

我国华中地区稻田甲烷排放特征

上官行健 王明星 沈壬兴 王跃思

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

R. Wassmann H. Rennenberg W. Seiler

(夫朗和费大气环境研究所, 德国)

谢小立 王卫东 谢克和

(中国科学院长沙农业现代化研究所)

提 要

本文主要讨论地处我国华中水稻生态区的湖南红壤稻田的 CH_4 排放特征。稻田 CH_4 排放的日变化都有一致的规律, 即在下午 16:00 左右出现最大值; CH_4 排放的日变化幅度与天气条件和水稻植物体有关; CH_4 排放的日变化与温度日变化的相关性很好 ($R > 0.90$)。早稻和晚稻的 CH_4 排放季节变化规律有明显的差别, 这主要是由于早、晚稻水稻生长期间的天气特别是空气温度变化的差异引起的。早稻 CH_4 排放率在水稻生长期 (6 月) 略大, 而晚稻在水稻移栽后几天内 CH_4 排放就达到整个季节中的最大值, 以后随时间逐渐降低; 缺水会使 CH_4 排放率明显降低, 而且在重新灌水后相当长时间内 CH_4 排放率没有回升; CH_4 排放在全有机肥的田中最大, 然后依次是常规施肥、全沼渣肥及化肥田; 尿素、氯化钾和复合肥的多施可降低稻田 CH_4 排放率; 不同施肥田中 CH_4 排放率的温度效应不同; 施肥是控制 CH_4 排放的一种可行手段; 在整个晚稻生长季节中瞬时 CH_4 排放率与瞬时温度呈明显的指数关系; 在 1991 年双季水稻生长季节中, 稻田中 CH_4 的排放量为 67.96 g m^{-2} , 其中早稻的 CH_4 排放率为 $0.36 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 晚稻为 $0.48 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。

关键词: 甲烷排放; 日变化; 季节变化; 温度; 施肥。

一、引 言

CH_4 在大气中的目前含量约为 1.72 ppm。在过去的十多年中, 其浓度一直以平均每年 0.8%~1.0% 的速度在增加^[1], 由于 CH_4 在全球气候及大气化学中的重要作用, 这种现象已引起国际学术界的极大关注。初步的观测使人们普遍认为大气中 CH_4 含量的增加是由于大气 CH_4 源, 特别是人为源的增加及汇的减弱引起的, 但是这个推断在定

性上依然缺乏依据, 在定量上更不能达到估算、预测的要求, 一个很关键的问题是: 大气 CH_4 的各个源的强度有多大? 它们是否已经及怎样在变化着? 将来又如何变化? 因此, CH_4 各生物来源及各非生物来源的实地测量就显得格外重要了。稻田是大气 CH_4 的主要人为源之一, 稻田 CH_4 排放源约占大气 CH_4 总来源的 20%, 占人为源的 30%, 水稻产量与世界人口增长和社会经济的发展有特别密切的关系, 因此稻田被认为是使大气 CH_4 含量不断增加的重要原因之一。

我国稻田 CH_4 排放通量的资料已在杭州及四川乐山等地区取得过^[2-4], 填补了我国 (约占全球水稻种植面积的 23%) 稻田 CH_4 排放观测的空白, 很大程度地提高了全球稻田 CH_4 源强估算的精度, 同时也更揭露出稻田 CH_4 排放的很大的时空变化, 即在各不同地点观测到的 CH_4 排放率有很大的变化; 在同一地点也观测到 (1) 不同年份有不同的排放量以及不同的排放规律 (杭州 1988 年以及 1989 年; 乐山 1988 年与 1989 年); (2) 在一日中排放速率有较大的波动; (3) 在水稻生长季节中 CH_4 排放率随时间还不断变化。稻田 CH_4 排放的时空变化是全球各地稻田土壤类型、气候等地理条件、水稻品种及农业操作等多种因素综合作用的结果, 因此较精确的全球稻田 CH_4 排放的估算必须建立在对全球主要水稻生态区相当了解的基础上。

由于我国水稻种植面积占世界五分之一以上, 在四川乐山及杭州测出的 CH_4 排放值又相对高, 因此我国各主要水稻生产区稻田 CH_4 排放通量的获取, 不仅对全球稻田 CH_4 排放的估测乃至对全球大气 CH_4 的收支平衡的理解有很重要的意义, 而且能改善我们对 H_4 排放的影响因子的认识。但是我国水稻田分布广泛、特征相当复杂, 要了解全国稻田的 CH_4 排放, 需要在各主要水稻产区进行系统观测研究。

本文将详细讨论占我国水稻种植面积三分之一左右的华中红壤水稻生态区的稻田 CH_4 排放特征及规律。

二、实验地点及方法

野外观测于 1991 年在湖南省桃源县长沙农业现代化研究所的农业实验场进行的 (110°30'E、28°55'N)。场地内土壤为红土母质发育而成的水稻土, 粘壤质地。土壤有机质为 2.65%, 全 N 为 0.15%, 全 P_2O_5 为 0.13%, 全 K_2O 为 0.14%, 水提 pH 为 4.8。桃源县年平均温度为 16.5°C, 年降水量为 1448 mm, 年日照 1513 小时^[5]。

稻田在冬季种植绿肥紫云英, 时间为当年 9 月中旬至第 2 年 4 月中旬, 每年 4 月中旬耕地灌水, 4 月 30 日左右移栽, 早稻于 7 月 15 日收割, 按照当地传统的收获方式, 收割脱粒都在田中进行, 脱粒后稻秆都铺在田中, 耕地、灌水后于 7 月 18 日左右移栽晚稻, 于 10 月 20 日前收割。为和本地区常规施肥进行对照, 实验田被分成四块, 分别施以当地常规施肥 (化肥、紫云英、稻草, 有机肥与无机肥之比为 1:1)、有机肥 (猪粪、紫云英、稻草)、化肥 (复合肥、氯化钾及尿素) 和沼气池中的沼渣肥。化肥田及沼渣肥田中的紫云英、稻草等都在施肥前被去除。

CH_4 通量观测是由自动的连续测量系统完成的。为研究 CH_4 排放与温度的关系, 每隔 15 分钟, 还同时测取空气、水以及土壤 2、5、10、15cm 深的温度。测量系统的细节见文献[3]。

三、结果与讨论

1. 日变化

和其它地方观测到的一样,早稻及晚稻的 CH_4 排放在一日内有很大波动,并且很有规律,但具体的变化规律又与其它地方不同。本实验结果一般是在下午 16 时左右出现 CH_4 排放最大值(图 1a,b; 图 2a,b),与杭州观测到的日变化现象不完全一致。我们认为这可能是由于水稻品种和区域地貌不同造成的,有些品种的水稻在夏日下午强烈阳光及高温条件下有“休眠”的现象,堵住了土壤中已生成的 CH_4 向大气传输的主要通道——水稻植物体的空腔系统,因此才出现几种不同的日变化形式^[3]。虽然夏日湖南地区比杭州地区更为炎热,但是始终只发现下午排放出现极大值的日变化型式,这说明可能是由于水稻品种的差异,杭州地区所发现的水稻“休眠”现象在湖南是不存在的。 CH_4 排放日变化应该是由土壤中 CH_4 产生、向大气传输及 CH_4 的再氧化三个过程,特别是前两个过程的日变化引起的,但我们在土壤 CH_4 产生率的观测研究中并没有发现土壤中 CH_4 产生率有明显的在下午出现最大的日变化规律^[6],因此我们认为影响排放日变化的主要原因是 CH_4 传输路径的输送效率的日变化。一般来说,下午温度较高,可能增强植物体、气泡形成及水层扩散这三个 CH_4 传输路径的传输能力,从而加快了土壤中生成的 CH_4 向大气排放的速度。

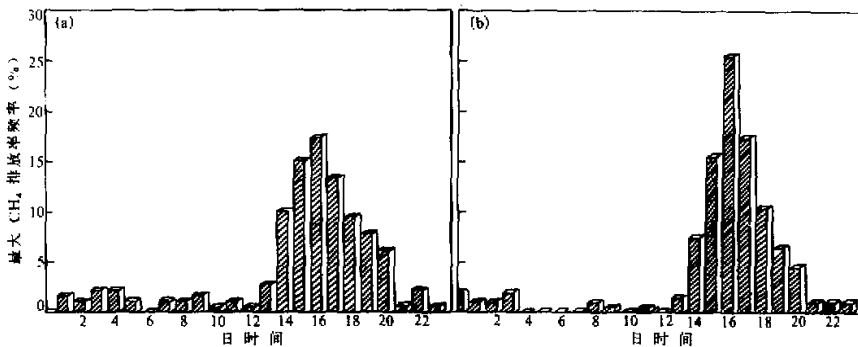
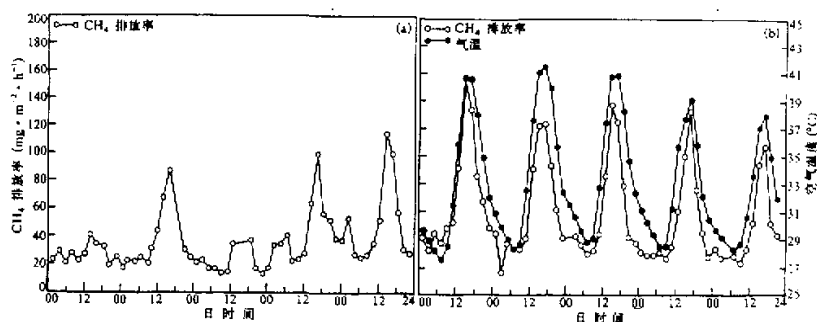


图 1 稻田 CH_4 排放日最大值出现的时间频率分布图
(a) 早稻, (b) 晚稻

天气情况,特别是空气温度,还影响 CH_4 排放日变化的幅度(图 3)。在天气晴朗及高温天气,一日之间温度变化明显,从而使 CH_4 传输路径的作用变化显著,因而有较大的排放变化幅度,而在阴雨天气则反之。 CH_4 排放的日变化幅度不仅受温度的影响,而且还随水稻生长的时间而变化,对于早稻,日排放最大值与最小值的比值在 5 月、6 月和 7 月的平均值分别为 11.4, 5.4 和 5.4,总体上随季节呈下降趋势,这说明影响 CH_4 排放日变化幅度的因素还有土壤中的有机养分和水稻植物体的生长情况。例如,当水稻长高后,由于叶的遮挡,因气温变化而引起的稻田土壤表面及土壤中温度的

图2 早稻 (a) 及晚稻 (b) CH_4 排放的日变化

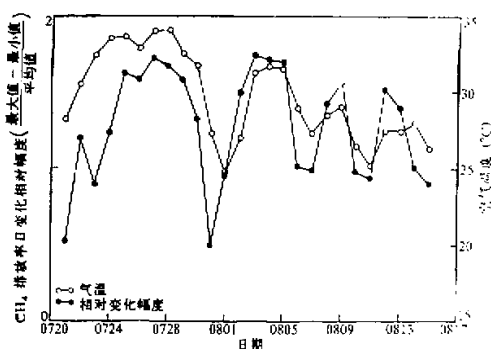
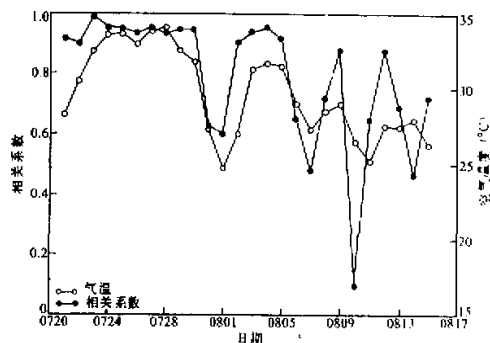
变化将相对减弱,从而使土壤产生、传输过程的波动程度降低。这种现象在晚稻生长期间同样存在。

由图 2b 可以看到, CH_4 排放率与温度有很好的正相关性。例如自 7 月 26 日到 7 月 30 日,施有机肥田中 CH_4 排放与空气温度的线性相关系数都大于 0.93。图 4 是晚稻 7 月 21 日到 8 月 15 日每日 CH_4 通量及温度相关系数的季节变化趋势,可以看到相关系数与温度(阴晴)呈正相关关系。在晴天, CH_4 排放率与温度的相关性较大,而阴雨天或气温较低时则较小。这种现象在杭州也观察到^[2],我们认为在阴雨天,微弱的温度和太阳光强度的变化并不能引起稻田土壤中 CH_4 生成和向大气传输路径的显著变化,土壤中随机生成的 CH_4 又随机地排向大气,从而使 CH_4 排放率与温度之间的相关性较低。

2. 季节变化

图 5 给出了 1991 年早稻及晚稻生长期间稻田 CH_4 排放的季节变化

情况。 CH_4 排放的季节变化是稻田土壤中有机物含量、天气变化及水稻植物生长状态等多种因素综合作用的结果。早稻 CH_4 排放在水稻生长的各个阶段的差别相对不明

图3 CH_4 排放日变化幅度与气温的关系图4 CH_4 排放率与气温的相关系数和日平均气温的关系

显,一般在6月份较大些,然后依次是5月及7月;对于晚稻, CH_4 排放在水稻种植初期(7月)最大,然后依次是8月和9月,即随着水稻的生长, CH_4 排放率不断降低。引起早稻和晚稻的这种不同季节变化的主要原因可能是温度。在两季稻生长初期,土壤中有有机物含量都相对高,植物体生长状态也类似,但早稻的初期气温相对较低,并随着水稻的生长呈上升趋势,而晚稻初期气温很高,并随着水稻的生长呈下降趋势。晚稻初期,水稻植物体尚未成长,很高的温度、很高的土壤有机物含量以及由于高温而很活跃的最高效率的传输途径(气泡排放)三者同时存在,使 CH_4 排在移栽后几天内就出现整个季节的最大值。而对于早稻,平均来说,相对有利的 CH_4 产生和排放条件出现在水稻生长中期(6月份),这时候,气温较高,水稻植物体内部空腔系统通畅,成为最主要的 CH_4 排放途径,而且此时水稻根系发达,以根流出物质、根腐败的方式向土壤提供的 CH_4 前体也较多。这种情况在杭州地区也存在,特别是1989年与上述现象较符合。

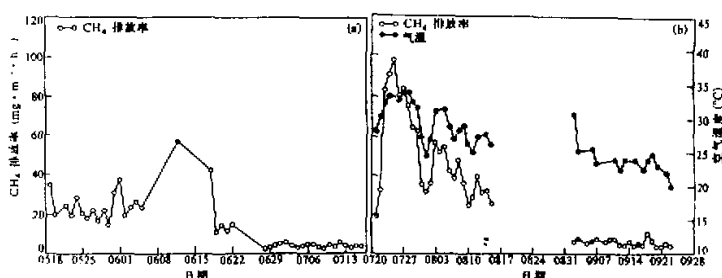


图5 稻田 CH_4 排放率的季节变化

(a) 早稻, (b) 晚稻

水稻植物体对稻田 CH_4 排放的相对重要性在水稻的两个生长季节是不同的,早稻最高的 CH_4 排放出现在水稻生长中期,水稻植物体无论对土壤 CH_4 的产生还是传输都相当重要;晚稻在移栽后几天内就出现最高的 CH_4 排放,水稻对当时 CH_4 的产生和排放都没有很大影响,因此水稻植物体对 CH_4 排放的影响在早稻要更重要些。

早稻6月22日以后、晚稻8月15日以后,稻田因未灌水而干涸甚至干裂, CH_4 排放率降到很低甚至到零,并且在重新向稻田灌水后 CH_4 排放率始终很小并没有明显回升(图5a, b),早稻7月、晚稻9月的 CH_4 排放都只占其整个生长季节排放总量的不到8%,这可能是由于稻田土壤干涸到一定程度以后,裸露在空气中过久,使土壤中原有的微生物结构遭到破坏,抑制了产 CH_4 菌及其它分解菌的活性,并消耗了这些细菌赖以增长的有机能量,而这些不可能在短期内恢复,因此,其后土壤中 CH_4 的产生速率很低,从而有较低的 CH_4 排放。由此我们发现这种间歇灌溉的方式(例如我国传统的晒田技术)可能是控制稻田 CH_4 排放的一个重要方案,土壤湿润度的控制是这种方法的关键,关于间歇灌溉的时间表还须进一步的实验和研究。

3. 温度效应

温度的日变化是 CH_4 排放日变化的主要原因。从水稻生长的整个季节来看,温度

对 CH_4 排放的作用对于早稻相对不明显, 但对晚稻, 温度与 CH_4 排放率呈十分明显的指数关系, 例如自 7 月 20 日到 8 月 15 日 CH_4 排放率不受灌溉水状态的影响, 我们发现瞬时 CH_4 排放率与土壤表层 (2 cm) 的瞬时温度的指数关系极好 ($R=0.85$, $N=269$):

$$F = 0.722 \times e^{0.137t}$$

这种情况已在同一地点被多年发现^[6]。

4. 施肥效应

施肥对稻田 CH_4 排放的影响实验在杭州及乐山地区都进行过, 但都没有重要的发现。杭州的那块实验田以前种植茭白, 土壤肥力相对高, 比本地区的典型水稻土肥沃, 1987 和 1988 年均没发现明显的施肥效应; 而在 1989 年发现掺入 K_2SO_4 的施肥使 CH_4 排放降低了将近一半。相比起来, 湖南桃源县这块实验田则代表了当地典型的水稻田。

不同施肥首先对稻田 CH_4 排放值有非常明显的影响。图 6 给出了早、晚稻各月份不同施肥田中 CH_4 的排放通量, 如果以植物生长所需的一定 N、P、K 含量为标准, 多施有机肥使 CH_4 的排放增大, 而多施化肥则降低 CH_4 排放。

沼渣肥田中较低的 CH_4 排放是由于沼气池中沼渣已较彻底地发酵, 加上取出后在空气中堆放较久, 其有机营养物质已相对贫乏。紫云英及稻草则给稻田土壤中的微生物活动提供了足够的能量, 常规施肥及有机肥的稻田

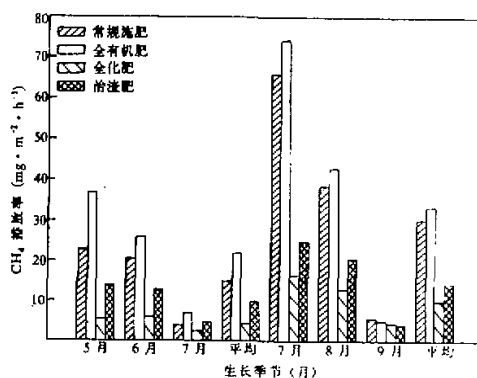


图6 施肥对稻田 CH_4 排放的影响

田与施化肥及沼渣肥的稻田中的土壤有机物质含量差别悬殊, 因此 CH_4 产生率的差别也很悬殊, 在水稻生长初期, 前者的 CH_4 排放率远远大于后者, 但是到水稻生长的后期, 前者这种人为施加的有机肥料逐渐分解殆尽, 刺激土壤中 CH_4 产生的外来能量还来自水稻根流出物质及腐败的根, 因此不同施肥田中 CH_4 排放率的差别在水稻生长后期逐渐变小。晚稻 9 月份, 由于 8 月中下旬缺水, 上述施肥效应已不复存在了。

施肥作用还表现在对稻田 CH_4 排放温度效应的影响上。虽然 CH_4 排放的日变化趋势在不同施肥田上是一致的, 但它们的日变化幅度却有很大的差别, 例如晚稻 7 月 26 日, 以 $F = a + b \times T$ 对 CH_4 排放率与气温的关系曲线进行拟合, 发现影响参数 b 在施常规肥田、有机肥田、化肥田及沼渣肥田中分别为 10.7、7.7、3.4 及 3.6, 即在常规施肥田和施有机肥田中较高, 而在施化肥田和沼渣肥田中较低, 相类似的情况当然也表现在 CH_4 排放的季节变化上, 因此我们认为温度对稻田 CH_4 排放的影响作用因不同的施肥措施甚至不同的土壤类型而变化, 在以后的数值模拟中应该考虑到这一点。

由图 6, 我们可以看到施肥措施是一个控制 CH_4 排放的可行方案, 这种方法主要是通过控制土壤中 CH_4 的产生来实现的。以施有机肥为标准, 把有机肥和含复合肥、尿素及氯化钾的化肥以 1:1 的比例混合后 (常规施肥), CH_4 排放率明显降低, 在意大利也观测到尿素的施用使 CH_4 排放降低的现象^[6], 这种抑制作用在完全施化肥的稻田中表现得更为明显, 这是因为“新鲜”有机肥数量减少, 其 N、P、K 营养由化肥补充, 有机物质的减少会导致产生 CH_4 能量的降低, 从而减少 CH_4 产生率。我们在测量土壤 CH_4 产生率时就发现施化肥的田中 CH_4 产生率要远远低于其它三块田, 然而, 我们不能将完全施化肥认为是可用来控制 CH_4 排放的手段, 因为我们还必须考虑所施肥对土壤营养平衡、水稻产量的影响, 一种同时兼顾三者关系的施肥方案必须是适当类型的有机肥 (例沼渣) 与某些成分化肥 (例尿素、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等) 按适当比例的混合施用。

施沼渣肥可能是最有应用前景的措施, 因为施沼气肥不仅能降低 CH_4 排放, 还能降低作物病虫害, 还能有效利用可再生能源, 是一举三得的事, 但沼渣要充分发酵, 所产沼气要回收利用。沼渣肥, 作为一种特殊的有机肥, 如与化肥混施, 可能会更大程度地降低 CH_4 排放并维持土壤中各种成分的平衡。

5. 排放通量

根据 1991 年的观测, 我国华中水稻生态区稻田 CH_4 的季节平均排放速率: 早稻为 $0.36 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、晚稻为 $0.48 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。两季稻华中地区每平方米稻田面积的 CH_4 总排放为 67.96 g。

致 谢: 感谢肖领先同志在观测中做了许多工作, 并感谢中国科学院长沙农业现代化研究所桃源农业生态实验站站长吴博良同志及他的同事们对本观测所提供的种种便利。

参 考 文 献

- [1] Greenhouse gas emission from agriculture systems. Volume 1 - summary report. Intergovernmental panel on climate change. Response strategies work group, Subgroup on Agriculture, Forestry, and other human activities, Chapter 1, 1990.
- [2] 戴爱国, 王明星、沈千兴等, 1991, 我国杭州秋季稻田的甲烷排放, 大气科学, 15, 102-110.
- [3] Wang Mingxing et al., 1990, CH_4 emission from a chinese rice paddy field, *Acta Meteorologica Sinica*, 4, 265-275.
- [4] 王明星、戴爱国, 黄俊等, 1993, 中国 CH_4 排放量的估算, 大气科学, 17, 52-64.
- [5] 谢小立, 1990, 不同施肥经营对双季稻生产影响初步研究, 南方红壤丘岗区农业生态系统研究论文集.
- [6] 卜官行健, 1993, 稻田 CH_4 产生和排放过程的研究, 中国科学院大气物理研究所博士论文.
- [7] 陈德章, 1992, 稻田 CH_4 排放与大气、土壤因子的关系, 中国科学院大气物理研究所硕士论文.
- [8] Schuetz, H. et al., 1989, A 3-year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy, *J. Geophys. Res.*, 94, 16405-16416.

The Feature of Methane Emission from a Paddy Field in the Central China Region

Shangguan Xingjian, Wang Mingxing, Shen Renxing, Wang Yuesi

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

Wassmann Reiner, Rennenberg Heinz, Seiler Wolfgang

(Fraunhofer Institute for Atmospheric Environmental Research, Germany)

Xie Xiaoli, Wang Weidong and Xie Kehe

(Institute for Agriculture Modernization, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125)

Abstract

The feature of CH_4 emission from a red-soil paddy field in Hunan Province, located in the Central China Region, is discussed in this paper. The diurnal variation of CH_4 emission rate from the rice field appears very regular with highest emission at 16:00 in the afternoon. The range of diurnal methane emission variation is found to be related to weather conditions and the status of rice growing. The diurnal variation of CH_4 emission rate correlates very well with the temperature ($R > 0.90$). Very obvious difference of seasonal variation of CH_4 emission is found for the early and late rice, which may be mainly caused by the difference of the weather conditions. The CH_4 emission is relatively high in June, in the middle period of the early rice. But for the late rice, it reaches the maximum a few days after rice is transplanted, and then decreases with the rice growing. The field drought resulted from water shortage lowers down methane emission rate significantly, and CH_4 emission rate does not go up even after the field is reflooded. Different CH_4 emission rates are obviously observed in the plots treated with various fertilizers, the highest appears in the plot treated with fully organic fertilizer, followed by those in the normally fertilized, fermented and mineral fertilized fields. The more use of urea, KCl and composite fertilizer can reduce CH_4 emission. The temperature effect on CH_4 emission rate does not appear the same in the different fertilized plots. Suitable fertilization is a means to reduce methane emission. During the double-cropping rice growing season in Hunan in 1991, the total CH_4 emission from this rice field is 67.96 g m^{-2} . The seasonal averages of CH_4 emission rate for early and late rice growing periods are $0.36 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and $0.48 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectively.

Key words: methane emission; diurnal variation; seasonal variation; temperature; fertilization.