

西双版纳地区稻田甲烷的排放通量

杨光明^{1,2}, 武文明^{1,2}, 沙丽清^{1*}

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 2005年, 采用静态箱(暗箱)-气相色谱法对云南西双版纳热带地区单季稻田甲烷(CH_4)排放进行田间原位观测。试验设置了三个处理, 即无氮肥对照处理(NN)、低氮施肥处理(LN)和高氮施肥处理(HN), 氮肥(尿素和复合肥)水平分别为 $0 \text{ kg}/(\text{N} \cdot \text{hm}^2)$ 、 $150 \text{ kg}/(\text{N} \cdot \text{hm}^2)$ 和 $300 \text{ kg}/(\text{N} \cdot \text{hm}^2)$ 。结果表明在水稻生长期 CH_4 排放通量的季节变化峰值出现在拔节孕穗期, 且只有1个典型的排放峰。NN、LN和HN处理的 CH_4 季节平均排放速率分别为 $6.69 \pm 0.37 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $7.19 \pm 0.43 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $6.04 \pm 0.31 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。不同氮肥用量对 CH_4 排放通量的影响规律不明显。各处理的 CH_4 排放通量与温度的相关关系不同, 与稻田水深均无显著的相关关系。

关键词: 稻田; CH_4 排放; 氮肥; 温度; 水深

中图分类号: S13 X17

文献标识码: A

甲烷(CH_4)是仅次于 CO_2 的重要的温室气体之一, 其对温室效应的贡献可达15%^[1]。稻田是大气 CH_4 的主要源之一^[2], 约占大气 CH_4 总来源的10%~20%, 所以稻田 CH_4 排放的研究对于估算全球 CH_4 的源有很重要的意义。从分布上讲, 全球90%以上的水稻种植面积分布在亚洲, 中国是重要的水稻生产国, 水稻种植面积约占世界稻田总面积的22%, 产量约占世界水稻产量的38%^[3], 所以中国稻田 CH_4 排放的估算倍受关注。未来随着人口的增长, 粮食需求将会不断增加, 增施氮肥成为粮食增产的重要途径, 而增施氮肥对 CH_4 排放的影响有很大的不确定性。根据不同生态气候带、地貌特征以及耕作制度, 我国水稻田大致可分五大区: 华南、滇南水稻区、华中水稻区、长江中下游水稻区、西南水稻区和北方水稻区^[4]。至今中国五大稻作区 CH_4 排放已经有观测数据, 但是中国热带地区稻田 CH_4 排放一直未有观测。西双版纳地区属于滇南稻作区的一部分, 位于热带北缘, 有其独特的气候特点和耕

作制度。本研究在西双版纳地区选择典型的单季稻田定位观测整个水稻生长季节不同氮肥水平处理的 CH_4 排放特征, 旨在研究中国热带地区水稻田 CH_4 排放特征及其影响因素, 为进一步了解中国稻田 CH_4 排放格局提供基础数据, 为制定温室气体减排措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地区概况

试验于2005-06-16至2005-09-21在云南省西双版纳州勐腊县勐仑镇水稻田进行。研究地位于 $21^\circ 55' \text{N}$, $101^\circ 12' \text{E}$, 海拔约为600 m, 终年受到西南季风的控制, 属于北热带季风气候。据中国科学院西双版纳热带生态站气象站(位于中国科学院西双版纳热带植物园内)多年资料, 该地区年平均降雨量为1557 mm, 全年分为雾凉季(11月至翌年2月)、干热季(3~4月)和湿热季(5~10月)。年平

收稿日期(Received date): 2006-12-03; 改回日期(Accepted): 2007-04-19.

基金项目(Foundation item): 云南省自然科学基金(2004C0052M)和中国科学院知识创新工程重大项目(批准号: KZCX1-SW-01)资助。

[Supported by the Natural Science Foundation of Yunnan Province (2004C0052M) and the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (Grant No. KZCX1-W-01)]

作者简介(Biography): 杨光明(1979-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向为土壤生态学。E-mail: kate98982000@yahoo.com.cn [Yang Guangming(1979-), female, presently a candidate for M. Sc. Degree major in soil ecology.]

* 通讯作者(Author for correspondence): 沙丽清 [Sha Liqing, Tel: 0871-5112637, E-mail: shalq@xtbg.ac.cn]

均相对湿度为 86%, 全年平均气温为 21.3℃。土壤为渚育型水稻土。2005 年水稻田试验样地的土壤性质见表 1。

1.2 试验设置

试验依据当地的常规农作方式和预期的试验目的设置 3 种田间处理, 即低氮施肥处理 (LN)、高氮施肥处理 (HN) 和无氮肥对照处理 (NN), 每个处理设 3 个重复。水稻生长期的化学氮肥 (N: P₂O₅: K₂O = 15% : 15% : 15% 的复合肥和尿素) 用量为低氮施

肥处理 (LN) 150 kg/(N · hm²)、高氮施肥处理 (HN) 300 kg/(N · hm²) 和无氮肥对照处理 (NN) 0 kg/(N · hm²)。分别于 2005-06-23、2005-06-28 和 2005-08-08 施入返青肥、分蘖肥和穗肥, 施肥方案见表 2。其中 LN 处理施肥量与当地常规用量相当。在 3 块地力比较均匀的地块内, 每个重复设 1 个 30 / m² 左右的小区, 每个小区内布置 1 个观测点。以安装的观测箱底座确定观测点位置, 底座内面积为固定观测面积。

表 1 试验样地的土壤性质
Table 1 Soil properties of experimental sites

有机质 (g / kg)	全氮 (g / kg)	全磷 (g / kg)	全钾 (g / kg)	有效氮 (mg / kg)	有效磷 (mg / kg)	有效钾 (mg / kg)	有效铜 (mg / kg)	pH 值
19.26	1.28	0.235	14.20	81.50	0.40	81.75	6.35	5.38

表 2 各个处理试验区施肥用量
Table 2 Fertilizer dosages in NN, LN and HN plots (kg/hm²)

处理 Treatment	6月 21日 June 21			6月 28日 June 28			8月 8日 August 8		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
NN					37.5	37.5		37.5	37.5
LN	45	45	45	52.5	15.0	15.0	52.5	15.0	15.0
HN	45	45	45	127.5	15.0	15.0	127.5	15.0	15.0

试验期间, 稻田的管理同当地常规管理方式, 非水稻生长期稻田休闲, 休闲期长达 8 个月。前茬水稻收获后脱粒打谷都在田中进行, 稻草在田中焚烧, 残留稻茬在移栽水稻前耕翻入土。水稻品种为杂交稻冈优 151, 只种 1 季。2005-06-16 插秧, 09-21 收获, 全生育期为 98 d。种植密度为 20 cm × 15 cm, 每穴 1 株。插秧之前提前 5 d 灌水使土壤湿润, 插秧后保持 5 cm 左右水深。9 月初水稻成熟期排水晒田, 直到水稻收割。

1.3 气样采集及相关指标测量

各个处理每周采样 2 次, 施肥后每天采样 1 次, 持续 1 周。采样时间定为 9:00 开始, 11:30 之前结束。处理间 3 个箱体平行采样, 采样时间分别为关箱后的第 0 min、8 min、16 min、24 min、32 min。每次用注射器从箱内抽取 100 ml 气体样品用于分析 CH₄ 浓度, 以确定其排放通量。采样箱为静态暗箱, 由顶箱和底座组成。顶箱体积为 50 cm × 50 cm × 25 cm, 随水稻植株长高再加中段箱。顶箱安装有小型搅拌风扇, 以混匀箱内气体和平衡温度。采样时箱外罩棉被以降低阳光对箱体的加热。

气体采样时同时用 JM 624 便携式数字温度计同步测量地下 5 cm 土壤的温度 (T₁) 和地表温度 (T₂)、箱内气温 (T₃) 和大气温度 (T₄) (只记录每个采样点的采样起始温度和结束温度)。记录水稻生长阶段的淹水深度。

1.4 气体样品分析及通量计算

气体样品用配有 CA-5 气体样品进样仪的 Agilent 4890D 气相色谱仪分析。CH₄ 检测器为氢火焰离子化检测器 (FID), 载气为高纯氮气。根据线性拟合由箱内气体浓度的变化率计算排放通量, 用公式表示为

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{dC_i}{dt} \tag{1}$$

式中 F 为被测气体排放通量 (mg / (m² · h)), ρ 为标准状态下的被测气体密度, V 为观测箱的容积, A 为观测时箱体所覆盖的土地面积, P_0 和 P 分别为标准状态下空气绝对气压和采样地点的气压, T_0 和 T 分别为标准状态下空气绝对温度和采样时的箱内绝对温度, C_i 为 t 时刻箱内被测气体体积混合比浓度, t 为时间, dC_i / dt 为单位时间箱内待测气体浓度变

化率(采样间隔时间内线性拟合计算得到)。

2 结果与讨论

2.1 CH₄ 排放通量的季节变化动态

2.1.1 CH₄ 排放通量的季节变化规律

2005 年水稻生长期的 CH₄ 排放通量变化见图 1, 水稻各个生育期 CH₄ 排放量分布情况见表 3。从图 1 可以看出水稻生长期 CH₄ 排放总体上呈低-高-低的单峰模态, 排放高峰出现在拔节孕穗阶段,

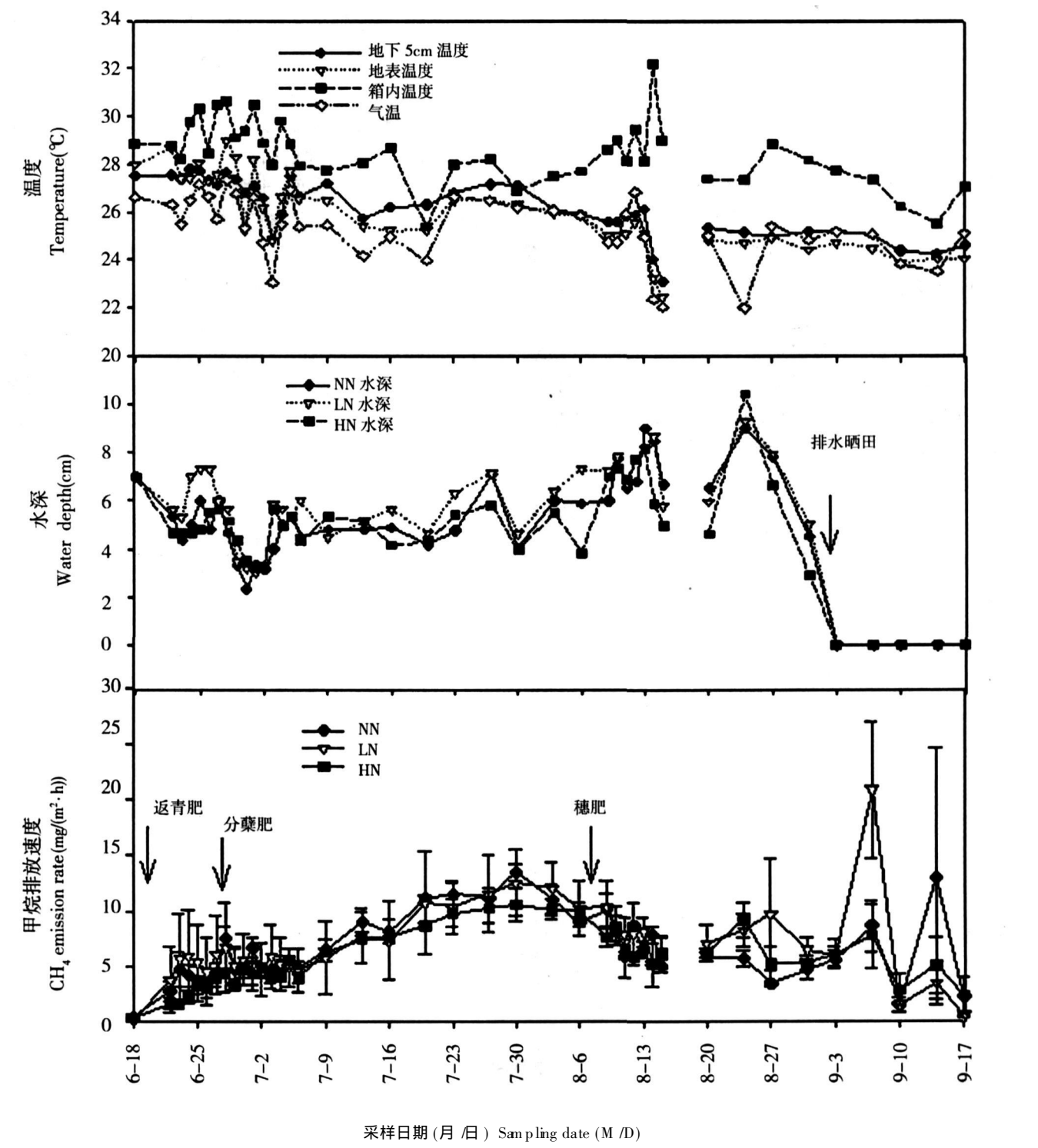


图 1 稻田温度、水深及 CH₄ 排放通量的季节变化

Fig 1 Seasonal variation of temperature, water depth and CH₄ emissions in paddy field

且只有 1 个典型的排放峰。不同氮肥水平的处理并没有改变 CH₄ 的季节排放规律。在水稻返青期与分蘖初期稻田 CH₄ 排放通量不高, 但是随着土壤淹水时间的延长及水稻的生长, 有机物不断分解, CH₄ 排放量呈波动上升趋势, 到 7 月中旬分蘖盛期开始快速上升, 在拔节孕穗期达到高峰。

稻田 CH₄ 排放率是土壤 CH₄ 产生、再氧化及排放传输三个过程相互作用的结果^[5]。按照当地常规管理, 在本试验中水稻移栽前只有前茬水稻残茬耕翻入土, 没有添加任何有机肥。移栽初期没有出现 CH₄ 排放的峰值。这可能与西双版纳地区 6 月到 10 月正处于雨季阶段, 频繁的降雨使稻田一直维持较深的水层 (6~ 7 cm), 阻碍了土壤生成 CH₄ 的排放有关。并且本阶段植株个体较小, 对 CH₄ 传输的贡献较小^[6]。加上稻田长时间休闲造成土壤 Eh 高, 产甲烷菌的活动和生长受到抑制^[7]。在 06- 21 和 06- 28 进行了两次追肥, 追肥时进行排水, 使水深维持在 2 cm 左右, 以减少氮素的流失。所以在两次追肥后都出现 CH₄ 排放的小幅增加, 但很快就会因为大量降雨导致的水层增高而回落。

较大的 CH₄ 排放峰值出现在水稻拔节孕穗期, 相应的这一时期的平均排放速率和累积排放量也最大。可能是由于这一时期, 水稻生长旺盛, 微生物活动活跃, 水稻根系老化、死亡, 根系分泌物及所施的化肥都为甲烷菌的活动提供了碳源, 加之适宜的温度和淹水厌氧条件造成了排放高峰^[8]。

从拔节孕穗期末到抽穗开花期的过渡时期 CH₄ 排放开始下降, 在美国^[9-10]、意大利^[11]、印度^[12] 等地的田间测试也有类似趋势。Nouchi^[13] 指出水稻叶鞘的微孔是 CH₄ 排放的主要通道。抽穗以后水稻植株不再有新叶抽出, CH₄ 排放或许受到这些通道的限制。另一方面, 土壤及水土界面 CH₄ 氧化量的增加也可能导致抽穗后 CH₄ 排放的减少^[14]。

在抽穗开花期的 08- 27 左右出现的较高排放通量可能是由于根系分泌物的数量从水稻开花期到成熟期不断增加^[15], 并且根系腐败物质增多造成了较高的 CH₄ 产生率^[16-17]。

值得注意的是, 本试验中在成熟期出现了两个比较高的峰值。第一个峰值出现在 09- 07。从 2005- 09- 02~ 21 水稻收割之前排水烤田, 可能是

表 3 不同水稻生育期 CH₄ 排放特征

Table 3 Characteristics of CH₄ emission from paddy fields in each rice growing stage

处理	生育期	平均通量 (±SE) (mg / (m ² • h))	季节累积排放量 (g / m ²)	占生长季比例 (%)
NN	返青期	2.44 ± 0.50	0.59	3.7
	分蘖期	7.21 ± 0.48	4.33	27.5
	拔节孕穗期	10.35 ± 0.40	5.96	37.9
	抽穗开花期	5.30 ± 0.27	2.93	18.6
	成熟期	5.02 ± 1.37	1.93	12.3
	整个生长季	6.69 ± 0.37	15.74	100
LN	返青期	3.24 ± 0.72	0.78	4.6
	分蘖期	6.87 ± 0.41	4.12	24.4
	拔节孕穗期	10.73 ± 0.30	6.18	36.6
	抽穗开花期	7.83 ± 0.65	4.32	25.5
	成熟期	3.94 ± 1.68	1.51	8.7
	整个生长季	7.19 ± 0.43	16.91	100
HN	返青期	1.45 ± 0.30	0.35	2.5
	分蘖期	6.08 ± 0.39	3.65	25.7
	拔节孕穗期	9.48 ± 0.29	5.46	38.4
	抽穗开花期	6.34 ± 0.31	3.50	24.6
	成熟期	3.26 ± 0.61	1.25	8.8
	整个生长季	6.04 ± 0.31	14.21	100

土壤中闭蓄态 CH_4 的释放造成了此次的较高排放。LN 处理烤田期 CH_4 排放的峰值甚至高于拔节孕穗期的峰值, 但是这种爆发式排放的持续时间很短。Denier 等^[18]观测了水田烤田时土壤 CH_4 释放过程, 同时测量了烤田前土壤闭蓄的甲烷总量, 发现 64% 的土壤闭蓄态甲烷在烤田期间排向大气 (避免了土壤氧化)。Yagi 等^[19]则指出间歇灌溉的稻田中当水刚排干时发现 CH_4 排放急剧增加, 稍后开始迅速下降。其原因是土壤中储存的 CH_4 在田间水刚排干时迅速释放到大气中, 而后由于氧化的增加, CH_4 的排放开始下降。第二个峰值的出现可能与之前的强降雨有关。在 2005-09-07~14 之间出现了一次较强的降雨, 土壤又恢复厌氧环境, 但田间无积水, 产生的 CH_4 排放不经水层阻挡, 提高了传输效率。并且此阶段环境温度仍然较高, 有利于产甲烷菌的活动。但是各个处理的排放峰值有较大差异, 季节排放速率最低的 HN 处理此时的排放峰值最高。高峰过后各个处理的排放通量迅速下降, 短期降雨的影响基本消失。由表 3 可以看出, 各个处理成熟期的排放量占季节排放量的比例为 8.8%~12.3%, CH_4 爆发式排放并没有使成熟期的 CH_4 排放占主导地位。

2.1.2 CH_4 排放通量在各生育期的分布

水稻各个生育期通量分布比例见表 3。总体看来, 水稻生长旺盛的分蘖期、拔节孕穗期和抽穗开花期 CH_4 排放速率相对较高, 相应的 CH_4 累积排放量也较高。如果将水稻返青期和分蘖期划分为营养生长期, 拔节孕穗期、抽穗开花期和成熟期划分为生殖生长期, 则 NN、LN 和 HN 处理在生殖生长期的排放量分别占整个季节累积排放量的 84%、86.6% 和 88.7%。可见对水稻生长后期排放量的控制是减排的关键所在。

2.2 CH_4 排放通量与氮肥水平的关系

本研究没有发现氮肥施用对 CH_4 排放影响的规律性。方差分析结果表明只有 LN 处理和 HN 处理的 CH_4 排放通量有显著性差异, 其季节平均排放通量分别为 7.19 ± 0.43 和 $6.04 \pm 0.31 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。NN 对照处理的 CH_4 季节平均排放通量为 $6.69 \pm 0.37 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 与 LN 处理和 HN 处理都无显著性差异。进一步对处理间在返青期、分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期和成熟期的排放通量分别进行方差分析, 发现都无显著差异, 施肥处理的影响不因生育期不同而不同。

施肥对 CH_4 排放的影响很复杂。大量研究^[20-22]都认为植物残体、动物粪便等有机肥能增加 CH_4 排放, 这是因为它为产甲烷菌提供极为丰富的产 CH_4 基质。但是各类化肥对稻田 CH_4 排放的影响机理还存在很大争议。施用化肥可能影响土壤 pH 值、Eh 值等, 从而引起 CH_4 排放量的增减。但不同的试验结果差异很大, 有的甚至相反^[9, 23, 24]。不同氮肥水平处理对稻田 CH_4 排放的影响机理还有待进一步研究。

2.3 CH_4 排放通量与温度的关系

土壤温度对土壤微生物活性和 CH_4 产生具有重要影响; 同时高温促进水稻生长, 水稻植物体的呼吸作用和蒸腾作用加快, 使 CH_4 通过植物体加速向大气释放; 温度升高也能使土壤中 CH_4 气体通过水层的扩散速率加快, CH_4 气体较易形成气泡冒出水面, 避免了在稻田氧化区域的长时间停留, 减少了稻田 CH_4 的再氧化^[3]。

对 CH_4 排放通量与所测得的地下 5 cm 土温 (T_1)、地表温度 (T_2)、观测时箱内温度 (T_3) 和气温 (T_4) 分别进行线性和指数回归, 发现 NN 处理 CH_4 排放通量与温度没有显著的相关关系; LN 处理 CH_4 排放通量与 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 都呈显著线性负相关 ($P < 0.05$), 其中与箱内气温的拟合最好, 回归方程为 $F = 42.049 - 1.228T_3$ ($R^2 = 0.204$, $P < 0.01$) (2) 式中 F 表示 CH_4 排放通量, T_3 表示观测时箱内温度。

HN 处理的 CH_4 排放通量与 T_2 和 T_3 都有显著的负线性相关关系 ($P < 0.05$), 但不是很敏感, CH_4 排放通量的变化不能很好的用温度进行解释。

进一步对三个处理水稻各生育期的 CH_4 排放通量与各温度进行曲线估计, 发现 NN 处理的 CH_4 排放通量在水稻抽穗期与 T_3 有显著的线性正相关关系 ($R^2 = 0.285$, $P < 0.05$); LN 和 HN 处理的 CH_4 排放通量在水稻拔节孕穗期都与 T_3 有显著的线性负相关关系。值得注意的是这种相关关系并没有出现在温度变化幅度相对较大的返青分蘖期, 而是出现在排放通量相对较大的时期。

很多田间试验和室内实验表明温度对 CH_4 的产生有明显的影^[25, 26], 但并不是所有的研究结果都证明温度和稻田 CH_4 排放之间有相关关系^[27, 28], CH_4 排放的季节动态不能直接归咎于温度的季节变化。Yavitt 等^[29]指出影响稻田 CH_4 排放的因子很多, 环境因子之间存在复杂的交互作用。当一个或

多个环境因素受到限制时, 温度就不再是引起 CH_4 排放季节变化的主导因素。大田试验的影响因子复杂, 因而本研究中各个处理稻田 CH_4 排放季节变化同样不能用温度完全解释。

2.4 CH_4 排放通量与水深的关系

水管理方案通过调节土壤的氧化还原电位状态, 同时对影响 CH_4 排放的三个过程——产生、再氧化及传输发生作用^[30]。长期淹水会降低土壤 Eh 值, 增加 CH_4 的排放; 而水层过深, 土壤中已产生的 CH_4 在通过气泡或以扩散的形式穿越水层时, 被氧化掉的量增加, CH_4 的排放量反而减少^[2]。不同的淹水程度直接影响有氧和无氧区域的相对大小, 从而影响 CH_4 的产生和氧化。然而水层深度与 CH_4 排放通量之间的关系很难定量描述。

本试验中整个水稻生长季节, 稻田水深在 0 cm 到 12–30 cm 变动, 除了成熟期 (2005–09–02~17) 排水晒田, 其他时间田间都有水层, 只是在水稻生长的分蘖期、拔节孕穗期和抽穗开花期受降雨量影响水深波动相对较大。水稻生长期正好处于西双版纳地区的雨季, 雨量充沛, 雨水足够维持稻田里一定的水深, 所以除了插秧前 2d 引水耙田, 整个水稻生长期没有进行过引水灌溉。线性相关分析表明无氮、低氮和高氮 3 个处理的 CH_4 排放通量与水深都无显著的相关关系。这与邹建文等^[31]的研究结果一致。

3 结论

1. 在水稻生长季节 CH_4 排放通量的季节变化峰值出现在拔节孕穗期, 并且只有 1 个典型的排放峰;

2. 各施肥处理的季节平均排放速率分别为 $6.69 \pm 0.37 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $7.19 \pm 0.43 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $6.04 \pm 0.31 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;

3. 不同氮肥水平对 CH_4 排放通量的影响规律不明显;

4. 各个处理的 CH_4 排放通量与温度的相关关系因不同施肥处理和不同水稻生育期而不同;

5. 各个处理的 CH_4 排放通量与稻田水深均无显著的相关关系。

致谢: 本研究得到中科院西双版纳热带植物园王锐老师和严玉平先生、中科院大气物理研究所郑循华老师和王迎红、谢宝华及顾江新博士等的大力

支持和无私帮助, 在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献 (References)

- [1] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect [J]. *Science*, 1990, 248: 1217~1219
- [2] Wang M X, Shangguan X J, Shen R X, *et al*. Methane production, emission and possible control measures in the rice agriculture [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1993, 10(3): 307~314
- [3] Jiang C S, Wang Y S, Zheng X H, *et al*. Advances in the research on methane emission from paddy fields and its affecting factors [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(5): 663~669 [江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放影响因素及其研究进展 [J]. 土壤通报, 2004, 35(5): 663~669]
- [4] Li J, Wang M X, Zheng X H, *et al*. Advances in mechanisms research of methane emission from the rice ecosystem [J]. *China Basic Sciences*, 2000, 7: 19~23 [李晶, 王明星, 郑循华, 等. 稻田生态系统甲烷排放的机理研究 [J]. 中国基础科学—研究进展, 2000, 7: 19~23]
- [5] Shangguan X J, Wang M X, Shen R X. Regularity of methane emission from rice paddy fields [J]. *Advances in Earth Sciences*, 1993, 8(50): 23~36 [上官行健, 王明星, 沈汪兴. 稻田 CH_4 的排放规律 [J]. 地球科学进展, 1993, 8(50): 23~36]
- [6] Wang M X, Li J, Zheng X H. Methane emission and mechanisms of methane production, oxidation, transportation in the rice fields [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 22(4): 600~612 [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]
- [7] Mayer H P, Conrad R. Factors influencing the population of methanogenic bacteria and the initiation of methane production upon flooding of paddy soil [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1990, 73: 103~112
- [8] Lin K F, Xiang Y L, Jiang D B, *et al*. Methane emission flux from paddy fields and its control in Hubei [J]. *Agronomy Environmental Protection*, 2000, 19(5): 267~270 [林匡飞, 项雅玲, 姜达炳, 等. 湖北地区稻田甲烷排放量及控制措施的研究 [J]. 农业环境保护, 2000, 19(5): 267~270]
- [9] Lindau C W, Bolling P K, Delaune R D, *et al*. Effect of urea fertilizer and environmental factors on methane emissions from a Louisiana USA rice field [J]. *Plant and Soil*, 1991, 136: 195~203
- [10] Huang Y, Sass R L, Fisher F M. Methane emission from Texas rice paddy soils. I. Quantitative multi-year dependence of CH_4 emission on soil property, cultivar and grain yield [J]. *Global Change Biology*, 1997, 3: 479~489
- [11] Schütz H, Seiler W, Conrad R. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields [J]. *Biogeochemistry*, 1990, 11: 77~95
- [12] Parashar D C, Mitra A P, Sinha S K, *et al*. Methane budget from Indian paddy fields [A]. In Minami K, Mosier A, and Sass R L (eds). CH_4 and N_2O : Global Emissions and Controls from Rice Fields and Other Agricultural and Industrial Sources [C]. Yokendo Publishers, Tokyo, 1994: 27~39

- [13] Nouchi I. Mechanisms of methane transport through rice plants [A]. In Minami K, Mosier A and Sass R L (eds). CH_4 and N_2O : Global Emission and Controls from Rice Fields and Other Agricultural and Industrial Sources [C]. Yokendo Publishers Tokyo 1994 87~ 105
- [14] Schlütz H, Holzapfel P, Schom A, Conrad R, *et al*. A three-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 16405~ 16416
- [15] Bosse U, Frenzel P. Activity and distribution of methane-oxidizing bacteria in flooded rice soil microcosm sand in rice plants (*Oryza sativa*) [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63: 1199~ 1207
- [16] Shangguan X J, Wang M X. Methane production in rice paddy fields [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1993, 8(5): 1~ 12 [上官行健, 王明星. 稻田土壤中甲烷的产生 [J]. 地球科学进展, 1993 8(5): 1~ 12]
- [17] Shao K S, Li Z. Effect of rice varieties and fertilization measures on methane emission from paddy rice [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1996, 32(4): 505~ 513 [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]
- [18] Denier van der Gon H A C, Breemen van N, Neue H U, *et al*. Release of entrapped methane from wetland rice fields upon soil drying [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(1): 1~ 9
- [19] Yagi K, Tsunota H, Kanda K, *et al*. Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field. Automated methane monitoring [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10 255~ 267
- [20] Wassmann R, Neue H U, *et al*. Temporal patterns of methane emissions from rice fields treated by different modes of N application [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99 16457~ 16462
- [21] Wang Z Y, Xu Y C, Li Z, *et al*. A four-year record of methane emissions from irrigated rice fields in the Beijing region of China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58 55~ 63
- [22] Setyan P, Makarin A K, Fagi A M, *et al*. Crop management affecting methane emissions from irrigated and rainfed rice in Central Java (Indonesia) [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58 85~ 93
- [23] Jiao Y, Huang Y, Zong L G, *et al*. Impact of different levels of nitrogen fertilizer on CH_4 emission from different paddy soils [J]. *Environmental Science*, 2005, 26(3): 21~ 24 [焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 CH_4 排放的影响 [J]. 环境科学, 2005 26(3): 21~ 24]
- [24] Cao J L, Ren L T, Chen G Q, *et al*. Effect of mid-season aeration on methane emission of rice fields [J]. *Rural Eco-Environment*, 1998, 14(4): 1~ 4 [曹金留, 任立涛, 陈国庆, 等. 水稻田烤田期间甲烷排放规律研究 [J]. 农村生态环境, 1998 14(4): 1~ 4]
- [25] Husin Y A, Murtiyarso D, Khalil M A K, *et al*. Methane flux from Indonesian wetland rice: The effect of water management and rice variety [J]. *Chemosphere*, 1995, 31: 3153~ 3180
- [26] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al*. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1998, 15(4): 569~ 579
- [27] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al*. Characters of greenhouse gas (CH_4 , N_2O , NO) emissions from croplands of southeast China [J]. *World Resource Review*, 1999, 11(2): 239~ 246
- [28] Cai Z C, Xing G X, Shen G Y, *et al*. Measurements of CH_4 and N_2O emissions from rice fields in Fengqiu, China [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1999, 45(1): 1~ 13
- [29] Yavitt J B, Lang F E, Wieder R K. Control of carbon mineralization to CH_4 and CO_2 in anaerobic Sphagnum-derived peat from Big Run Bog, West Virginia [J]. *Biogeochemistry*, 1987, 4(2): 141~ 157
- [30] Shangguan X J, Wang M X. Possible measures for the reduction of methane emission from rice paddy fields [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1993, 8(5): 55~ 62 [上官行健, 王明星. 稻田 CH_4 排放的控制措施 [J]. 地球科学进展, 1993, 8(5): 55~ 62]
- [31] Zou J W, Huang Y, Zong L G, *et al*. A field study on CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from rice paddy and impact factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6): 758~ 764 [邹建文, 黄耀, 宗良刚, 等. 稻田 CO_2 , CH_4 和 N_2O 排放及其影响因素 [J]. 环境科学学报, 2003 23(6): 758~ 764]

CH₄ Emission from Paddy Fields in Xishuangbanna, SW China

YANG Guangning^{1, 2}, WU Wenming^{1, 2}, SHA Liqing¹

(1 *Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Kunming 650223, China;*

2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract Atmospheric CH₄ contributes about 15% to the greenhouse effect and its rank is next to CO₂ in the atmosphere. CH₄ emission from paddy fields plays an important role in global CH₄ emission, which has been given special concern since industrial revolution. To this day the CH₄ emission data are already available in all the five major rice culture regions in China, but there is still no relevant observation in tropical regions of China. By using the static opaque chamber and gas chromatography technique, a field experiment was carried out during rice growing season to investigate CH₄ emission pattern from single rice fields in Xishuangbanna, Yunnan, Southwest China. Three treatments were applied as the control (NN, no N fertilizer application), low N fertilizer level (LN, 150 kg/N • hm⁻²) and high N fertilizer level (HN, 300 kg/N • hm⁻²). Urea was used as the main nitrogen source in this study. The results showed that CH₄ emission varied seasonally and the typical emission peak appeared in bolting stage. The mean seasonal emission rates of CH₄ were $6.69 \pm 0.37 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$, $7.19 \pm 0.43 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ and $6.04 \pm 0.31 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ for treatment NN, LN and HN, respectively. The effect of N fertilizer application on CH₄ emissions was uncertain. CH₄ emission from LN treatment was significantly higher than that from HN treatment, while both LN and HN treatments showed no obvious difference with NN treatment. The correlation between CH₄ emission and temperatures depended on different N fertilizer application levels and rice growing stages. The close relation occurred in bolting and heading stages when we observed the relatively larger CH₄ effluxes from rice fields. Although CH₄ emission was strongly affected by water depth, no pronounced relationship appeared between CH₄ emission and water depth over the rice growing season.

Key words paddy field; CH₄ emission; N fertilizer; temperature; water depth