

成都平原稻田甲烷排放的实验研究^{*}

任丽新 王庚辰 张仁健

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

段长麟

(中国科学院成都山地灾害和环境研究所, 成都 610064)

M. A. K. Khalil M. J. Shearer

(Department of Physics, Portland State University, P.O. Box 751 Portland, Oregon 97207-0751, U.S.A.)

R. A. Rasmussen R. W. Dalluge

(Department of Environmental Science and Engineering, Oregon Graduate Institute, P.O. Box 91000 Portland, Oregon 97291-1000, U.S.A.)

摘要 根据1996~1999年四个稻季的观测资料, 分析了成都平原单季稻甲烷排放的季节变化和年际变化特征。结果表明: 在水稻生长季节甲烷排放通量变化很大, 在分蘖期和成熟期一般会出现峰值。年际间的通量变化也很大, 其年均排放通量的变化范围在 $2.35 \sim 33.95 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 之间。4年的平均排放通量为 $12 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 与四川乐山的7年平均值 $30 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 相比, 存在着明显的地区差异。同时分析讨论了温度、施肥、水稻品种、土壤氧化还原电位(Eh)以及稻田水位等诸多因素对稻田甲烷排放的影响。结果表明: 在成都平原水稻生长季节的平均气温对 CH_4 的平均排放通量影响不大; 而气温对 CH_4 排放的日变化有相对重要的影响, 但气温对甲烷排放日变化的影响与水稻植株的生长阶段有关; 发现了水稻植株(根、茎、叶)重量对 CH_4 排放的重要作用。讨论了合理使用肥料和施肥量、控制水位和Eh值对稻田 CH_4 的减排作用, 提出优化组合诸影响因子, 以充分发挥其减排潜力。

关键词: 稻田; 甲烷; 季节变化; 年际变化

1 引言

甲烷是由于人类活动使其在大气中浓度正在增加的、仅次于二氧化碳的重要温室气体, 平均每年以1%左右的速度在增加, 其增长率比二氧化碳高2倍多, 但在近几十年中大气甲烷浓度的增长率不是定常的。大气中 CH_4 浓度增加的具体原因目前尚不清楚, 有人将这个未解决的问题称之为“甲烷之谜”^[1]。虽然甲烷在大气中的浓度远小于 CO_2 , 但一个甲烷分子的增强温室效应大约是一个 CO_2 分子的7.5倍^[2]。因此, 由于人类活动使温室气体浓度增加引起全球变暖的问题中, 甲烷是一个重要的研究对象。

在甲烷的人为源中, 稻田甲烷的排放是重要源, 约占大气甲烷总量的四分之一。我国在不同地区作了多年的稻田甲烷排放的实验, 结果表明差别很大。即使在同一地区,

2000-12-25收到, 2001-06-05收到修改稿

^{*} 本文为中国科学院与美国能源部的联合研究项目“二氧化碳导致气候变化”中第四课题的工作内容

在水稻的生长过程中甲烷排放通量变化的形式多样, 差异很大, 年际之间甲烷平均通量的变化非常大^[3,4]。对于稻田甲烷排放的这种巨大的时空变化, 仍缺乏有充分说服力的释解, 所以根据现有的稻田甲烷排放通量的观测结果, 来推算全球的 CH_4 排放总量, 仍有很大的不确定性。而在不清楚大气甲烷浓度增长率变化原因的情况下, 要预测大气甲烷浓度变化趋势是困难的。

中国的水稻面积约占世界水稻面积的 22%。四川盆地是中国的大稻米产区之一, 为了正确估算该地区稻田 CH_4 的排放通量, 也为了研究稻田甲烷排放的机理, 我们继四川乐山丘陵地区稻田甲烷排放试验之后, 又在成都平原都江堰自流灌区继续进行不同稻田类型的试验。本文是根据 1996~1999 年稻田甲烷排放的观测资料, 分析研究其排放通量的变化特征及相关因素对其的影响。

2 观测地点和实验方法

试验站设在成都市双流县城西南 12 km 处的金沙村 (30.6°N, 103.9°E), 位于成都平原的东南部, 土壤为冲积土, 土质肥沃, 有机质含量平均 30 g kg^{-1} ; 水稻生长季节其土壤 pH 值在 6.0~8.0 之间, 平均为 7.0; 耕作层深度约为 16~22 cm。该区种植单季稻, 水稻品种为优质杂交稻。每年 4 月初播种, 5 月下旬移栽, 8 月底或 9 月初收割。从播种到收割其生长期约 130 d。一般在移栽后开始进行稻田甲烷排放通量的测量, 收割后一周结束。共选择了 6 块稻田进行试验, 试验田的采样点分布见图 1。

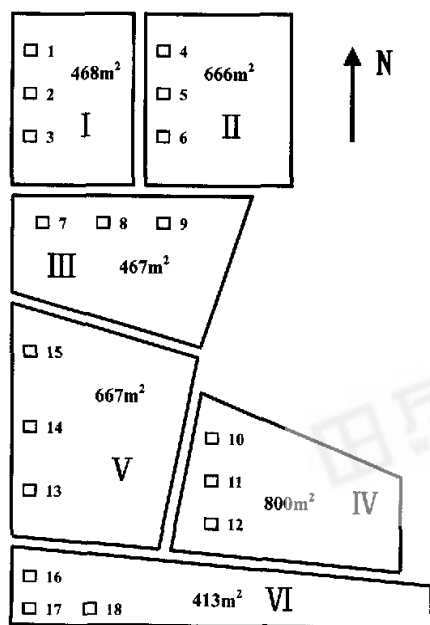


图 1 金沙试验田及采样点分布图

从图 1 中看出, 每块田设 3 个采样点, 用静态箱法测量排放通量^[5]。在采样的同时, 记录箱内外的空气温度、土壤温度、土壤的 pH 值、氧化还原电位 (Eh)、稻田的水位以及风向、风速、云量等天气状况。根据稻禾的生长情况, 采用两种不同高度的框作箱法测量, 小框为 $142 \text{ cm} \times 142 \text{ cm} \times 52 \text{ cm}$, 大框为 $142 \text{ cm} \times 142 \text{ cm} \times 105 \text{ cm}$ 。用针筒采样, 每 3 min 抽取箱内空气一次, 连续取样 4 次共 12 min, 并同时在田边空气中采样, 测量 CH_4 的背景浓度。每个观测日每块田上午和下午各采样一次, 以 5 块田 15 个采样点计算, 上下午有 120 个样品, 加上空气背景浓度样品 30 个, 共有 150 个样品, 每周进行两次, 共要分析 300 个样品。样品分析就在田边实验室中进行。主要分析仪器是气相色谱仪。

3 结果与分析

3.1 温度对稻田甲烷排放的影响

成都平原地区 1996~1999 年水稻生长季节气温有明显的年际变化，表 1 中列出了 4 个水稻生长季节，试验田箱内外的地温和气温的季节平均值。从表 1 中看出，1996 年的平均气温最高，箱内高达 32.5℃，箱外为 29.4℃；1999 年平均气温最低，箱内为 26.3℃，箱外 24.5℃，与 1996 年相比，箱内外平均气温差 5~6℃。平均地温也是 1999 年最低，其箱内外平均地温与 1996 年相比两者相差不到 2℃，年际变化较气温小。地温的测量深度平均在地表层下 3 cm 处。

表 1 1996~1999 年水稻生长季节地温、气温平均值（金沙） C

年份	地 温		气 温	
	箱外	箱内	箱外	箱内
1996	26.3	26.0	29.4	32.5
1997	26.7	27.0	27.9	30.2
1998	25.7	25.4	26.4	27.5
1999	25.0	26.5	24.5	26.3

表 2 给出了 1996~1999 年水稻生长季节每块试验田 3 个采样点平均的稻田甲烷排放通量。从年平均值中看出 1997 年为最低值，6 块田的平均排放通量仅为 2.35 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。而最大值却在 1999 年，3 块试验田的 CH_4 年排放通量为 33.95 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ，比 1997 年竟高达 14 倍，年平均气温却是 1999 年最低。1996 年的平均气温是 4 年中最高的，其排放通量却比 1999 年低一倍多。一般认为气温高有利于甲烷的排放，但对平均气温而言，其与水稻生长季节 CH_4 的平均排放通量的相关性比较差。地温也是 1999 年相对最低，而 1997 年地温相对最高，表明其平均排放通量与平均地温也没有明显的相关性。

表 2 金沙稻田甲烷排放通量 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$

年份 \ 田号	I	II	III	IV	V	VI	平均
1996	3.29	26.19	4.04	11.6	25.77		14.18
1997	1.67	2.33	1.39	1.33	2.80	4.56	2.35
1998	9.31	9.65	7.32	4.91	9.51		8.14
1999	32.97		37.74		31.14		33.95
平均	11.81	12.73	12.62	5.95	17.31		11.96

虽然稻季的平均气温与甲烷平均排放通量间无明显相关性，但实验数据表明，气温对稻田甲烷排放的日变化有影响。不少研究者也认为气温是影响稻田甲烷排放的重要因素^[6,7]，因为气温高能增强水稻植物体的呼吸作用及蒸腾作用，促进土壤中的 CH_4 通过植物体向大气传输；同时 CH_4 通过水层的扩散率也加快；土壤中的甲烷也容易形成气

泡冒出水面；这无疑是引起稻田甲烷排放日变化的原因。在我们的观测中，发现在水稻移栽后一周左右，就显示出 CH_4 排放通量的日变化与气温关系密切。我们用 1999 年的资料，将每块田 3 个采样点的甲烷排放通量分别以上午、下午进行平均，分析在整个稻季中的日变化特征，图 2a 为 1999 年 I 号田的日变化特征，图 2b 为 III 号田的变化特征。因为空气温度一般是下午高于上午，从图中看出 6 月 24 日以前，I、III 号田都是下午的排放通量高于上午，但在此以后这种关系不明显。6 月 24 日是分蘖中期，在此之前也就是水稻植物体根、茎、叶的生长期，这时甲烷排放与温度有明显关系。但水稻植物体在分蘖后期及开花、盛花、结果期就并不一定遵循此规律，说明温度对甲烷排放日变化的影响与水稻植物体的生长阶段有关。观测数据表明，即使在同一块田，3 个采样点的变化幅度并不相同，3 块试验田之间变化幅度也明显不同，表明甲烷排放有明显的空间分布不均匀性。

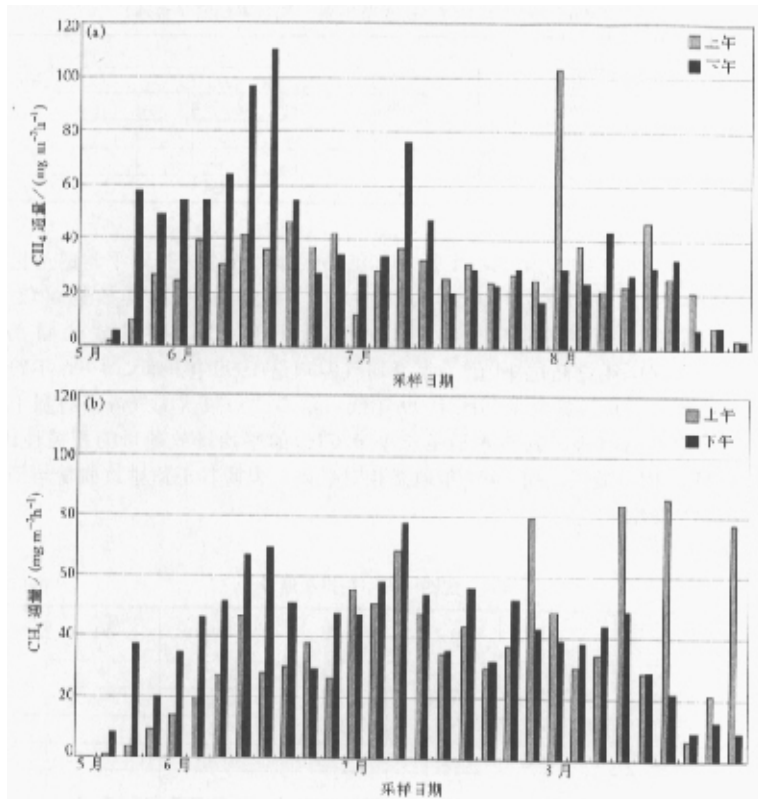


图 2 水稻生长季节甲烷排放通量日变化 (1999 年, 金沙)
(a) I 号田; (b) III 号田

稻田甲烷排放与温度的关系只是一种间接的关系，直接决定甲烷排放的是与耕作条件对甲烷的产生、植物体的生长以及与排放途径是否改善等情况有关，因此，温度与排

放通量关系往往会处于一种不确定状态。图 3 列出了 1996 年 V 号田水稻生长季节箱内外大气温度与相应的甲烷排放通量的变化曲线, 虽然其甲烷通量的峰值基本与气温峰值一致, 但多数情况并无此种相关。

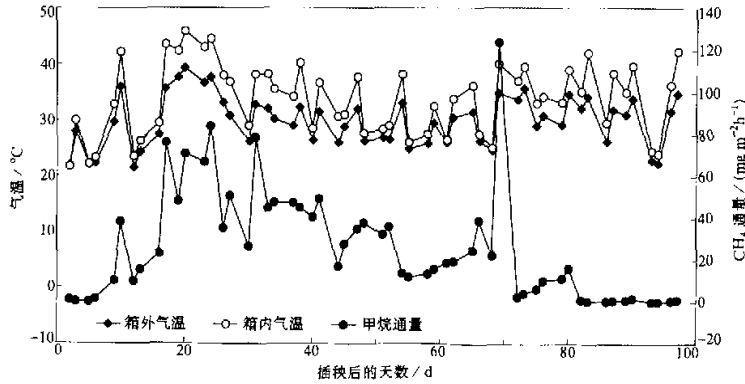


图 3 稻田甲烷排放通量与气温的关系 (1996, V 号田)

3.2 CH₄ 排放通量的季节变化

稻田甲烷排放通量的变化, 是由多种因素决定的。在整个水稻生长季节, CH₄ 排放通量随着水稻的不同生长期, 出现单峰、双峰和多峰的排放行为 (见图 4)。图 4a 为 1996 年 5 块试验田甲烷排放通量的季节变化图, 其稻季生长状况是: 稻株移栽后第 13 天分蘖; 第 64 天开花; 第 69 天盛花; 第 75 天结果; 第 93 天收割。从图 4 中看出, 除 I、III 号田外, 其他 3 块试验田在分蘖后 10 多天后 CH₄ 排放通量较强, 分蘖后期, 变化幅度出现多极现象, 排放通量减弱, 在盛花期前后出现另一个强度更大的峰值。图中也看到 I、III 号试验田在水稻整个生长季节甲烷排放通量都低, 只是在开花和盛花期间有一个小峰。表明了同一水稻生长季节, 不同试验田之间的巨大差异, I、III 号田平均通量比 II、V 号田低 6~8 倍。值得注意的是, II、V 号田在盛花期的峰值分别高达 $187 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 和 $120 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 其中 II 号田的 $187 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 是这四年中测量到的最高值, 而在同一季节盛花期 I 号田的峰值不到 $20 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。

图 4b 为 1998 年稻田甲烷排放的季节变化图, 这是与 1996 年不同的 CH₄ 排放类型, 它只是在盛花和结果期之间出现明显峰值, 是较典型的单峰排放行为。而 1997、1999 年其 CH₄ 排放曲线表现出明显的多峰现象, 所有这些情况, 反映出不同年份 CH₄ 排放季节变化的多样性, 也说明稻田甲烷排放通量受多种因子影响的复杂性。

尽管如此, 对 1996~1999 年所获得的观测资料的分析结果表明, 水稻生长期间, 在分蘖期和盛花、结果期, CH₄ 排放通量较强, 一般会出现峰值。

3.3 施肥对稻田甲烷排放的影响

当地耕作习惯, 在 5 月中、下旬稻田插秧前夕施一次底肥, 插秧后在 6 月上、中旬再追肥 1 到 2 次。为了防止稻禾的枯黄病, 通常是使土壤的 pH 值处于中性状态, 当 pH 值偏小时, 施碱姓化肥, 当 pH 值偏大时, 就施酸性化肥。在 1996~1999 年

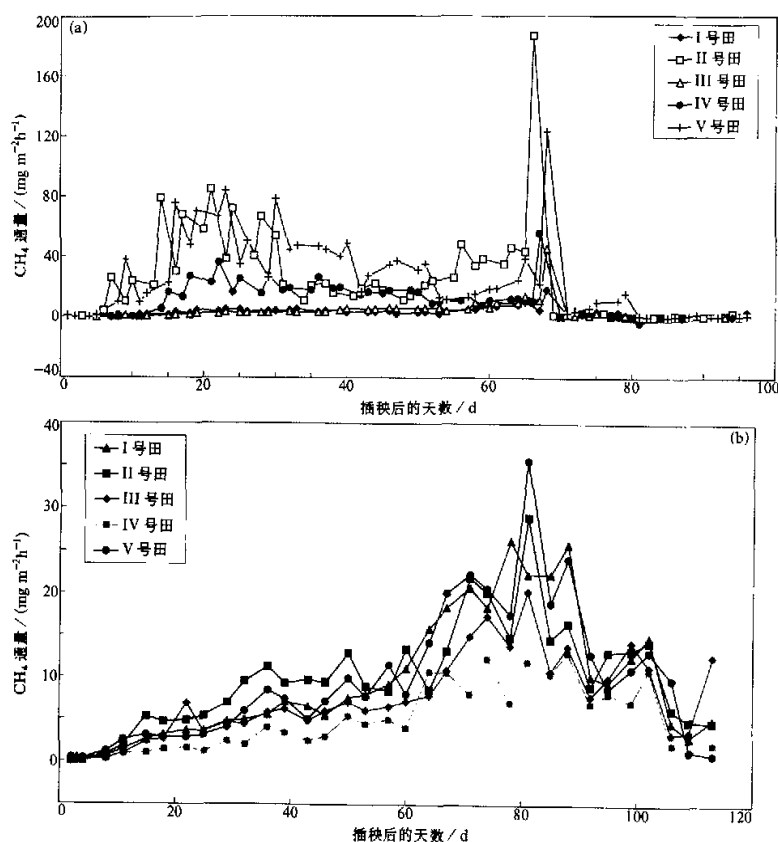


图4 金沙稻田甲烷排放通量季节变化
(a) 1996年; (b) 1998年

试验期间, 无机肥使用碳铵 (NH_4HCO_3 , $\text{N} \geq 17.1\%$, $\text{H}_2\text{O} \leq 3.5\%$)、复合肥 [$\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $\text{N} (\geq 13\%) + \text{P} (\geq 5\%) + \text{K} (\geq 7\%) \geq 25\%$] 和磷肥。有机肥施尿素和农家肥, 农家肥主要是粪水, 水分占很大比例。I、III号田从1996~1999年都是施无机化肥, 其他田有机肥和无机肥都用, 各试验田的施肥和产量情况见表3。

根据表2和表3可以分析施肥对稻田甲烷排放的影响。从表2中看出, 1996年II、V号田平均 CH_4 排放通量高达 $26 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 左右, 而I、III号田只有 $3 \sim 4 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 明显小于其他田块。表3显示I、III号田都是施碳铵, 施肥量也基本相同, 而II、V号田都施了大量的有机肥和一定量的碳铵, 其 CH_4 排放通量大, IV号田仅施有机肥尿素, 但其排放通量明显小于同时使用有机肥和无机肥的II、V号田, 而比只施无机肥的I、III号田高。1997年虽然6块试验田 CH_4 排放都普遍偏低, 但VI号田由于施了大量的农家肥和一定量的碳铵, 其排放通量明显高于其他试验田, V号田也

表 3 金沙试验田施肥和产量统计表

年份	田号 肥料 产量	I	II	III	IV	V	VI
1996	肥料 (g m ⁻²)	碳铵: 53.4; 8.6	农家肥: 1502; 976 碳铵: 60; 11.3	碳铵: 53.5; 7.5	尿素: 6.3; 3.1	尿素: 7.5; 3.8 农家肥: 1199 碳铵: 15	
	产量 (kg ha ⁻¹)	7650	8025	7875	7125	6750	
1997	肥料 (g m ⁻²)	碳铵: 53.4 复合肥: 26.7	碳铵: 45 复合肥: 22.5 农家肥: 751	碳铵: 53.5 复合肥: 26.8	碳铵: 25 磷肥: 31.3 农家肥: 625 复合肥: 6.3	碳铵: 60 磷肥: 75 复合肥: 11.2 农家肥: 1500	碳铵: 61 农家肥: 1453; 969
	产量 (kg ha ⁻¹)	8700	8700	8700	8700	8700	8700
1998	肥料 (g m ⁻²)	碳铵: 64; 26.7	碳铵: 52.6 复合肥: 15 农家肥: 541	碳铵: 85.7; 26.8	碳铵: 25; 6.3	碳铵: 52.5; 30	
	产量 (kg ha ⁻¹)	6660	6750	6855	8400	8250	
1999	肥料 (g m ⁻²)	磷肥: 53.4		磷肥: 53.5		农家肥: 1351	
	产量 (kg ha ⁻¹)	8175		8175		4680	

注：同一种肥料有两个数字，表示不同日期的施肥量。

因施有较多的无机肥和有机肥，而仅次于 VI 号田。IV 号田虽然与 V 号田施肥种类相同，但施肥量明显小于 V 号田，故 CH₄ 排放通量也明显小于 V 号田。1998 年除 II 号田外，其余各田都只施了两次碳铵，用量除 IV 号田较少外其他都较接近，II 号田施了一定量的农家肥及复合肥，用量虽然不大，其排放通量仍略高于其他各田，IV 号田施碳铵量明显小于其他田，其排放通量也只有其他田的二分之一左右，但其亩产并不低，说明减少施肥或合理施肥，有减少 CH₄ 排放潜力，III 号田相对施肥量较大，但其产量也并不高。所以在不影响产量的情况下适度减少施肥量，可减少 CH₄ 的排放。1999 年试验田的施肥状况是：I 号田在水稻前期的麦季施无机肥，在稻季也施无机肥；III 号田麦季施有机肥，稻季施无机肥，V 号田麦季和稻季都施有机肥。从表 2 中看出 III 号田 CH₄ 排放通量相对最高，再次显示施有机肥和无机肥的稻田，CH₄ 排放通量高。而仅施农家肥的 V 号田，其 CH₄ 排放通量并不高，这可能是由于粪水中的无机硫 (S) 抑制了土壤甲烷的产生，从而降低了稻田甲烷的排放。上述分析结果表明，大量的有机肥和适量的无机肥混合使用，会使稻田甲烷的排放通量增高，而适量的使用无机肥能减少甲烷排放通量，且不影响稻米产量。

3.4 植物体重量（水稻品种）与甲烷排放的关系

稻田甲烷的排放可以通过 3 个途径，即水稻植物体的传输、气泡和水面的热扩散。水稻植物体的传输是稻田甲烷排放的重要途径，具体表现在水稻品种上，不同的水稻品

种其稻根和稻茎叶的重量有很大差异,而土壤中甲烷是通过水稻植物体的根、茎、叶传输至大气的,所以水稻植物体(重量)的差异会直接影响甲烷排放。对观测资料的分析发现,稻根的重量与甲烷排放的相关性较好,我们把1996~1999年每块试验田中3个采样点平均的干稻根重量列于表4中。

表4中表明1997年的稻根重量明显小于其他年份,而1996年I、III号田的稻根重量也明显小于同年的其他田。对应稻根重量小的水稻植物体,其 CH_4 排放通量明显偏低。表5列了1996~1999年各试验田3个采样点的平均干谷草(茎、叶)的重量。

从表5中看出,1997年谷草重量虽然仍然较其他年小,但其差异没有稻根的大。1999年虽然其稻根重量与其他年份相近,但其谷草重量明显偏重,对应的 CH_4 排放通量高。年平均的稻根和谷草的重量差异主要是由水稻品种的不同造成的,1997年每块田都用两季杂交稻21681稻种,这种品种根部相对较小,茎叶也相对较轻,但其产量高, CH_4 排放通量较低。1996年I、II、III号田为冈优-22,而IV、V号田为D优-68。II号田由于施肥量大而掩盖了稻种差异,I、III号田与IV、V号田,由于品种不同,其 CH_4 排放通量有明显差别,IV、V号田的稻根与谷草重量明显高于I、III号田。所以I、III号田的排放通量明显小于其他试验田,可认为是施肥和水稻品种的共同作用。

表4 金沙水稻干根平均重量统计

g/株

田号 年份	I	II	III	IV	V	VI	年平均	水稻品种
1996	16.8	31.6	16.5	25.5	29.7		24.0	I、II、III: 冈优-22, IV、V: D优-68
1997	11.3	17.0	9.2	29.6	10.8	10.8	14.8	两季杂交稻21681
1998	21.7	30.9	19.0	23.6	18.3		22.7	蜀优2号
1999	13.4		19.4		24.1		19.0	优II-162

表5 金沙水稻干茎叶平均重量统计

g/株

田号 年份	I	II	III	IV	V	VI	年平均
1996	30.6	40.2	29.1	50.1	47.8		39.6
1997	35.2	44.8	23.3	45.3	35.7	33.3	36.3
1998	42.2	51.5	39.4	45.0	41.8		44.0
1999	41.5		58.3		55.9		51.9

从表4、5中看出,1999年使用优II-162稻种,是茎叶特别茂盛而根部也相对较重的品种,其3块田的谷草重量明显高于其他年份, CH_4 排放量也明显增大,但其亩产却无明显提高。因此为了减少稻田甲烷排放,在不影响产量的条件下,选用稻根和谷草重量较小的品种较为有利。

3.5 水管理对甲烷排放的影响

我们在试验中研究了水稻耕作中水管理对甲烷排放的影响。因为有积水的稻田处于厌氧条件,有利于产甲烷菌对乙酸和 CO_2 与 H_2 还原生成 CH_4 ,而稻田干涸时不利于

CH₄ 产生。图 5 给出 1997 年稻田平均水位的变化，图中表明为间歇灌溉状况，对应的 6 块田的 CH₄ 排放通量变化中，在零水位的情况下，多次观测到负通量，尤其在成熟期由于植物体老化和干田的双重作用出现了较长时间的负通量，说明干田的水稻土还能起到 CH₄ 汇的作用。1997 年为这 4 年中 CH₄ 排放通量最低的年份，其间歇灌溉是重要原因之一。因此为了减少甲烷排放，使用间歇灌溉或使用能在湿润土壤条件下生长的早稻品种，就能有效减少 CH₄ 排放。

根据常灌水情况下稻田甲烷排放的资料分析表明，稻田水位的深浅与甲烷排放有密切关系。图 6 为 1999 年 1 号田 3 个采样点的平均水位与稻田甲烷排放通量的关系，可以看出，接近于 0 水位时能抑制 CH₄ 排放（见插秧后 21 天及 36 天），但较浅的水位有利于 CH₄ 排放，如水位在 2 cm 左右时，都对应有 CH₄ 排放的峰值，因为浅水位既

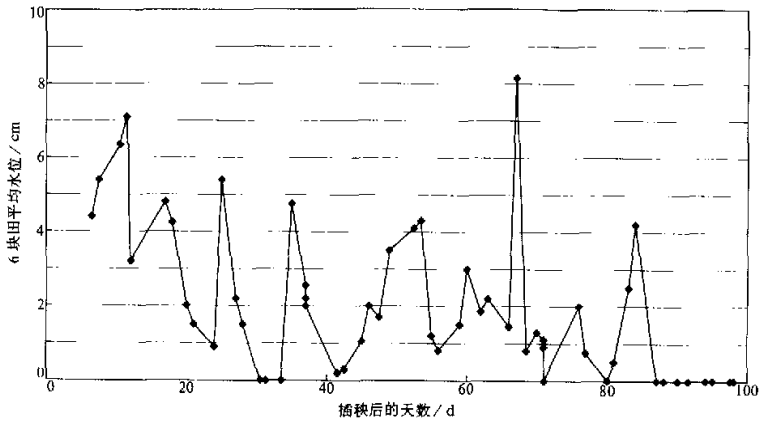


图 5 水稻生长季节稻田平均水位的变化（1997 年，金沙）

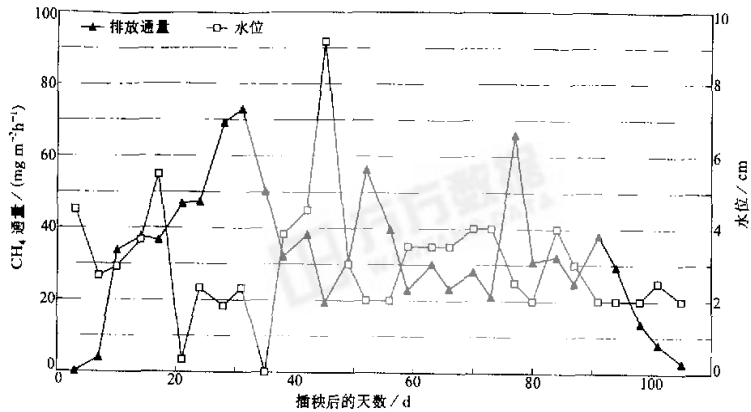


图 6 甲烷排放通量与稻田水位的关系（1999 年，1 号田）

达到了厌氧条件, 又有利于甲烷经气泡和热扩散排放。相反, 很高的水位却不利于 CH_4 排放, 正如图 6 中所示, 高水位对应的都是低排放, 所以为了减少 CH_4 排放, 应避免 2 cm 左右的低水位。

3.6 土壤的氧化还原电位 (Eh) 对稻田 CH_4 排放的影响

通常, 土壤的 Eh 值一般在 $-200 \sim 700$ mV 之间, 旱作土壤的 Eh 值在 $400 \sim 700$ mV 之间, 但水田土壤的 Eh 变动较大, 在淹水期间 Eh 值可以低至 -150 mV, 甚至更低, 排水烤田期间 Eh 可增至 500 mV 以上。一般 Eh 值随 pH 值的增高而减少, 如 pH 值以 7 为基础, 温度为 30°C 时, 增加一个 pH 值, Eh 减少 $60 \text{ mV}^{[8]}$ 。我们在金沙站稻田甲烷排放试验时, 从 1997~1999 年 3 个稻季生长季节同时测量了土壤的 Eh 值, 测量位置在水稻土层下 3 cm 处, 同时也测量了 pH 值, 测量结果表明, 在水稻生长季节, 金沙稻田的 pH 值变化不大。

图 7a、b 是 1997、1999 年稻田甲烷排放通量与 Eh 值的关系曲线, 图中的 CH_4 排放通量和 Eh 值都是同一试验田 3 个采样点的平均值。从图 7a 中看出, 在插秧后 85 d 左右 CH_4 排放通量很小, 接近于零, 此时也是水稻成熟期, 因晒田而无积水, 土壤通

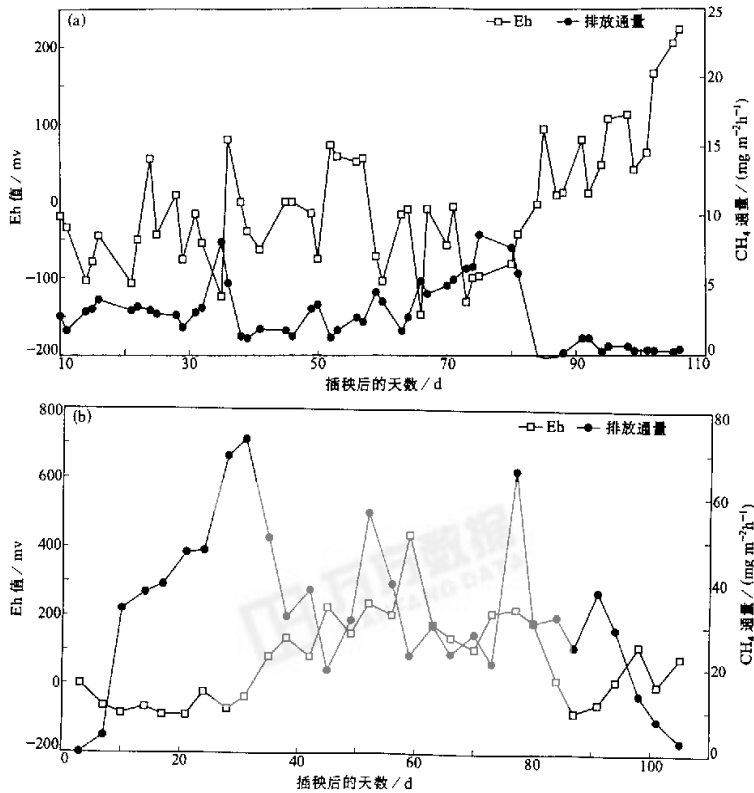


图 7 稻田甲烷排放通量与 Eh 值的关系
(a) 1997 年, V 号田; (b) 1999 年, I 号田

气性好转, Eh 值逐渐增到 200 mV 以上。而在插秧后 73~83 d 之间, Eh 在 -100~-150 mV, 在厌氧条件下, CH_4 排放相对较高。 CH_4 排放的另一峰值在插秧后 35 d 左右, 对应的 Eh 值在 -150 mV, 有利于 CH_4 生成。从图中看出, 除成熟期外, 其他时期 Eh 值大部分处在负值, 处正值时间短, 并且不超过 100 mV, 说明水稻土都处在透气性差的厌氧条件下, 以还原过程为主, 虽然有利于 CH_4 的产生, 但 1997 年的甲烷排放通量却是四年观测中最小的一年, 说明主要是间歇灌溉和水稻品种对 CH_4 排放的影响。图 7b 是 1999 年 CH_4 通量与 Eh 关系曲线。其 Eh 值与 1997 年 V 号田不同, 在负值区的时间短, 从水稻分蘖到结果期一直处在正值区, 最高可达 300 mV 以上, 但大部分处在 200 mV 以下, 适宜于水稻生长。所以其水稻植物体生长茂盛, 有利于 CH_4 输送排放, 这一年的 CH_4 排放通量最高。但在图 7 中仍能看到, Eh 相对低值时, CH_4 排放往往会出现峰值, 并且 Eh 在 100~200 mV 之间时仍可出现 CH_4 排放峰值, 可见 Eh 值在一定的范围中都可为 CH_4 产生和传输。

4 小结与讨论

4.1 显著的时空变化

综合上述的分析结果, 稻田甲烷的排放过程是受多种因素影响的一个十分复杂的过程, 造成了稻田甲烷排放通量的巨大时空差异, 即使在同一生长季节, 在同样的气候环境条件及耕作方式情况下, 不同的试验田之间, 甲烷排放通量变化也很大, 如 1996 年, 试验田之间 CH_4 排放通量的最大值与最小值差 8~9 倍, 因此在实际耕作条件下其空间分布不均匀性是明显的; 而 1996~1999 年年际之间也差异很大, 年平均中 1999 年的最大值与 1997 年最小值相差竟达 14 倍之多; 而对于不同地区、不同土壤的稻田 CH_4 排放通量的变化也很大, 根据 1988~1994 年的观测结果, 地处丘陵地带的四川乐山站 (酸性紫色土) 7 年的平均值为 $30 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ [3], 而金沙 1996~1999 年平均值仅为 $12 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 说明稻田甲烷排放的时空分布极不均匀, 尽管我们研究分析了可能造成这种不均匀原因的各影响因子, 但根据目前的观测资料及研究状况还不能很好解释如此之大的差异, 这给估计区域和全球的 CH_4 排放总量, 带来很大的困难。

4.2 水稻品种的影响

本研究发现, 选择根系小, 茎、叶相对较轻又能高产的水稻品种, 能减少 CH_4 排放。因此, 应该把选择合适的稻种作为稻田甲烷重要的减排措施而予以重视。

4.3 适当运用肥料和施肥量

适当的运用肥料及其用量可减少 CH_4 排放。在我们的试验中发现, 无机肥与大量农家肥混合使用, 会使 CH_4 排放增加, 使用无机肥可减少 CH_4 的排放, 但使用农家肥时, 只要适量控制用量, 并不一定使 CH_4 排放增加。所以选择合适的肥料类型并控制其用量是控制甲烷排放的重要措施。有研究表明使用有效微生物菌剂 (Effective Microorganisms) 作肥料, 能对甲烷排放起抑制作用^[9], 并能促进谷物生长, 提高谷物产量, 改善稻米口味, 且不含有害化学成分, 不污染环境, 这不失为一种好的选择。

4.4 稻田水位与 Eh 值的影响

适当的水管理也是减排的重要措施, 稻田水位能影响 Eh 值, 若控制适当的水位和 Eh 值, 如在淹水情况下, 避免 2 cm 左右的低水位或采用间歇灌溉或选择能在土壤渍水情况下生长的旱作水稻, 则均可有效减少稻田甲烷的排放。

4.5 优化组合各影响因子, 充分发挥减排潜能

水稻生长过程中, 甲烷排放受上述诸多因素的影响, 而各影响因子又只能在一定范围内起作用。一种因素的强干扰, 又会掩盖另一因子的作用, 如 1996 年的试验中, I、II、III 号田用了同一个稻种 (冈优-22), 而 IV、V 号田用了另一稻种 (D 优-68), 从干稻根和干茎叶的重量能判别其不同稻种的作用, 冈优-22 稻种因稻根和茎叶较轻, 可减少 CH_4 的排放, 而 IV、V 号田的干稻根和干草重量都较 I、III 号田重, 其 CH_4 排放通量也较 I、III 号田大, 但 II 号田由于过强的施肥作用干扰了稻种的作用, 使其排放通量增大, 而这种大量用肥并不能大幅度提高产量, 反而掩盖了能起降低排放作用的水稻品种的影响。IV 号田的排放通量明显小于 V 号田, 但它与 V 号田同一稻种, 因其施肥量明显少于其他试验田, 却能抑制该水稻品种的增排作用, 而少施肥并不降低产量。另外如温度的影响, 在水稻生长的初期, 其甲烷排放受上午与下午不同温度的影响, 但当水稻植物体生长到一定阶段, 在分蘖、结果期, 这种温度的影响又被其他因子的影响所掩盖。因此, 如能综合控制好各影响因子, 使其能减少 CH_4 排放的潜能充分发挥, 以达到最低排放率。如 1997 年是这四年中稻米产量最高, 稻田 CH_4 排放最低的年份, 其特点是这年使用了好的稻种和采用了间歇灌溉的措施, 仅这两种因子的共同作用, 就使稻田甲烷排放明显减少, 且其产量相对较高。

基于上述情况, 我们提出各种因子优化组合, 尽可能地抑制其增排作用, 充分发挥其减排潜力, 最大限度地减少稻田甲烷排放, 且又能提高稻米产量。应通过进一步试验、研究和模拟, 根据不同地区的实际情况找出优化组合的具体方案, 以适用于各水稻种植地区。实施对各种影响因子的最优组合, 以达到既能减少温室气体—— CH_4 的排放, 又能提高稻米产量的目的。

参 考 文 献

- 1 田中正之, 石广玉, 李吕明译, 地球在变暖, 北京: 气象出版社, 1992, 34~37.
- 2 Houghton, J., 戴晓芬, 石广玉译, 全球变暖, 北京: 气象出版社, 1998, 40~42.
- 3 Khalil, M. A. K., R. A. Rasmussen et al., Factors affecting methane emissions from rice fields, *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(D19), 25219~25231.
- 4 熊效振, 沈壬兴等, 太湖流域单季稻的甲烷排放研究, 大气科学, 1999, 23(1), 9~18.
- 5 Khalil, M. A. K., R. A. Rasmussen et al., Measurements of Methane Emissions from Rice Fields in China, *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(D19), 25181~25210.
- 6 黄俊, 中国西南地区稻田 CH_4 排放实验研究, 中国科学院大气物理研究所硕士学位论文, 1990.
- 7 上官行健, 稻田甲烷产生和排放过程的研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1993.
- 8 山西农业大学主编, 土壤学, 北京: 农业出版社, 1990, 317~323.
- 9 苗曼倩, 朱超群等, EM 对稻田甲烷排放抑制作用的初步研究, 应用气象学报, 1998, 9(4), 462~469.

Methane Emissions from Rice Fields in the Chengdu Plain of China

Ren Lixin, Wang Gengchen and Zhang Renjian

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Duan Changlin

(Institute of Mountain Disasters and Environment, Chengdu 410064)

M. A. K. Khalil and M. J. Shearer

(Department of Physics, Portland State University, P.O. Box 751 Portland, Oregon 97207-0751, U.S.A.)

R. A. Rasmussen and R. W. Dalluge

(Oregon Graduate Institute, P.O. Box 91000 Portland, Oregon 97291-1000, U.S.A.)

Abstract According to the measured data of four rice seasons between 1996 and 1999, characteristics of seasonal variation and annual variation of methane emission are analyzed for single-season rice in the Chengdu Plain. The results show a great variation in methane emission during the rice growing season, and the peak values appear during tillering period and fruiting period. A great inter-annual change is also observed and ranged from $2.35 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ to $33.95 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. The averaged value of CH_4 emission for the four years is $12 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Compared with $30 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ for the 7-year average of Leshan in Sichuan Province, there is an apparent regional difference. Methane emission from rice field is affected by several factors including temperature, fertilization, rice variety, soil oxidation-reduction potential and water depth of rice field and so on. Results show that the average temperature during rice growing season in the Chengdu Plain has a little influence on annual CH_4 emission. However, during the early growing season, the temperature has a relatively significant influence on daily variation of CH_4 emission from rice field. Another finding is that the weights of root, stalk and leaf of rice plant body have a significant influence on CH_4 emission. An optimum combination of many effective factors is proposed in order to develop its potential of reducing CH_4 emission.

Key words: rice field; methane; seasonal variation; annual variation

万方数据
WANFANG DATA