(无肥、化肥、猪粪、鸡粪和稻草)CH₄ 的排放与 Eh 值呈显著正相关关系, $r=0.891\ 6、0.888\ 6、0.774\ 4、0.828\ 6、0.795\ 0$ ($n=18,P<0.01$)。

2.2.3 水分

由图 2 可见,在 8 月 18 日前,土壤的水层厚度都超过 1 cm,出现深的水层厚度与排放高峰几乎同步,当水层厚度消失,稻田的排放量也大大减少。但是整个水层的厚度与 CH₄ 排放通量之间没有相关性。

2.2.4 土壤 pH 值

测定土壤 5 cm 和 10 cm 处的 pH 值,分析可知 5 cm 和 10 cm 处的 pH 值呈显著正相关。以 5 cm 处 pH 值为例,CH₄ 集中排放前期(即 7 月 27 日前)pH 值在 6.5~7.3 之间,7 月 27 日至水稻收获 pH 值波动频繁,9 月 9 日之后 pH 值比较低,在 4.6~5.0 之间。相关分析显示 pH 值对稻田 CH₄ 排放变化的影响不明显。

2.3 水稻的全球增温潜势

以 100 a 为时间尺度,单位质量 CH₄ 的全球增温潜势 GWP(Global Warming Potential)为 CO₂ 的 25 倍。单位产量的 GWP 是指某一处理的 CH₄ 的 GWP 与经济产量的比值。计算无肥、化肥、猪粪、鸡粪和稻草还田处理单位产量的全球增温潜势(以 CO₂ 计算)^[8,10],分别为 0.61、0.61、0.83、1.44、2.43 kg·kg⁻¹。综合排放与产量因子,猪粪处理的单位产量 GWP 比化肥处理高 36.8%,但比稻草和鸡粪处理低。

3 讨论

3.1 施用肥料对 CH₄ 排放的影响

CH₄ 是在严格条件下产 CH₄ 菌作用于产 CH₄ 基质的结果,充足的产 CH₄ 基质和适宜的产 CH₄ 菌生长环境则是产 CH₄ 的先决条件。施用有机肥一方面为土壤产 CH₄ 菌提高了丰富的产 CH₄ 基质^[5];另一方面,淹水条件下有机肥的快速分解加速稻田 Eh 的下降,为产 CH₄ 菌的生长提供了适宜的环境,从而促进稻田 CH₄ 的排放。但 CH₄ 的排在很大程度上还取决于有机肥的种类、施用方式和施用时间^[9]。

表 3 稻田各个生育期 CH₄ 累计排放量的贡献率
Table 3 The percentage of methane accumulation emission flux during rice paddy

处理	施肥前		移栽返青期		分蘖期		孕穗期		齐穗期		灌浆成熟期	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
NF	15.3c	7.2	36.5c	17.2	83.8bc	39.5	39.5b	18.7	30.2a	14.1	6.8a	3.2
MF	16.2c	7.1	30.2c	13.6	77.6c	36.6	53.7b	25.5	32.0a	14.8	5.2a	2.3
PM	10.8c	4.0	56.7c	20.3	91.8bc	31.7	60.5b	20.8	65.6a	20.4	8.5a	2.7
CM	151.2b	29.3	134.1b	25.9	117.1b	22.7	59.4b	11.5	49.6a	9.5	5.3a	1.0
RS	209.1a	22.7	270.3a	29.7	217.5a	23.9	110.1a	12.6	98.8a	9.9	10.5a	1.2

注:F 为各生育期内的累计 CH₄ 排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹;P 为各生育期内累计 CH₄ 排放通量的百分比,%。

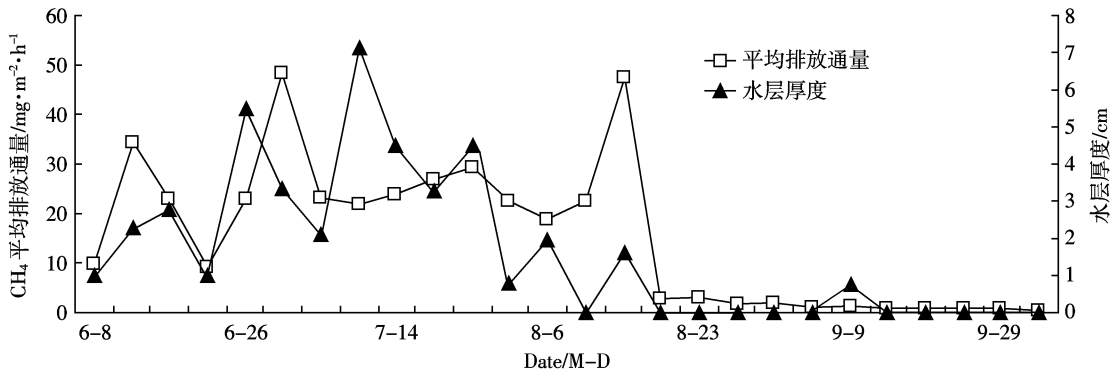


图 2 CH₄ 平均排放通量与水层厚度的关系
Figure 2 The connection of seasonal variation of CH₄ emissions and the water depth

作为一种重要的有机肥资源,稻草直接还田可以改善土壤结构,提高有机质含量,但是不同的稻草还田方式对 CH₄ 排放的影响也不同,本研究中,稻草是剪成 20 cm 的小段,施入土壤的 20 cm 处,与土壤很好的接触,给产甲烷菌提供了丰富的产 CH₄ 基质,因而加大了 CH₄ 的排放。有机肥的施用时间也是影响稻田 CH₄ 排放的主要因素之一^[9],试验中稻草和鸡粪施用 20 d 内的 CH₄ 排放占整个施肥和水稻生产的 1/5,这说明施用稻草和鸡粪,加上土壤淹水,使稻草中易分解的物质迅速分解,导致前期的排放量增加。

有机肥施用后的 20 d 内,鸡粪和稻草的 CH₄ 排放量大,显著高于猪粪处理。这可能与有机肥的有机碳有一定的关系,稻草的有机碳高于鸡粪和猪粪,比猪粪的含量高 130.5%;加上猪粪和鸡粪都进行了堆腐,可能腐熟程度有差异,猪粪中大部分以大分子有机碳存在,前期分解的中间产物和小分子有机碳较少,而稻田中后期烤田提高了土壤 Eh,抑制了部分中间产物和小分子化合物向 CH₄ 转化^[10],这致使施用猪粪处理稻田的甲烷排放比稻草和鸡粪处理少。本研究中鸡粪的有机质含量比猪粪高,而鸡粪的 C/N 比猪粪低,低的 C/N 致使有机物更容易被微生物分解,促使鸡粪比猪粪的 CH₄ 排放量增加。

在移栽后的 1 周,所有处理的排放量达到高峰,可推断出水稻在移栽后的 1 周排放最高。在水稻的前期生长中,由于稻田淹水厌氧,有机肥的大量施用,给产甲烷微生物提供了良好的生长环境,导致 CH₄ 的排放量剧增。而在水稻的生长后期,水稻的生长减缓,加上水稻的晒田,稻田中水溶性有机碳的耗尽,稻田处于好氧状态,致使 CH₄ 在后期排放大大减少,且不同的施肥处理没有差异。

3.2 环境因素对排放的影响

稻田 CH₄ 排放是由 CH₄ 的产生、氧化和传输共同作用的结果,其中涉及一系列微生物、物理和化学过程^[11-12],与此相关联的任何因素都会影响稻田 CH₄ 的产生和排放。一般认为,稻田 CH₄ 排放与土壤、气候、农业管理措施以及生物等因素有很大的关系^[10]。就一季稻田而言,稻田的温度、氧化还原电位、pH 值和水分等变化均影响稻田 CH₄ 的排放。

土壤温度是影响稻田 CH₄ 排放的重要环境因子,土壤温度直接影响有机质的分解及 CH₄ 产生、氧化过程所涉及的一系列微生物菌群的数量、种群结构和活性^[13],同时也影响 CH₄ 排放^[14]。大多数产甲烷菌活动的最适温度为 35~37 ℃,温度低于最适温度时,产甲

烷菌的活性随土壤温度升高而提高,因此 CH₄ 排放与土壤温度有密切关系^[15-16]。我们研究证实土壤的温度与排放显著相关,与石生伟等和刘金剑等的研究结果一致^[17-18]。但是也有研究指出,虽然观测到稻田排放与温度变化具有相同的变化趋势,但稻田 CH₄ 排放与温度之间并不存在简单的相关关系^[19]。可能的原因是在稻田生态系统中,由于影响稻田排放的因子很多,环境因子之间具有复杂的交互作用^[12],而在本研究中一季稻的稻田的生长季节土温在 20.87~30.33 ℃ 之间,在此温度范围内,随温度的增加而 CH₄ 排放量增加^[20]。因此,环境温度因子比较突出,致使温度是引起 CH₄ 季节排放的主要因子。

CH₄ 是极端厌氧条件下产甲烷菌作用于产甲烷基质的结果,土壤 Eh 是影响土壤 CH₄ 排放的重要因素之一^[21]。土壤的 Eh 与 CH₄ 的排放之间呈明显的消长关系^[18]。当土壤氧化还原电位低于 -150~-160 mV 时,产甲烷菌开始明显活动排出 CH₄^[22],而当土壤 Eh 为正值时,稻田还是排放出一定数量的 CH₄^[23]。

稻田水层起着密闭作用,造成土壤缺氧,从而影响土壤 CH₄ 的产生、氧化及向大气的排放,水层深度和 CH₄ 的排放也存在一定关系^[24]。本研究发现,虽然水层深度深时,CH₄ 排放量大,但没有明显的相关性。但是不同的研究有不同的结果,Lindau 等的研究认为^[19],CH₄ 的排放通量与水层深度之间不存在相关关系。但也有研究认为,灌溉水层在 10 cm 以下,CH₄ 的排放量随着水深的增加而增加,超过 10 cm 则排放量反而下降^[25]。

土壤 pH 值的高低反映土壤酸碱程度,产甲烷菌的活动受控于一定 pH 范围,在中性或微碱性中正常生长^[26],超出该 pH 值范围后,甲烷菌的活性会降低。Wang 等^[22]证实土壤 pH 值的微小变化可显著改变甲烷排放量。徐仁扣^[27]研究认为,酸性土壤淹水种植水稻后土壤 pH 值会上升。本试验前土壤 pH 值为 6.0,水稻生长前期的 pH 值在 6.5~7.3 之间。这与徐仁扣的研究一致。稻田土壤 pH 值的升高更接近产甲烷菌的正常生长范围,有利于产甲烷微生物的活动,而水稻的 CH₄ 主要排放时期也集中在水稻的生长前期,这也间接证实了甲烷菌的活性在此 pH 值范围增强。之后随着水稻种植过程中的晒田和干湿交替,pH 值变化波动频繁,在水稻的生长末期,稻田水分下降,而土壤 pH 值的测定随水土比的增加而升高^[28],致使后期 pH 值有下降,在 4.6~5.0 之间,稻田甲烷在生长后期排放减少,这证实了在低 pH 条件下产甲烷菌的活性

减低。

4 结论

(1)不同肥料施入稻田后,稻草处理的平均 CH_4 排放通量最大,达到 $31.04 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,其次是鸡粪,猪粪、化肥和无肥处理。稻草还田处理的季节累积排放量达到了 $916.30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,比化肥处理增加了 326.41% ($P < 0.05$),而猪粪和鸡粪处理分别比施化肥处理增加了 36.81% 和 140.44% ($P < 0.05$)。说明施用有机肥尤其是稻草直接还田显著增加 CH_4 排放通量。

(2)稻田 CH_4 排放受环境因子的影响。稻季土壤 5 cm 和 10 cm 处的温度在 $20.87 \sim 30.33 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,不同的施肥处理 CH_4 季节排放通量与土温的变化呈显著正相关关系;稻田 Eh 值在 $-131.3 \sim -273.7 \text{ mV}$ 时排放大量 CH_4 ,不同的施肥处理 CH_4 的排放与 Eh 值呈显著正相关关系;水分出现深的水层厚度与排放高峰几乎同步,当水层厚度消失,稻田的排放量也大大减少。但是整个水层的厚度与 CH_4 排放通量没有相关性。稻田 pH 值在 $6.5 \sim 7.3$ 时排放甲烷多, pH 低于 5.0 排放甲烷减少。

(3)稻田单位产量的 GWP 指标能较好地反映环境效益与生产效益的协调统一。猪粪处理的稻谷产量和单位产量 GWP 都比化肥和无肥处理高,而单位产量 GWP 比稻草和鸡粪处理低,较好地协调了 CH_4 排放与经济效益的关系,因而是值得推荐的施肥处理。

参考文献:

- [1] Bouwman A F. Soils and the greenhouse effect[M]. New York, USA: John Wiley and Sons Inc., 1990: 25–32.
- [2] Frankenberg C, Meirink J F, van Weele M, et al. Assessing methane emissions from global space-borne observations[J]. *Science*, 2005, 308: 1010–1014.
- [3] Sass R L, Fisher M F. Methane emissions from rice paddies: A process study summary[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 119–127.
- [4] Cicerone R J, Delwiche C C, Tyler S C, et al. Methane emission from California rice paddies with varied treatments[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, 6: 233–248.
- [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[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(D13): 16405–16416.
- [6] WANG Zhen-ping, Ronald D, Delaune, et al. Methane production from anaerobic soil amended with rice straw and nitrogen fertilizers[J]. *Fertilizer Research*, 1992, 33: 115–121.
- [7] ZHENG Xun-hua, Wang Ming-xing, Wang Yue-si, et al. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields[J]. *Advances Atmospheres Science*, 1998, 15(4): 569–579.
- [8] IPCC, 2007 Contribution of Working Group 1 to the Forth Report of the Intergovernmental Penal on Climate Change [R/OL]. (2007–11–17) [2011–1–11]. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_cn.pdf
- [9] 马 静, 徐 华, 蔡祖聪. 施肥对稻田甲烷排放的影响 [J]. 土壤, 2010, 42(2): 153–163.
MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong. Effect of fertilization on methane emissions from rice fields[J]. *Soils*, 2010, 42(2): 153–163.
- [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, 24(4): 7–12.
ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH_4 and N_2O emissions from rice paddy[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4): 7–12.
- [11] Bosse U, Frenzel P. Methane emissions from rice microcosms: The balance of production, accumulation and oxidation[J]. *Biogeochemistry*, 1998, 41(3): 199–214.
- [12] 黄 耀. 地气系统碳氮交换: 从实验到模型[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 10–13.
HUANG Yao. The exchange of carbon and nitrogen between earth with atmosphere: From experiment to model[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 10–13.
- [13] Schimel J, Gullledge J. Microbial community structure and global trace gases[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 745–758.
- [14] Yagi K, Minami K, Ogawa Y. Effects of water percolation on methane emission from rice paddies: A lysimeter experiment[J]. *Plant and Soil*, 1998, 198(2): 193–200.
- [15] 孙文涛, 肖千明, 娄春荣, 等. 土壤中甲烷的形成、排放及影响因素 [J]. 杂粮作物, 2000, 20(5): 44–47.
SUN Wen-tao, XIAO QIAN-ming, LOU Chun-rong, et al. Study on the formation, emission and effect of methane of soil[J]. *Rain Fed Crops*, 2000, 20(5): 44–47.
- [16] 蒋艳艳, 黄 耀, 宗良纲. 稻田土壤理化特性对 CH_4 排放的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 27–29.
JIANG Jing-yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang. Influence of paddy soil properties on CH_4 emission[J]. *Soil and Environment Sciences*, 2001, 10(1): 27–29.
- [17] 石生伟, 李玉娥, 秦晓波, 等. 不同施肥处理对红壤晚稻 CH_4 排放的影响[J]. 生态与环境学报, 2010, 26(2): 103–108.
SHI Sheng-wei, LI Yu-e, QIN Xiao-bo, et al. CH_4 emission from late rice field of red clay soil under different fertilization treatments [J]. *Journal of Ecology Rural Environment*, 2010, 26(2): 103–108.
- [18] 刘金剑, 吴萍萍, 谢小立, 等. 长期不同施肥制度下湖南红壤晚稻田 CH_4 的排放[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2878–2886.
LIU Jin-jian, WU Ping-ping, XIE Xiao-li, et al. Methane emission from late rice fields in Hunan red soil under different long-term fertilizing systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2878–2886.
- [19] Lindau C W, Bollich P K, Delaune R D, et al. Effect of urea fertilizer

- and environmental factors on CH₄ emissions from a Louisiana, USA rice field[J]. *Plant and Soil*, 1991, 136(2): 195–203.
- [20] Schütz H, Wolfgang S, Conrad R. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields[J]. *Biogeochemistry*, 1990, 11(2): 77–95.
- [21] 徐 华, 蔡祖聪, 李小平. 土壤 Eh 和温度对稻田甲烷排放季节变化的影响[J]. 农业环境保护, 1999, 18(4): 145–149.
XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping. Effect of soil Eh and temperature on seasonal variation of CH₄ emission from rice field [J]. *Agro-environmental Protection*, 1999, 18(4): 145–149.
- [22] Wang Z P, Delaune R D, Masscheleyn P H, et al. Soil redox and pH effects on methane reduction in flooded rice soil[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1993, 57: 382–385.
- [23] Yagi K, Minami K. Effects of organic matter applications on methane emission from some Japanese paddy fields[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1990, 36: 599–610.
- [24] 上官行健, 王明星. 稻田 CH₄ 排放的控制措施 [J]. 地球科学进展, 1993, 8(5): 55–62.
SHANGGUAN Xing-jian, WANG Ming-xing. Possible measures for the reduction of methane emission from rice paddy fields[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1993, 8(5): 55–62.
- [25] 上官行健, 王明星. 稻田甲烷排放影响因子的研究进展 [J]. 中国农业气象, 1993, 14(4): 48–53.
SHANGGUAN Xing-jian, WANG Ming-xing. A study on the influencing factors for methane emission from rice fields[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1993, 14(4): 48–53.
- [26] Garcia J L, Patel B K, Ollivier B. Taxonomic, phylogenetic and ecological diversity of methanogenic Archaea[J]. *Anaerobe*, 2000, 6(4): 205–226.
- [27] 徐仁扣. 江西省余江县水稻土的 pH 状况 [J]. 江西农业大学学报, 2003, 25(6): 863–864.
XU Ren-kou. The pH status of paddy soils in Yujiang county, Jiangxi Province[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2003, 25(6): 863–864.
- [28] Xu R K, Zhao A Z, Li Q M, et al. Acidity regime of the red soils in a subtropical region of Southern China under field conditions[J]. *Geoderma*, 2003, 115(1, 2): 75–84.