

# 广东清远早、晚稻稻田甲烷排放的观测研究

许 黎<sup>1</sup> 任万辉<sup>2</sup> 杨 宁<sup>3</sup> 王天龙<sup>3</sup> 刘锦奎<sup>4</sup>  
M A K Khalil<sup>5</sup> R A Rasmussen<sup>6</sup> M J Shearer<sup>5</sup>

- (1. 中国气象局气候研究开放实验室,北京,100081;2. 辽宁省沈阳市环境监测中心;  
3. 广东省清远市气象局;4. 广东省气象局气候与农业气象中心;  
5. Department of Physics, Portland State University, Portland, Oregon, 97207-0751, USA;  
6. Oregon Health & Science University, OGI School of Science, Oregon, 97291-1000, USA)

**提 要:** 分析了 2003、2004 年广东省清远市郊区早、晚稻稻田甲烷(CH<sub>4</sub>)的排放通量,结果表明:广东清远早、晚稻稻田 CH<sub>4</sub> 排放通量的几何平均值 2003 年为 4.38mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>和 6.09mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>;2004 年为 5.17mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>和 8.3mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,土壤有机质含量是造成 2003 和 2004 年 CH<sub>4</sub> 排放差异的原因之一。水稻品种的不同,CH<sub>4</sub> 排放通量也有所不同,实验表明,水稻品种“七丝尖”的排放通量比品种“金优 99”高 1.08mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,产量却只有 64%。此外,与相关的测量结果进行初步比较。

**关键词:** 土壤有机质含量 CH<sub>4</sub> 排放 稻田

## Methane Emissions from the Early and Late Rice Fields of Qingyuan, Guangdong

Xu Li<sup>1</sup> Ren Wanhui<sup>2</sup> Yang Ning<sup>3</sup> Wang Tianlong<sup>3</sup> Liu Jinluan<sup>4</sup>  
Ma k , Khalil<sup>5</sup> R. Rasmussen<sup>6</sup> and M. Shearer<sup>5</sup>

- (1. National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China;2. Shenyang Enviromental Mornitoring Center;  
3. Qingyuan Meteorological Office; 4. Guangdong Meteorological Bureau; 5. Department of Physics, Portland State University, Portland, Oregon, 97207-0751, USA; 6. Oregon Health & Science University, OGI School of Science, Oregon, USA)

**Abstract:** CH<sub>4</sub> emission fluxes from early and late rice fields in Qingyuan suburbs of Guangdong Province during the period of 2003—2004 were analyzed. The experimental site is located in the vil-lages of Longjing and Liwei of northwest of Guangzhou City. A static chamber method is used for the measurement of CH<sub>4</sub> emission. Air samples in the field box were analyzed using a gas

资助项目:中国科技部和美国能源部合作项目《气候科学》第 3 课题“农田温室气体排放”,资助编号:DE-FG03-01ERG63262 和 DE-FG02-04ER63913)

收稿日期:2006 年 7 月 17 日; 修定稿日期:2007 年 1 月 24 日

chromatograph equipped with a flame ionization detector (GC/FID GOW-MAC, series 350) in a laboratory of Qingyuan Meteorological Station. The average fluxes of  $\text{CH}_4$  emission for rice crop acreage during the early and late rice growing seasons were  $4.38$  and  $6.09 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  in 2003,  $5.17$  and  $8.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  in 2004.  $\text{CH}_4$  emission and the rice yield had some differences for different rice cultivar. Rice variety "Qisijian" has not only higher  $\text{CH}_4$  emission (higher by  $1.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) but also a lower yield (0.64 times yield) compared with rice variety "Jinyou 99". Therefore, the choice of the rice variety which has less  $\text{CH}_4$  emission and more yield is a good way to mitigate  $\text{CH}_4$  emission.

**Key Words:** organic substance content  $\text{CH}_4$  emission rice fields soil

## 引 言

甲烷在工业革命前的大气浓度约为 700ppb, 到 2003 年全球平均大气浓度为 1787ppb。大量的测量资料表明: 全球平均大气  $\text{CH}_4$  浓度的年增长速率由 1980 年代的十几 ppb 到近十几年的几个 ppb, 有明显下降。世界温室气体资料中心给出 1984—1990 年全球平均的年增长速率为  $11 \text{ ppb/a}$ , 1991—2003 年为  $5 \text{ ppb/a}$ <sup>[1]</sup>。大气  $\text{CH}_4$  浓度的变化直接与其排放源和清除汇有关, 人类活动排放的  $\text{CH}_4$  占到总排放量的  $60\% \sim 80\%$ , 由于水稻产量与世界人口的增加及人类社会的发展有着密切的关系, 因此稻田  $\text{CH}_4$  排放被认为是人类活动引起大气  $\text{CH}_4$  浓度增加的重要生物源之一<sup>[2]</sup>。稻田实地测量开展最早的是美国和欧洲, 这些测量为全球  $\text{CH}_4$  排放量的估算提供了原始的数据。但是, 这两个地区稻田的总面积还不到全球的  $2\%$ , 从分布上讲, 全球大约  $90\%$  以上的水稻面积分布在亚洲<sup>[3]</sup>, 因此, 亚洲地区稻田  $\text{CH}_4$  的排放特征及规律的实际测量和研究特别重要, 尤其是印度和中国, 其 2000 年的水稻种植面积分别为  $4436.11$  和  $3030.15$  公顷, 位于各国水稻种植面积的第一、二位<sup>[4]</sup>。1980 至 1990 年代, 各国科学家对稻田  $\text{CH}_4$  排放的连续测量和分析研究发现<sup>[3,5-8]</sup>, 各地

稻田  $\text{CH}_4$  排放有很大的差别, 并且, 稻田的  $\text{CH}_4$  排放通量在减少, 由于中国地域辽阔, 各地稻田的土壤特性、耕作习惯、气候条件等有很大的差异, 而稻田  $\text{CH}_4$  排放正是受上述多种因子的影响, 所以, 仔细地测量、分析稻田排放的  $\text{CH}_4$  仍然是非常必要的。课题组于 2003、2004 年在广东省三大农业保护区之一的清远市郊区早、晚稻稻田进行  $\text{CH}_4$  排放的测量, 本文分析了 2003、2004 年早、晚稻田  $\text{CH}_4$  排放的测量结果, 试验了不同水稻品种间排放通量的差异。

## 1 实验方法

稻田实验场地位于广东省清远市郊区山塘镇龙颈村(2003 年)和洲心镇沥尾村(2004 年), 约  $23^{\circ}40' \text{N}$ ,  $113^{\circ}01' \text{E}$ , 每年有 3 块实验田, 每块田有 3 个实验点, 周围有大片的稻田; 实验的时间是 2003 和 2004 年的早、晚稻生长季节; 稻田在上一年晚稻收割后到当年早稻移栽前没有种植任何农作物, 也没有淹水。需要说明的是, 2003 年的实验田在 2001 年前曾经是砖厂之后才又种水稻。为此, 2004 年将实验田移至沥尾村。

本实验采用水密封型可移动采样箱的静态箱法。静态箱法是目前国际、国内广泛使用的比较经济而可靠的测量通量的方法, 单点测量精度较高<sup>[9]</sup>。根据稻禾的生长情况,

采用两种不同高度的采样箱,低箱为 143cm × 143cm × 51cm,高箱为 143cm × 143cm × 101cm。每周一、周三、周五用针筒采集采样箱内的样品空气,每 3 分钟取样一次,连续取样 4 次,另在稻田上方采取 3 个稻田空气样品,用于分析稻田大气 CH<sub>4</sub> 浓度。测量时用采样箱将被测稻田罩起来,并保持箱内空气与外界没有任何交换,箱内有小电扇来混合其空气。稻田上方和采样箱中的样品空气在清远市气象局运用 GOW-MAC69-350 型氢火焰离子气相色谱仪(GC/FID)进行分析,得到相隔 3 分钟箱内样品空气 CH<sub>4</sub> 的浓度,GC/FID 工作时用的标准气体来自美国 Oregon Graduate Institute 提供的 1.7ppmv 的 CH<sub>4</sub> 标定气体。然后,根据被测气体浓度随时间的变化,用下式计算被罩表面的气体排放通量。

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} \frac{dC_t}{dt}$$

式中, $F$  是被测气体排放通量, $\rho$  是标准状态下的被测气体密度, $V$  是箱内空气体积, $A$  是箱子覆盖的面积, $T_0$  和  $P_0$  分别是标准状况下的空气绝对温度和气压, $P$  和  $T$  为实验地

采样时的大气气压和绝对温度, $C_t$  是  $t$  时刻箱内被测气体的体积混合比浓度, $t$  是采样时间<sup>[10]</sup>。

## 2 测量参数

在采集空气样品的同时,还测量记录与稻田 CH<sub>4</sub> 生成、排放有关的参数,如:箱内外空气温度、土壤温度(5cm 和 10cm 深)、稻田水的酸碱度(pH)、土壤的氧化还原电位(Eh)、稻田水位、稻田水面气泡、以及采样时的空气压力、风向、风速、云量等天气状况;在每个水稻生长季取两次土壤样品,土壤样品送广州华南农业大学环境科学与工程研究室分析,获得稻田土壤的参数(表 1)。辅助的测量参数有土壤质地以及粘土、沙、淤泥含量百分比;土壤容重(土表层 0~5cm 处);土壤表层(0~5cm)初始有机碳含量(kg · C · kg<sup>-1</sup>);施肥(日期、种类、数量);灌溉(灌、排水日期);农药(喷药日期、农药名和数量);气象事件(暴雨、台风等);稻禾株高、稻株的干产量、亩产量等。

表 1 早、晚稻田土壤特性和生长记录

		早稻 2003/2004	晚稻 2003/2004	华南农大实验场 <sup>[11]</sup>
土壤特性	有机质含量(g · kg <sup>-1</sup> )	5.91/22.47	7.81/24.23	26.69
	全氮含量(g · kg <sup>-1</sup> )	0.42/1.01	0.34/1.19	1.06
	全磷含量(g · kg <sup>-1</sup> )	0.86/1.06	0.86/1.05	0.45
	全钾含量(g · kg <sup>-1</sup> )	17.13/24.73	15.45/25.2	21.37
	pH 值	6.55/4.87	5.46/4.7	6.23
种植情况	水稻品种	三羊	第 I、II 块田种金优 99, 第 III 块田种七丝尖	粳籼
	2003 年	插秧:	插秧:	1994 年晚稻
	生长期	4 月 3 日/4 月 19 日	8 月 2 日/8 月 7 日	插秧:8 月 12 日
	2003/2004 年	收割:	收割:	收割:
		7 月 16 日/7 月 9 日	10 月 26 日/11 月 12 日	11 月 10 日

实验田土壤为赤红壤冲积土,耕作层深度约为 15~20cm。稻田土壤参数、水稻品种和生长情况见表 1。由表可以看到 2004 年稻田土壤的有机质、全氮等比 2003 年高,这与 2003 年实验田在 2001 年前生产砖的土质

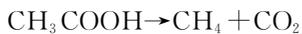
有关。2004 年稻田土壤的有机质为土壤生成 CH<sub>4</sub> 提供了基质,在后面的测量结果中将有所体现。表中还列出了广州郊区华南农业大学实验田的土壤参数,用于 CH<sub>4</sub> 排放通量的比较分析中。

### 3 结果和分析

水稻是在水层覆盖土壤的田里生长,其生长期间在缺氧的环境下不断生成  $\text{CH}_4$ 。稻田中  $\text{CH}_4$  的产生主要是  $\text{CO}_2/\text{H}_2$  及乙酸 ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) 这两种基质在厌氧状态下 ( $E_h \leq -300\text{mv}$ ) 被产  $\text{CH}_4$  菌利用还原而转化生成的<sup>[12]</sup>,其过程如下:



厌氧环境下,二氧化碳还原反应



厌氧环境下,乙酸甲基转移反应

当土壤中的  $\text{CH}_4$  积累到一定的数量,并且  $\text{CH}_4$  在土壤及传输途径中较少的被氧化,又有较通畅的输送途径时,大量的  $\text{CH}_4$  被排放到大气中。土壤中产生的  $\text{CH}_4$  通过三种途径向大气排放:一是植物体内的通气组织,二是稻田水面冒气泡,三是水中分子液相扩散。实验表明,在一般的水稻田中,水稻植物体的输送是最主要的途径<sup>[13]</sup>,它可以占排放量的 80%<sup>[14]</sup>。

#### 3.1 早稻田 $\text{CH}_4$ 的排放

图 1 是 2003 年早稻田  $\text{CH}_4$  排放通量图。从图可以看出,在早稻的整个生长季节,  $\text{CH}_4$  排放存在 3 个明显的排放峰值,处在水稻生长的分蘖拔节、抽穗扬花和成熟的重要时期。本实验在返青阶段由于采样的原因,资料的拟合性不是很好,剔除了部分资料,所以排放峰很小。第一峰(5 月 12 日)和(5 月 21 日)都出现在水稻的分蘖拔节期,此两个峰出现的原因是 5 月 1 日施了有机肥,再加上田间淹水和适宜的温度,导致了土壤中大量  $\text{CH}_4$  的生成和排放。第二个峰出现在抽穗扬花期,这是较低的  $E_h$  值、较高的气温、丰富的水稻根系分泌物引起  $\text{CH}_4$  产生率较高的结果。而且,此时水稻植物体内部空

腔系统通畅,是最主要的  $\text{CH}_4$  排放路径。此结果与任丽新等在成都平原观测到的在盛花期前后会出现强度较大的峰一致<sup>[15]</sup>。第三个峰出现在水稻成熟期,该阶段由于水稻根系的衰老腐败提供了丰富的可分解有机质,再加上较高的土壤温度,所以在土壤中产生了大量的  $\text{CH}_4$ 。成熟期稻田排水,在土壤中积聚的  $\text{CH}_4$  得到充分排放,形成了这个很高的峰。将 2003 年早稻田季节排放通量作几何平均,得到该季平均排放通量为  $4.38\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。图 2 是 2004 年早稻田排放  $\text{CH}_4$  的季节变化图,尽管在水稻各生长期中也相应出现  $\text{CH}_4$  的排放峰,4 月 30 日的返青期、5 月 24 日的分蘖拔节期,6 月 9 日的抽穗扬花期,但是,成熟期的排放高值不明显,并且,排放峰值的日期也与 2003 年稍有不同,2004 年早稻田季节几何平均排放通量为  $5.17\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,排放通量略高于 2003 年。这可能与当年的土壤质地、气候因素、播种日期变化带来的水稻生长期的变化有关。如前所述,2003 和 2004 年稻田土壤特性参数有较大的差别,特别是土壤有机质含量,2004 年比 2003 年高得多。土壤有机质是生成  $\text{CH}_4$  的基质,有机质高生成的  $\text{CH}_4$  自然就高。此外,2003 年 4 月 3 日插秧,2004 年因干旱缺水推迟到 4 月 19 日插秧,2004 年水稻生长期的推迟,对稻田土壤  $\text{CH}_4$  的生成和排放较有利,最终带来 2004 年稻田  $\text{CH}_4$  排放通量的增加。

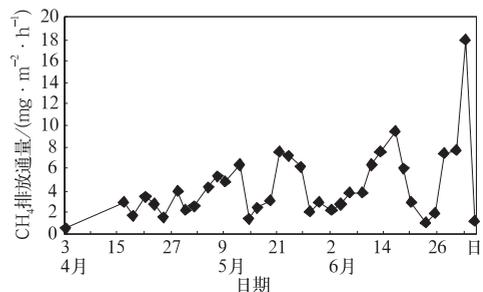
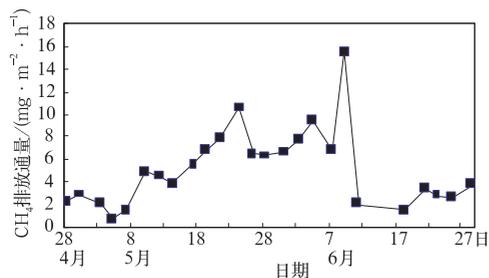


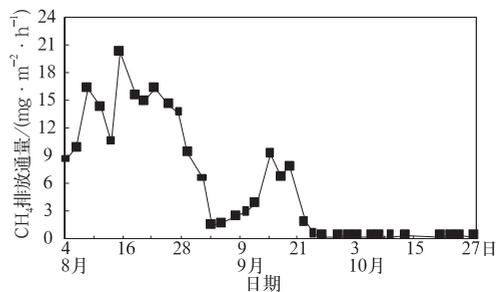
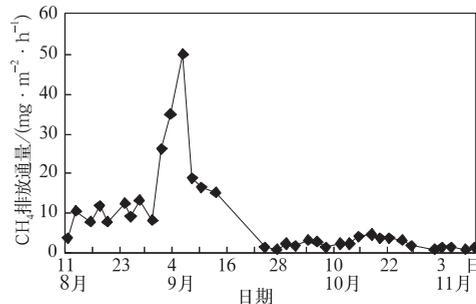
图 1 2003 年早稻田  $\text{CH}_4$  排放通量

图2 2004年早稻田CH<sub>4</sub>排放通量

### 3.2 晚稻田CH<sub>4</sub>排放

图3为2003年晚稻田CH<sub>4</sub>排放的季节变化,在晚稻的整个生长季节有3个明显的排放峰,呈现“前高后低”的趋势,与早稻的季节变化趋势完全不同。第一个峰出现在8月8日,形成此峰的主要原因是在晚稻初期有很高的气温、稻株秸秆还田后土壤中较高的有机质含量以及最高效率的传输路径这3个有利条件的同时存在。第二个峰的出现则是由于前面几个有利条件的同时存在,土壤的Eh很低,气温很高,这些条件都很适合水稻根部厌氧菌充分利用有机质分解还原产生CH<sub>4</sub>,水稻根部积聚了大量的CH<sub>4</sub>,当水稻田的水位降低时,有大量的CH<sub>4</sub>通过液相和气泡释放出来,形成了比第一个峰更高的CH<sub>4</sub>排放通量。该峰出现在水稻的分蘖拔节期,随着水稻的生长,CH<sub>4</sub>排放呈下降趋势。第三个峰出现在9月15日,但比前两个峰小得多。此时由于水稻已经开始抽穗,根系分泌的有机物为产CH<sub>4</sub>反应提供了丰富的反应底物,再加上较高的土壤温度,促进了土壤中的产CH<sub>4</sub>过程。此后几天稻田水位降为0cm,CH<sub>4</sub>排放也随之下降,而且到收割前排放通量一直小于1mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。晚稻整个生长季节的CH<sub>4</sub>排放通量几何平均为6.09mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。图4显示了2004年晚稻田CH<sub>4</sub>排放通量,2004年水稻整个生长季CH<sub>4</sub>的排放通量只有一个特别明显

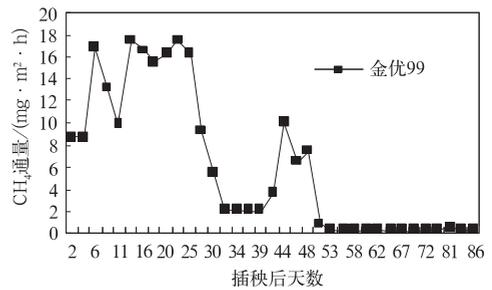
的排放峰值,它是9月6日,排放通量高达50.04mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,该峰正处于水稻抽穗扬花期,位于稻田CH<sub>4</sub>排放的一个高值期。但是,通常的水稻返青、分蘖拔节的排放高值并不十分明显。分析其高值产生的原因,该季水稻生长前期土壤中生成的CH<sub>4</sub>因某种并不知道的原因,没有得到相应的排放,只是堆积在土壤中,按照稻田实验簿上的记录,9月6日是排水日,稻田刚开始排水时,土壤中积聚的CH<sub>4</sub>即可充分排放,所以出现排放的高峰。但成熟期的排放因抽穗扬花期的充分排放而不明显。与2003年一样,清远晚稻田水稻成熟期的排放都不明显,这与广州<sup>[11,16]</sup>、湖南桃源<sup>[2]</sup>、杭州<sup>[17]</sup>晚稻田的测量结果相似,这是否与气候条件和耕作习惯有关,还有待进一步的研究。2004年整个生长季节的CH<sub>4</sub>排放通量几何平均为8.3mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,与早稻田一样,2004年晚稻田CH<sub>4</sub>排放通量比2003年高,其原因也相似。

图3 2003年晚稻田CH<sub>4</sub>排放通量图4 2004年晚稻田CH<sub>4</sub>排放通量

### 3.3 不同水稻品种 CH<sub>4</sub> 排放

种植不同品种的水稻, CH<sub>4</sub> 排放通量有明显的变化<sup>[3,18]</sup>。水稻品种与水稻根系类型、发达程度和代谢活性、根际微循环的扩散和氧化状态即品种的基因、生理学和生态学的特性有关。根系的分泌物和代谢物提供给土壤有机物, 而根际微环境的氧化性能和扩散条件对土壤 CH<sub>4</sub> 的生成有关, 这二者都影响土壤 CH<sub>4</sub> 的生成, 前者有利于 CH<sub>4</sub> 生成, 后者消耗 CH<sub>4</sub>。而稻株通气组织的发育则与排放通道有关。在 2003 年晚稻的实验中, 试验了不同水稻品种 CH<sub>4</sub> 的排放, 第 I、II 块田中种植“金优 99”, 第 III 块田种植“七丝尖”。图 5 和 6 是两个品种的水稻 CH<sub>4</sub> 排放通量的季节变化。图中显示, 两个稻种在完全相同的施肥和灌溉管理条件下, CH<sub>4</sub> 的排放规律基本一致, 都呈现“前高后低”的排放趋势, 在分蘖期和中期抽穗期分别出现了排放峰, 但是品种“七丝尖”的最高排放峰值是“金优 99”的 2 倍多, 其整个生长季节的平均排放通量也比品种 1 高 1.08mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>, 而两个品种水稻植株的平均高度分别为 116.43cm 和 98.57cm, 即植株高的水稻排放的 CH<sub>4</sub> 不一定高。在分析水稻品种排放 CH<sub>4</sub> 时, 还应该考虑其产量的差异, 因为在推行减少稻田 CH<sub>4</sub> 排放活动时, 要兼顾水稻的产量, 否则很难推广实施。品种“金优 99”水稻产量为 1225.30g · m<sup>-2</sup>, “七丝尖”为 781.99g · m<sup>-2</sup>。由此可见, 植株高、产量高的水稻品种, 稻田 CH<sub>4</sub> 排放量并不一定高, 如王明星等<sup>[3]</sup>连续 5 年的试验, 杂交稻株高、产量高、CH<sub>4</sub> 排放量低。邵可声等<sup>[18]</sup>的实验也有类似的结果, 他们于 1994 年在北京郊区进行了水稻品种对 CH<sub>4</sub> 排放影响的研究, 选

取“秋光”、“京香糯”、“93812”和“京稻 15”等 4 个水稻品种, 在施肥、灌溉完全相同的情况下, 4 个水稻品种的 CH<sub>4</sub> 排放通量为: 2.7, 4.7, 13.6 和 7.6mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>, 即水稻品种排放的 CH<sub>4</sub> 有很大的差异, 最大可相差 5 倍。王增远等<sup>[19]</sup>在北京昌平中国农业科学院的试验基地进行了 3 个水稻品种“京优”、“中作 93”和“中花 94-1017”的实验, 在相同的施肥和常规水管理方法下, CH<sub>4</sub> 排放通量为 1.47, 0.65 和 1.34mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>, 而其产量相应为 6804、7704 和 6903kg · hm<sup>-2</sup>。说明不同的稻种, 因其植株的通气组织不同会有明显的差别。因此, 慎重选择产量高而 CH<sub>4</sub> 排放较低的水稻品种, 这样才能有利于减少稻田 CH<sub>4</sub> 的排放。



5 2003 年晚稻品种“金优 99”CH<sub>4</sub> 排放通量

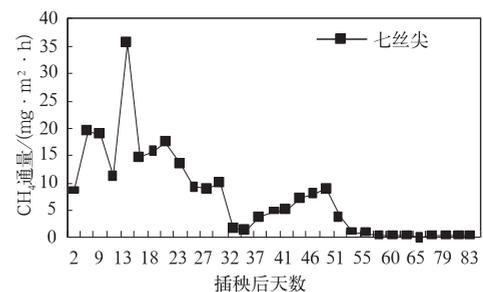


图 6 2003 年晚稻“七丝尖”CH<sub>4</sub> 排放通量

需要指出的是, 植物体自身也能向大气排放 CH<sub>4</sub><sup>\*</sup>, 所以, 不同作者的结果和观点有所不同, 这主要是多因子影响稻田 CH<sub>4</sub> 排放,

\* <http://www.Science.times.com.cn>

各因子作用的大小决定最终的结果。吕雪娟等<sup>[20]</sup>于1996年在广州郊区早稻田试验两个稻种“粳粳”和“汕优”,他们认为:在相同的农业耕作和施肥条件下,早稻田稻种间 $\text{CH}_4$ 排放通量有一定的差异(8.1和 $4.6\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ),但施肥的影响更大(有机+化肥,纯化肥:8.1和 $1.2\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ );而杨军等<sup>[8]</sup>在同一实验田1996年晚稻田 $\text{CH}_4$ 排放通量稻种并没有明显差异(26.9和 $23.3\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ),较不同施肥(26.9和 $9.6\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )差异小得多。综上,不同水稻品种排放的 $\text{CH}_4$ 在不同地区/相同地区、不同时间段有不同的试验结果,这也是估算稻田 $\text{CH}_4$ 排放量的困难之处。而 $\text{CH}_4$ 低排放的水稻品种,其产量并不一定低,这给减少稻田 $\text{CH}_4$ 排放提供了一个选择的机会。

#### 4 测量结果的比较

为了对稻田 $\text{CH}_4$ 排放通量有个了解,表2列出了中方与美国同一研究组合作,在广东省清远和广州、四川土主和金沙稻田 $\text{CH}_4$ 的排放通量。其中清远、土主、金沙三地的实验方法和分析仪器完全一样,广州的分析仪器是岛津GC-9A色谱仪,实验方法一样。清远和广州相隔80多km,土壤类型和气候条件因地形不同、耕种习惯因两地的经济条件而稍有不同。土主、金沙相距100多km,两

地的农田管理也有不同。由表可以看到一个现象,即在同一地区(华南农业大学实验田:1994—1996年)或相近地区(清远和广州华南农大),早稻排放通量的数值比较接近,晚稻有明显的减少。清远的测量工作晚广州近十年,表1中广州晚稻稻田土壤的有机质含量较清远稍高一些,但是,这一条件并不能解释排放通量如此大的变化。清远的经济条件比广州差,尽管测量时间相差近10年,稻田施肥的情况相似,比如,2003、2004年清远早、晚稻田均施肥4次,3次化肥和1次农家肥,杨军等<sup>[8,16]</sup>1994、1996年晚稻实验也施3次化肥、1次猪粪+化肥,只是有机肥的品种不同,清远是鸡、鸭、鹅粪和草木灰,广州是湿猪粪,这有可能带来一些差别。两地的水管理基本是“常规灌溉”,广州晚稻生长期灌水5次<sup>[11]</sup>,清远晚稻期灌水1次,在当前水资源匮乏的情况下,农村水管理有所加强,稻田水管理有可能引起 $\text{CH}_4$ 排放通量的变化。这意味着近十年来稻田 $\text{CH}_4$ 排放因水管理的变化正在减少。另一个现象是晚稻 $\text{CH}_4$ 排放通量大于早稻,这与晚稻生长季节的气候和可能的早稻秸秆还田增加土壤有机质含量有关。这类结果有较多论文描述广州<sup>[8,20]</sup>、桃源<sup>[2]</sup>、杭州<sup>[17]</sup>。同样,四川省两地稻田的 $\text{CH}_4$ 排放通量也有很大不同,土主 $\text{CH}_4$ 排放通量值比金沙大,其中的一个原因与土主施用较多农家肥和淹水等有关系。也

表2 相关的 $\text{CH}_4$ 排放通量单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$

实验点/时间	早稻	晚稻	单季稻	引文
广东清远/2003/2004	4.38/5.17	6.09/8.3		本研究
广州/1996/1994/1995	5	31.6/30.6/31.4		[5]
广州/1994		16.1		[11]
广州/1996/不同稻种	8.1/4.6			[20]
		26.9/23.3		[8]
四川金沙/1996—1998			14.93/2.73/8.62	[6]
四川土主/7年平均/1988—1994			30.23/32.31/21.7/34.4/ 25.6/30.7/33.4/33.5	[3]
四川金沙/4年平均/1996—1999			11.96/14.18/2.35/8.14/33.95	[15]

有一些令人不解的现象,如在四川金沙稻田  $\text{CH}_4$  排放通量 1999 年 ( $33.95\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 与 1997 年 ( $2.35\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 有量级之差<sup>[15]</sup>,在相同的实验田、耕作习惯、分析设备,不同年份有如此大的差别,文章对测量数据进行了分析,认为  $\text{CH}_4$  排放通量与气温/地温都没有明显关系。通常,地温与土壤生成  $\text{CH}_4$  有关,气温与稻田排放  $\text{CH}_4$  有关。这也是稻田  $\text{CH}_4$  排放随时间变化的一个个例,说明稻田  $\text{CH}_4$  排放的复杂性和多变性,以及用排放通量计算区域稻田  $\text{CH}_4$  排放量时的可能误差。另一个明显的变化是金沙稻田  $\text{CH}_4$  排放通量比土主低很多,与广东的测量结果相似,稻田  $\text{CH}_4$  排放通量有所减少,据此,美方的科学家提出:随着农村水管理的加强和化肥施用量的增加,中国稻田  $\text{CH}_4$  排放正在减少<sup>[21-22]</sup>。这一结果引起了国内外科学家的注意。因为,近几十年的气候变化被普遍认为与温室气体有关,所以,希望人类活动排放的温室气体得到控制并逐渐减少。

## 5 稻田甲烷排放通量的不确定性

综上所述,稻田  $\text{CH}_4$  排放通量的测量值在不同地区或相同地区、不同时间有比较大的变化,甚至不同的计算方法也有差别,如几何平均或算术平均,本文使用的是几何平均,大多数文章没有说明其统计的方法,经试验,同样的测量资料,几何/算术平均计算的排放通量 2003 年早稻  $4.38/4.74\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,晚稻  $6.09/6.31\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,几何平均比算术平均计算的稻田  $\text{CH}_4$  排放通量稍低一些,应该说,这种差异是随机的,与通量测量的所在地块有关。广州 1994 年晚稻 ( $7.8/9.7\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 和 1996 年早稻 ( $8.1/10.6\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )、晚稻 ( $26.9/41.0\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 也有类似的结果,即几何平均低于算术平均<sup>[8,11,20]</sup>。当然,这是一种巧合,并没有物理基础支持,只是说明稻田  $\text{CH}_4$  排放通量中的不确定性问题。此外,测量方法本

身也有一定的误差,放置在稻田的采样箱对稻田的空气流通带来扰动,稻田采样箱是否能代表大块稻田  $\text{CH}_4$  的排放不得而知,但是,至今没有更好的办法克服它的不足,这是目前国内、外比较通用的测量方法。稻田  $\text{CH}_4$  排放通量的不确定性主要源自排放通量的时空代表性,问题在于,不可能在很多的测量地点进行大规模和长时间的测量。稻田  $\text{CH}_4$  排放通量与稻田土壤  $\text{CH}_4$  的生成、排放通道等有关,即土壤特性、生长期气候、施肥、灌溉、稻种等多种因素,某一个因素发生变化,排放通量就会变;而这些因素中作用有多大,哪一个占主导作用,各人的测量结果不尽相同,相关的文献结果:有稻种 ( $13.6$  和  $2.7\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )<sup>[18]</sup> 为主导;施肥(有机肥和纯化肥:  $26.9$  和  $9.6\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )<sup>[8]</sup> 或灌溉(连续淹水和旱作  $17.63$  和  $0.36\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )<sup>[6]</sup> 为主导。这给计算地区或国家稻田  $\text{CH}_4$  排放量带来困难。因为,即使在相同的地区,水稻生长期的气候、施肥、灌溉等也有一些差别,排放通量之间的差异很难避免,只能在计算区域/国家排放量时,仔细分析排放通量测量条件和数据的代表性,以便尽量减少计算中的不确定性。

## 6 结束语

稻田是人类活动排放  $\text{CH}_4$  重要的生物源之一,尽管稻田  $\text{CH}_4$  排放通量随着化肥应用、水管理的改进等在减少<sup>[14,21,22]</sup>,但是只要水稻生长环境不变,即厌氧条件的存在就会有  $\text{CH}_4$  的生成,按照物质平衡的原理, $\text{CH}_4$  产生后必然要向外排放,清远稻田  $\text{CH}_4$  排放通量 2003 年早、晚稻季节几何平均分别为  $4.38$  和  $6.09\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 2004 年早、晚稻分别为  $5.17$  和  $8.3\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。中国是国际减少温室气体排放京都议定书的签约国,在全球温室气体减排的大趋势下,惟一能做的是如何减少稻田  $\text{CH}_4$  的排放。如前所述,水稻品种可能是一个减少  $\text{CH}_4$  排放的一

条有效途径,选择产量高、CH<sub>4</sub> 排放少的稻种是一条可行的办法。

### 参考文献

- [1] WDCGG (WMO World Data Centre for Greenhouse Gases), 2005, No. 29.
- [2] 上官行健. 稻田甲烷产生和排放过程的研究[D]. 中国科学院大气物理研究所博士论文, 1993.
- [3] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 216-222.
- [4] 许黎, 张莉, 李灿, 等. 我国稻田温室气体排放的评估[R]. 气候变化科学与对策特别评估报告, 2004, 2.
- [5] Khalil M A K, Rasmussen R A, Shearer M J et al. Measurements of methane emissions from rice fields in China[J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(D19): 25181-25210.
- [6] Khalil M A K, Rasmussen R A, 任丽新, 等. 稻田的 CH<sub>4</sub> 排放[M]. 陶诗言, R M Michael, 陈泮勤等编. 温室效应与气候变化研究. 北京: 海洋出版社, 1999: 62-76.
- [7] 卢维盛, 张建国, 廖宗文. 广州地区晚稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放通量及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 1997, 8(3): 275-278.
- [8] 杨军, 吕雪娟, 陈玉芬, 等. 广州地区晚稻品种与施肥对稻田甲烷排放通量的影响研究[J]. *华南农业大学学报*, 1998, 19(3): 67-71.
- [9] Wassmann R, Neue H U, Lantin R S et al. Temporal patterns of methane emissions from rice fields treated by different modes of N application[J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 16457-16462.
- [10] 任万辉. 广州地区稻田甲烷和氧化亚氮排放及模拟研究[D]. 南京气象学院硕士学位论文, 2004.
- [11] 杨军, 贺丽萍, 杨崇, 等. 广州地区晚季稻田 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放研究初报[J]. *华南农业大学学报*, 1997, 18(3): 62-66.
- [12] Takai Y. The mechanism of methane formation in flooded paddy soil[J]. *Soil Sci. and Plant Nutr.* 1970, 16: 238-244.
- [13] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理[J]. *大气科学*, 1998, 22(4): 600-612.
- [14] 蔡祖聪. 中国稻田甲烷排放研究进展[J]. *土壤*, 1999, 5: 266-269.
- [15] 任丽新, 王庚辰, 张仁健, 等. 成都平原稻田甲烷排放的实验研究[J]. *大气科学*, 2002, 26(6): 731-743.
- [16] 杨军, 陈玉芬, 胡飞, 等. 广州地区晚季稻田甲烷排放通量与施肥影响研究[J]. *华南农业大学学报*, 1996, 17(2): 17-22.
- [17] 戴爱国, 王明星, 沈壬兴, 等. 我国杭州地区秋季稻田的甲烷排放[J]. *大气科学*, 1991, 15(1): 102-110.
- [18] 邵可声, 李震. 水稻品种以及施肥措施对稻田甲烷排放的影响[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1996, 32(4): 505-513.
- [19] 王增远, 徐雨昌, 李震, 等. 水稻品种对稻田甲烷排放的影响[J]. *作物学报*, 1999, 25(4): 441-446.
- [20] 吕雪娟, 杨军, 陈玉芬, 等. 广州地区早稻品种与施肥对稻田甲烷排放通量的影响研究[J]. *华南农业大学学报*, 1998, 19(4): 87-91.
- [21] Khalil M A K, Rasmussen R A, Shearer M J et al. Decreasing emissions of methane from rice fields in China. Third Science Team Meeting of MOST - DOE Agreement on "Climate Sciences", 2005, p 17.
- [22] 许黎, 丁一汇, 罗勇, 等. 中国稻田甲烷排放减少[J]. *气候变化研究进展*, 2005, 1(3): 126-128.