

# 猪粪与沼气渣对双季稻田甲烷排放的影响

陈 苇<sup>1</sup>, 卢婉芳<sup>1</sup>, 段彬伍<sup>1</sup>, Wassmann R<sup>2</sup>, Lantin R S<sup>2</sup>

(1. 中国水稻研究所, 杭州, 310006; 2. 国际水稻研究所, 菲律宾马尼拉)

**摘要:** 随着环境温度的升高, 稻田甲烷排放通量增加。早稻期间甲烷排放通量随着水稻生育期的增加而逐步加快, 而晚稻甲烷排放主要集中在水稻生长的前中期, 而且排放量很高。一天中甲烷排放具有很强的周期性, 在 6:00~8:00 时, 甲烷排放通量进入谷底, 14:00 时甲烷排放通量达到峰值。稻田甲烷排放通量与土壤 5cm 处的温度及土壤水溶解甲烷含量具有较高的相关性。猪粪和沼气渣的施用分别提高稻田甲烷排放量 22.14% 和 4.40%。在早稻期间, 施用猪粪和沼气渣分别提高土壤水溶解甲烷含量 40.3% 和 11.9%, 而晚稻期间仅分别提高 23.9% 和 5.04%。

**关键词:** 稻田; 甲烷排放; 溶解甲烷; 猪粪; 沼气渣

## Impacts of application of pig manure and biogas sludge on methane emissions in the double-cropping ricefields

CHEN Wei<sup>1</sup>, LU Wan-Fang<sup>1</sup>, DUAN Bin-Wu<sup>1</sup>, Wassmann R<sup>1</sup>, Lantin R S<sup>2</sup> (1. *China National Rice Research Institute, Hangzhou, 310006, China*; 2. *International Rice Research Institute, Manila, Philippines*)

**Abstract:** With the increase of environmental temperature, the rate of methane emission is increased in ricefields. It is increased gradually with the processing of plant growing in the early rice. Most of methane is emitted with high rates during the early stage of plant growth in the late rice. The diel methane emission showed a regular pattern, with the valley at 6:00~8:00 and the peak at 14:00. This rate is closely related to both the soil temperature and the content of the water-soluble methane at 5cm depth. The application of pig manure and biogas sludge is resulted in an increase of the methane emission rates by 22.14% and 4.40% respectively. The content of the water-soluble methane in the soil is also increased by using pig manure and biogas sludge, by 40.3% and 11.9% respectively in the early rice, while it is 23.9% and 5.04% respectively in the late rice.

**Key words:** rice field; methane emission; soluble methane; pig manure; biogas sludge

文章编号: 1000-0933(2001)02-0265-06 中图分类号: X511 文献标识码: A

甲烷(CH<sub>4</sub>)是大气中主要的几种温室效应气体之一, 在 80 年代甲烷对温室效应的贡献已达到 17%<sup>[1]</sup>。目前大气中平均甲烷浓度为 1.72ppmV, 每年以 0.8% 的速率增长<sup>[2,3]</sup>。甲烷作为一种重要的温室气体已越来越受到各国科学家和政府的重视。稻田是甲烷产生和排放的重要来源之一, 占全球甲烷排放总量的 12% 左右<sup>[4]</sup>, 世界稻田甲烷年总排放量达到 60Tg (1Tg=10<sup>12</sup>g)<sup>[5]</sup>。土壤淹水后土壤理化性质发生重大变化, 氧化还原电位(*Eh* 值)急剧下降, 一般土壤 *Eh* 值低于 -150mV 时土壤有机碳在土壤产甲烷细菌的作用下分解生成甲烷<sup>[6]</sup>。稻田甲烷的排放主要通过水稻植株和水层两个途径, 其中通过水稻根系吸收经植株而释放的甲烷量占稻田总排放量的 80% 左右<sup>[7]</sup>。稻田甲烷排放不但与土壤性质、温度、风速、水稻品种和施肥有很大关系, 而且田间的灌溉管理措施起着极其重要的作用<sup>[8,9]</sup>, 稻田甲烷排放与土层 5cm 处温度有着密切的关系<sup>[10,11]</sup>。

基金项目: 国际合作 UNDP-GEF 资助项目

收稿日期: 1998-11-16; 修订日期: 1999-09-29

作者简介: 陈 苇, 1963 年 10 月 20 日出生, 男, 成都人, 博士, 副研究员。主要从事稻田生态及稻田土壤-植株养分循环规律等研究。

水稻在我国广泛种植,在施肥方面又以有机、无机肥配施为特征,因此研究有机肥对稻田甲烷排放的影响,对认识我国稻田甲烷排放规律和探讨水稻高产、稻田甲烷排放减排技术有着重要的意义。有机肥通过沼气发酵在我国得以较广泛地应用,所残留的沼气渣是一种优质有机肥。采用沼气渣有机肥来减少稻田甲烷排放量也有一些报道,各种有机肥中沼渣肥的甲烷排放量最低<sup>[12,13]</sup>。有机肥的多级利用是减少稻田甲烷排放的一条重要途径。

## 1 材料和方法

试验于 1997 年在中国水稻研究所试验区进行。田间试验采用铝合金框架有机玻璃密封箱,规格为  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1.2\text{m}$ ,底面积  $1\text{m}^2$ ,插入土层  $2\text{cm}$  处,内装 2 只微型电扇以保持箱内空气均匀,其上盖开闭由计算机控制,箱内插入一不锈钢细管作为气样自动采样管。箱盖关闭后计时,每隔  $4\text{min}$  自动采集 1 次箱内空气样进入气相色谱仪测定其甲烷含量,重复 4 次,每  $2\text{h}$  循环 1 次,即  $1\text{d}$  12 个循环。同时每  $10\text{min}$  自动记录 1 次空气、土层  $5\text{cm}$ 、土层  $10\text{cm}$  处的温度值。以上过程全部由计算机控制和记录,连续监测水稻全生育期的甲烷排放动态。箱内水稻种植和田间管理与小区一致。另外,每周 3 次定时(9:00~10:00)分别采集土层  $5\text{cm}$ 、 $10\text{cm}$ 、 $15\text{cm}$  处的土壤水测定溶解甲烷含量,其方法为:在各取水样土层定点水平预埋高分子半透细管,采用真空试管吸液的方法采集各土层土壤水<sup>[11]</sup>。

田间试验供试水稻土为青紫泥,其理化特性为:pH 值 6.2;有机碳  $24.2\text{g/kg}$ ;全 N  $2.27\text{g/kg}$ ;CEC  $14.4\text{cmol/kg}$ ;质地粘壤。供试早稻品种为中辐 906,3 月 31 日播种,5 月 4 日移栽,每穴 4 本,7 月 20 日收获;供试晚稻品种为秀水 11,6 月 21 日播种,7 月 22 日移栽,每穴 3 本,11 月 17 日收获,两季水稻种植密度均为  $16.7\text{cm} \times 16.7\text{cm}$ 。小区面积为  $5 \times 5\text{m}^2$ ,试验重复 3 次。

试验设置 3 个肥料处理,早、晚稻处理一致,分别为尿素(T1)、尿素+猪粪(T2)和尿素+沼气渣(T3),其中,沼气渣为相同猪粪经沼气发酵后的残渣。各处理总施氮量均为每季  $120\text{kgN}/\text{hm}^2$ ,分 3 次施用,其中基肥占 50%,两次追肥各占 25%。猪粪和沼气渣的含氮量(干基)分别为 1.94%和 2.19%,有机碳含量(干基)分别为 36.02%和 29.06%,其用量均按  $20\text{kgN}/\text{hm}^2$  计算,早、晚稻均作基肥施用。P、K 肥分别采用过磷酸钙和氯化钾作基肥一次性施用,其纯用量均为  $30\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 肥料对早、晚稻田甲烷排放的影响

稻田甲烷排放与环境条件的变化有着十分密切的关系。稻田淹水后土壤中的产甲烷细菌活性迅速增强,土壤甲烷大量产生<sup>[6]</sup>。试验结果表明(图 1,2),环境温度的变化对稻田甲烷排放通量有较大的影响,但早稻和晚稻的甲烷排放通量受气温影响程度有所不同,晚稻受气温的影响较早稻大。更重要的是水稻生育期对稻田甲烷排放通量的变化起着更为重要的影响作用。在早稻种植期间,气温由低到高,随着水稻生物量的递增,甲烷排放通量也逐日升高,稻田在移栽后 30d 左右的分蘖盛期时达到甲烷排放较高水平。而晚稻种植期间,因移栽后的水稻营养生长期一直处于高温,水稻生物量累积快,甲烷排放迅速增加,移栽几日后达到并保持较高甲烷排放水平,随着田间控水和气温的下降,甲烷排放通量迅速降低到较低水平,并保持至收获。

试验结果表明,稻田淹水一周左右土壤  $5\text{cm}$  处的  $E_h$  值即降至  $-100 \sim -200\text{mV}$  范围内。由于土壤氧化还原电位下降,施入的有机肥经土壤厌氧微生物作用而逐渐降解,并大量产生甲烷,通过水稻植株和水面排放于大气中。早稻和晚稻因大田生长期间的季节差异,表现出早稻的甲烷排放量明显地比晚稻

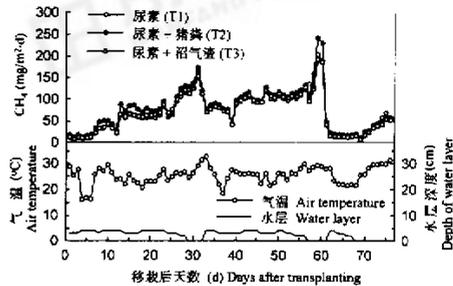


图 1 早稻甲烷排放、温度及稻田水层的动态变化  
Fig. 1 The seasonal patterns of methane emission, temperature and water layer depth of early rice

低(图 1,2),各处理早稻的甲烷日平均排放通量和全生育期平均排放总量分别为  $71.99 \pm 4.49\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$  和  $5.47 \pm 0.34\text{g/m}^2$ ,而晚稻分别高达  $134.28 \pm 16.70\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$  和  $15.71 \pm 1.95\text{g/m}^2$ ,分别比早稻提高 86.5%和 187.2%。猪粪和沼气渣的施用对稻田甲烷排放的影响各异,施用尿素(T1)、猪粪(T2)和沼气渣(T3)3个处理全年双季的日平均甲烷排放通量分别为  $100.83, 123.15$  和  $105.26\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$ ,猪粪处理的日平均甲烷排放通量明显地比其它两个处理高,并达到 5%水平的显著性差异,分别比尿素和沼气渣处理提高 22.14%和 17.00%。而沼气渣仅比尿素处理提高 4.40%,未达到显著性差异。

在早稻期间,猪粪的施用对稻田甲烷排放通量影响相对较小,仅比尿素处理的日平均甲烷排放通量  $69.74 \pm 3.23\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$  提高了  $7.42\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$ ,而晚稻施用猪粪则高达  $153.09 \pm 9.16\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$ ,比尿素处理提高了  $32.01\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 。施用沼气渣对晚稻的稻田甲烷排放略有提高,而对早稻无影响。这可能是由于猪粪经沼气发酵后,其中的易分解有机碳已分解,剩下的多为难分解有机碳,尽管沼气渣仍含有较高的有机碳,但施入稻田后在土壤中的分解较猪粪慢,故甲烷产生量减少。

### 2.2 温度的昼夜变化对稻田甲烷排放的影响

温度对稻田甲烷排放的昼夜变化起着极其重要作用,由于昼夜温差的周期性变化而引起甲烷排放通量也具有昼夜周期性的变化效应。从水稻整个大田生长期每日各时间的平均甲烷排放通量来看(表 1),在 8:00 时,甲烷排放通量最低,早稻和晚稻分别为  $2.37$  和  $4.86\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ ,至 14:00 甲烷排放达到高峰,分别为  $4.27$  和  $7.25\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 。甲烷排放通量的昼夜变化与气温、5cm 和 10cm 土温的昼夜变化均具有较高的正相关,其相关系数早稻分别为  $0.7534^*$ 、 $0.9540^{**}$  和  $0.7084^*$ ;晚稻分别为  $0.7247^*$ 、 $0.9586^{**}$  和  $0.9581^{**}$ 。其中,稻田 5cm 土温与甲烷排放通量的相关性最高,均达到极显著水平。

表 1 水稻大田生长期温度(°C)及甲烷排放的平均昼夜变化

Table 1 The diel patterns of average methane emission and temperature(°C) in the rice field

时间 (O'clock) Time	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
	空气	土壤 Soil		CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> ·h)	空气	土壤 Soil		CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> ·h)
		5cm	10cm			5cm	10cm	
0:00	20.8	23.5	23.5	2.60	16.7	19.1	19.8	5.22
2:00	20.3	23.0	23.2	2.57	16.2	18.7	19.5	5.14
4:00	19.8	22.6	22.9	2.47	15.9	18.3	19.1	5.01
6:00	21.3	22.2	22.5	2.41	16.3	18.0	18.9	4.98
8:00	26.8	22.3	22.3	2.37	21.0	18.0	19.0	4.86
10:00	31.0	23.1	22.7	2.88	26.3	19.0	19.7	5.36
12:00	32.2	24.8	23.3	3.68	28.8	20.4	20.9	6.44
14:00	31.8	26.2	24.1	4.27	28.2	21.5	21.6	7.25
16:00	29.8	26.2	24.5	4.12	24.4	21.6	21.6	6.95
18:00	26.2	25.6	24.6	3.37	19.9	20.9	21.1	6.23
20:00	23.1	24.9	24.4	3.01	18.2	20.1	20.6	5.60
22:00	21.8	24.2	24.0	2.76	17.2	19.5	20.1	5.33

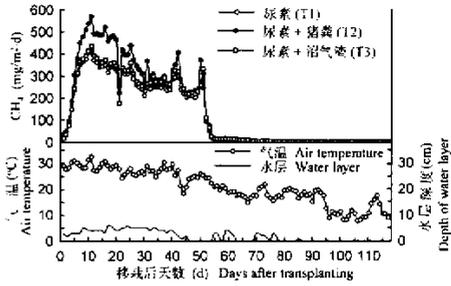


图 2 晚稻甲烷排放、温度及稻田水层的动态变化

Fig. 3 The seasonal patterns of methane emission, temperature and water layer depth of late rice

### 2.3 水稻大田生长期的稻田土壤水甲烷含量的变化

在整个水稻生长季节中,土壤水溶解甲烷含量变化较大。试验表明(表 2),早稻在移栽 30d 内的水稻分蘖期,耕层土壤水溶解甲烷平均含量一直保持在  $2\sim 3\mu\text{g}/\text{ml}$  相对稳定的水平上,晒田后溶解甲烷含量很快下降,复水后溶解甲烷含量又逐步上升,至第 2 次晒田前达到  $6.58\mu\text{g}/\text{ml}$  的峰值,之后因晒田的影响,土壤溶解甲烷迅速降低。而晚稻在整个水稻分蘖期均处于高温,耕层土壤水溶解甲烷平均含量一直保持在  $4\sim 6\mu\text{g}/\text{ml}$  的较高水平,波动相对较小,移栽后 45d 因晒田的影响溶解甲烷含量骤然下降到最低,而且在以后的水稻各生长期一直保持很低的水平。

表 2 稻田耕层中土壤水平均溶解甲烷含量( $\mu\text{g}/\text{ml}$ )

Table 2 The average concentrations of soil dissolved methane at plow layers of the rice field

早稻 Early rice					晚稻 Late rice				
移植后天数(d) Days after transplanting	T1	T2	T3	平均 Average	移植后天数(d) Days after transplanting	T1	T2	T3	平均 Average
5	2.37	2.86	2.73	2.65	3	2.82	4.95	3.76	3.84
8	2.24	3.01	2.33	2.53	6	5.3	6.60	5.25	5.72
10	2.31	3.56	3.17	3.01	8	5.33	7.45	5.32	6.03
12	2.49	3.56	2.36	2.80	10	5.63	6.93	5.16	5.91
15	2.30	3.02	2.37	2.56	13	5.61	6.25	6.05	5.97
17	2.13	3.32	2.23	2.56	15	4.37	5.29	4.51	4.72
19	2.17	2.95	2.17	2.43	17	4.83	5.82	4.57	5.07
22	1.95	2.57	2.17	2.23	20	4.32	5.13	4.30	4.58
24	2.00	3.32	2.28	2.53	22	4.32	5.22	4.17	4.57
26	1.73	2.64	2.12	2.16	24	3.97	4.76	4.44	4.39
29	1.69	2.71	1.89	2.10	27	4.23	5.03	4.01	4.42
31	1.46	2.41	2.00	1.96	29	3.68	4.50	4.19	4.12
33	0.41	0.59	0.35	0.45	31	4.00	4.86	4.11	4.32
36	1.04	1.46	1.18	1.23	34	4.18	4.50	4.34	4.34
38	1.21	1.48	1.85	1.51	36	3.93	4.76	3.63	4.11
40	1.87	2.35	2.38	2.20	38	4.44	5.00	4.17	4.54
43	2.15	2.40	1.85	2.13	41	3.59	4.89	4.00	4.16
45	3.22	4.21	3.39	3.61	43	4.16	5.87	5.04	5.02
47	2.94	3.81	3.42	3.39	45	4.09	6.16	4.86	5.04
50	3.12	4.74	3.71	3.86	48	4.70	5.95	5.29	5.31
52	3.76	5.14	4.09	4.33	50	4.91	5.46	5.19	5.19
54	3.96	5.49	4.21	4.55	52	0.94	1.37	1.14	1.15
57	4.72	8.34	6.67	6.58	55	0.02	0.02	0.03	0.02
59	4.64	6.55	5.60	5.60	57	0.14	0.11	0.25	0.17
61	1.84	2.23	1.06	1.71	59	0.28	0.22	0.42	0.31
64	1.59	1.48	1.23	1.43	62	0.45	0.25	0.44	0.38
66	0.90	1.40	0.99	1.10	64	0.39	0.27	0.61	0.42
68	1.04	1.61	1.15	1.27	66	0.38	0.24	0.44	0.35
71	1.28	1.50	1.22	1.33	69	0.01	0.01	0.08	0.03
73	1.53	2.16	1.76	1.82	76	0.15	0.08	0.20	0.14
75	2.18	2.88	2.40	2.49	83	0.00	0.00	0.00	0.00
平均 Average	2.20	3.09	2.46			3.07	3.80	3.22	

\* 土壤水溶解甲烷含量为土层 5cm、10cm 和 15cm 处的平均值;T1:尿素;T2:尿素+猪粪;T3:尿素+沼气渣

施用有机肥使土壤水中的溶解甲烷含量显著地升高(表 2)。早稻移栽后,土壤水溶解甲烷含量逐步上升,至栽后 57d,尿素(T1)、尿素+猪粪(T2)和尿素+沼气渣(T3)3 个处理耕层土壤水的平均溶解甲烷含量均达到峰值,分别为  $4.72$ 、 $8.34$  和  $6.67\mu\text{g}/\text{ml}$ 。在整个早稻生育期中 3 个处理在测定期间的各日平均溶解甲烷含量分别为  $2.0\pm 1.03$ 、 $3.09\pm 1.63$  和  $2.46\pm 1.35\mu\text{g}/\text{ml}$ ,T2 和 T3 分别比 T1 提高 40.3%和 11.9%,以猪粪处理为最高,而在晚稻种植期间也具有基本相同的结果,其全生育期 T1、T2 和 T3 的耕层

平均溶解甲烷含量分别为  $3.07 \pm 2.05$ 、 $3.80 \pm 2.59$  和  $3.22 \pm 2.08 \mu\text{g/ml}$ ，T2 和 T3 分别比 T1 提高 23.9% 和 5.04%，同样以猪粪处理为最高，经方差分析，除 T1 和 T3 之间未达到显著差异以外，其它处理间均达到极显著水平。

### 2.4 土壤中溶解甲烷含量与稻田甲烷排放的关系

土壤中的甲烷主要是通过水稻根系吸收转运至植株地上部分而释放于大气中，稻田甲烷排放通量很大程度上受土壤溶解甲烷含量的影响，一般情况下，溶解甲烷含量与甲烷排放量呈正比。结果表明(图 3)，甲烷排放通量的动态走势与耕层中各层的土壤水溶解甲烷含量均具有较好的相关性，尤其与土层 5cm 处的溶解甲烷含量具有极高的正相关。水稻根系一般主要分布在土层 0~10cm 范围，该区域土壤水中的溶解甲烷即成为稻田甲烷排放的重要来源。但是，早、晚稻由于所处环境条件的不同，土壤水溶解甲烷含量和甲烷排放之间的相关性表现出较大的差异。在早稻种植期间，土层 5cm 处的溶解甲烷含量与甲烷排放通量相关系数达到  $0.681^*$ ，随着土层深度增加其相关性趋低，土层 10 和 15cm 处分别为 0.480 和 0.333；而晚稻有所不同，其土壤耕层的各层溶解甲烷含量与甲烷排放通量均呈极显著正相关( $r=0.881 \sim 0.945$ )。另外，早稻期间土层 5、10 和 15cm 处各处理全季的平均溶解甲烷含量分别为  $1.91 \pm 1.44$ 、 $2.81 \pm 1.42$  和  $3.04 \pm 1.28 \mu\text{g/ml}$ ，5cm 处的溶解甲烷含量比 10 和 15cm 处平均低 34.8%，而晚稻土层 5、10 和 15cm 处分别为  $2.87 \pm 2.05$ 、 $3.52 \pm 2.34$  和  $3.71 \pm 2.35 \mu\text{g/ml}$ ，5cm 处的溶解甲烷含量仅比 10 和 15cm 处平均低 20.6%。两季水稻的土层 10cm 以下土壤水溶解甲烷含量均较高，而 10cm 以上土层的溶解甲烷含量较低，尤其以早稻表现更为突出。这与土壤各层的甲烷产生速率及水稻根系对甲烷的吸收有着密切地关系。其原理有待进一步研究。

以上情况可能由以下几方面原因所至，首先，早稻期间随着水稻的生长，环境温度由低到高，而土层温度较低，水稻根系相对不发达；而晚稻种植期间则不同，其环境温度由高到低，特别是营养生长期一直处于高温，根系生长旺盛，根系发达。其次，早稻前期的营养生长速率偏低，水稻蒸腾作用不强，土壤中的质流速率较小，造成耕层下部土壤水溶解甲烷难于进入上层根系密集区；而晚稻则相反，水稻营养生长旺盛，高温引起强烈的蒸腾作用，加快了土壤中的质流速率，使耕层下部的溶解甲烷能更多地移动至耕层上部，所以表现为耕层中的土壤水溶解甲烷含量相对均匀。

根据上述结果，稻田甲烷排放通量与土壤 5cm 温度及 5cm 处土壤水溶解甲烷含量具有较高的相关性，对其进行回归分析，结果如下：

$$\text{早稻 } Y = 20.177X_1 + 4.546X_2 - 71.341 \quad (r^2 = 0.498^{**})$$

$$\text{晚稻 } Y = 38.8X_1 + 16.77X_2 - 281.901 \quad (r^2 = 0.849^{**})$$

其中，Y 为甲烷排放通量 ( $\text{CH}_4 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ )； $X_1$  为土壤 5cm 处土壤水溶解甲烷含量 ( $\mu\text{g/ml}$ )； $X_2$  为土壤 5cm 温度 (C)。

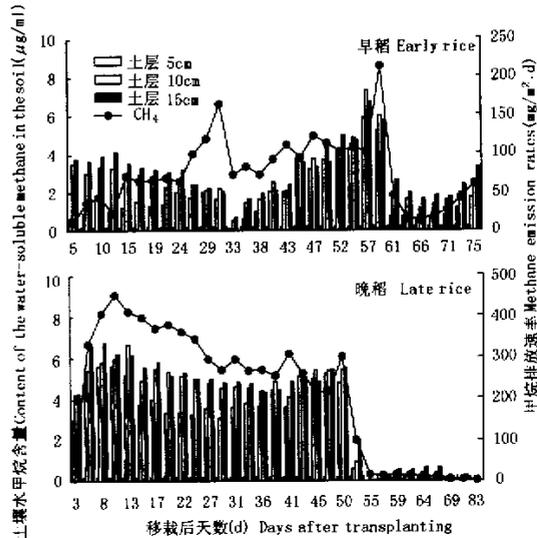


图 3 3 个处理各土层土壤水平均溶解甲烷含量与平均甲烷排放通量比较

Fig. 3 The comparison of average content of water-soluble methane in different soil layers with the average rate of methane emission in three treatment

### 3 结论

(1)随着环境温度的升高,稻田甲烷排放迅速增加。早稻期间甲烷排放通量随着水稻生育期的增加而逐步加快,而晚稻甲烷排放主要集中在水稻生长的前中期,而且排放量很高。

(2)猪粪的施用明显提高了耕层土壤水溶解甲烷含量,同时显著地提高了稻田甲烷排放量,而沼气渣的施用对提高土壤水溶解甲烷含量和甲烷排放量不明显。

(3)土壤 5cm 处温度的昼夜周期性变化与稻田甲烷排放的昼夜周期性变化具有高度的相关性。

(4)甲烷排放通量的动态变化与土壤 5cm 处的温度和溶解甲烷含量均具有极高的正相关。

### 参考文献

- [ 1 ] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change: Intergovernmental Panel on Climate Change-Scientific Assessment*, Cambridge University Press, New York, 1990.
- [ 2 ] Lelieveld J, Crutzen P J, Bruhl C. Climate effects of atmospheric methane. *Chemosphere*, 1993, **26**: 739~768.
- [ 3 ] United States Environmental Protection Agency. *Greenhouse gas emissions from agriculture*. Office of Policy Analysis, US-EPA, Washington D C, 1990. 1.
- [ 4 ] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change*. The supplementary report to the IPCC scientific assessment, Cambridge University Press, New York, 1992.
- [ 5 ] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change*. 1994, Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios, Cambridge University Press, New York, 1994.
- [ 6 ] Patrick Jr W H, Reddy C N. Chemical changes in rice soils. *Soil and Rice*. International Rice Research Institute, Manila, Philippines, 1978, 361~380.
- [ 7 ] IRRI. IRRI studies role of ricefield methane in global climate change. *The IRRI Report*, 1994, **4**: 1~2.
- [ 8 ] Denier van der Gon H A C, Breemen N, Neur H U, *et al.* Release of entrapped methane from wetland rice fields upon soil drying. *Global Biogeochemical Cycles*. , 1996, **10**: 1~9.
- [ 9 ] Wassmann R, Neue H U, Lantin R S, *et al.* Temporal patterns of methane emissions from wetland rice fields treated by different modes of N-application. *J. Geophys Res.* , 1994, **99**: 457~462.
- [ 10 ] Yagi K, Minami K. Effects of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy field. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1990, **36**(4): 599~610.
- [ 11 ] 陈 苇, 郭望模, 卢婉芳, 等. 灌溉与绿肥对稻田土壤甲烷释放能力的影响. *中国水稻科学*. 1997, **11**(1): 39~43.
- [ 12 ] 谢小立, 王卫东, 上官行健. 施肥对稻田甲烷排放的影响. *农村生态环境(学报)*. 1995, **11**(1): 10~14.
- [ 13 ] 陶 战, 杜道灯, 周 毅. 稻田施用沼渣对甲烷排放通量的影响. *农业生态环境(学报)*. 1994, **10**(3): 1~5.