

太湖流域单季稻的甲烷排放研究

熊效振 沈壬兴 王明星 郑循华 王跃思 李 晶

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

Martin Kogge

(夫琅和费大气环境研究所, 德国)

摘 要 根据 1994~1996 年太湖流域单季稻的 CH_4 排放的观测资料, 分析了该地区稻田 CH_4 排放的日变化的一些统计特征、对排放的季节变化和年际变化及相关因子对排放的影响进行了分析和研究。结果表明: 太湖地区单季稻的 CH_4 排放的特征值为 $0.07 \sim 0.11 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 而且存在巨大的年际变化, 其中 1995 年的排放是 1994 年和 1996 年的 5~7 倍。与 NH_4HCO_3 相比, 施用尿素使甲烷的排放增加 10%~70%, 晒田使 CH_4 的排放减少, 土壤的扰动则使 CH_4 的排放增加, 文中对 CH_4 的排放与水稻的生长的关系及温度的变化对排放的影响也进行了讨论。

关键词 稻田 甲烷 排放率 日变化 季节变化 年际变化

1 引言

由于人类活动, 使得大气中甲烷的浓度在近几十年来一直保持增长, 然而, 近年来大气中甲烷的增长速率却出现“异常”, 80 年代以来全球平均的增长率为 $(11.1 \pm 0.2) \times 10^{-9}/\text{a}$, 其中 1983 年甲烷的增长率为 $13.5 \times 10^{-9}/\text{a}$, 而 1991 年增长率为 $9.3 \times 10^{-9}/\text{a}$, 1992 年增长几乎下降到零^[1], 最近两年增长率又开始增加。目前的研究还不能很好地解释这种增长率的变化, 原因之一在于对甲烷的源、汇的大小的认识还不够, 尤其是对于许多排放源, 如堆肥、热带湿地、稻田、生物体的燃烧、白蚁等的排放大小缺乏足够的测量资料^[2]。由于排放的时空差异, 根据目前已开展的有限的一些测量来编制推算全球的排放时无疑存在很大的误差。

中国的水稻面积约占世界水稻面积的 22%, 水稻产量约占全球的 37%, 无疑中国稻田的甲烷排放在全球的稻田甲烷排放中占有十分重要的地位。尽管目前已经在中国的五大类典型水稻区进行了不少观测^[3]和相应的一些研究^[4], 然而, 由于不同地区土壤物理、化学特性的不同, 耕作方式的差异, 水稻品种的不同, 以及气候的差异和气候的变化, 不同地区甲烷的排放量和排放的日变化、季节变化规律均存在极大的差异^[3,6], 特别值得注意的是同一地区的年际变化的差异。这种差异将严重影响如何利用一定时间和有限空间范围的观测资料来可靠地估算该地区的特征排放量。对中国不同地区的水稻 CH_4 排放进行更广泛的测量, 将有助于我们更精确地估算中国地区稻田 CH_4 排放总量和编制中国稻田 CH_4 排放清单。考虑到近年来由于经济的飞速发展, 华东地区的水稻

种植制度发生了一些变化。部分地区由种双季稻改种单季稻, CH_4 排放量和排放规律必然出现相应的变化, 所以本文的观测结果对于重新更好地估算华东地区稻田甲烷的排放总量无疑具有重要意义。另外一个值得深入研究的问题是减排措施的研究, 作为一个稻田甲烷排放的大国, 如何在既不影响水稻产量, 又不影响土地的永久利用和农业可持续发展的同时, 设法减少稻田甲烷的排放, 减缓其温室效应, 无疑是十分必要的。

本文根据 1994~1996 年利用静态箱法对太湖流域单季稻整个生长季节的甲烷排放的连续观测资料, 研究了该地区稻田甲烷排放的一些规律, 着重研究了当地两种常规施肥措施和传统的耕作措施(晒田)对排放的影响, 以及有关的各种因子对排放的影响。

2 实验地点和方法

实验地点选在江苏省吴县市农业科学研究所实验场内 ($31^{\circ}15'N$, $120^{\circ}34'E$), 由于实验田地处苏州市近郊, 所以文中为叙述准确起见, 有时称该地区为苏州地区。实验田的土壤为潴育型黄泥土, 是太湖流域典型的水稻土类型, 耕层土壤为粘壤质, 其有机质含量为 $34.93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量为 $1.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷含量 (P_2O_5) 为 $1.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾含量 (K_2O) 为 $13.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值为 6.5。稻田冬季种植小麦, 时间为当年 11 月至第二年的 5 月底。水稻于 5 月中下旬播种, 6 月 20 日左右移栽, 11 月上旬收割, 移栽后的生长期为 135 天左右, 我们的观测正在这个时段进行。

按照当地常规水肥管理方式, 实验田分为两个区, 分别采用当地典型的两种施肥方式, 即堆肥加尿素(本文以下简称为尿素)和堆肥加 NH_4HCO_3 (简称 NH_4HCO_3), 施肥总量为 $191 \text{ kg} \cdot \text{kg} / \text{ha}$ 纯氮, 堆肥和 25% 的化肥(尿素和 NH_4HCO_3) 于移栽前施作基肥, 返青、拔节和孕穗期各追施 25% 的化肥。两块田均采用当地常规灌溉方式, 即在 7 月 20 日左右第一次晒田, 8 月 20 日左右重搁田, 9 月份保持浅水、10 月份保持时干时湿。田间种植的水稻品种为太湖梗 4 号。种植密度为 $25 \sim 30 \text{ 株} / \text{m}^2$ 。

本实验采用静态箱法, 对水稻移栽后整个生长季节的甲烷排放进行全天 24 h 自动观测。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^[5,7]。在实验田的两个区中分别设有 2 对 4 个采集箱, 每 2 h 为一个周期, 完成对 4 对 8 个采集箱的通量测定。一个周期中采集箱的关闭时间为 30 min, 以等间隔时间测量箱子关闭期间 5 个甲烷浓度, 利用拟合法计算甲烷的排放通量。当拟合精度低于 90% 时, 认为此次观测资料无效, 予以剔除。计算表明, 在水稻生长初期和收割前排放通量很低时, 拟合精度相对较低。由于种种原因 1994 年所获资料不太理想, 考虑到多年来箱子的磨损和变形, 1995 年将箱盖的开闭由单臂控制改为双臂控制, 并加贴新的密封条。架设箱子之前, 对箱子的泄漏率重新进行检定, 结果证明箱子的密封得到了明显的改善。在每个测量周期之间利用标气对系统进行标定。另外, 对箱内外的空气温度和水温, 土壤表面, 土壤 2 cm、5 cm、10 cm 处的温度也进行了连续的自动测量, 1996 年还增加了对田间光合有效辐射的连续测量。

3 结果与讨论

3.1 太湖地区单季稻甲烷排放日变化

利用连续监测的每天 12 个排放通量的数据,我们能够比较好地看出甲烷排放的日变化规律。在我国五大类典型水稻地区的观测结果^[3]显示出中国稻田甲烷的排放一般存在 4 种模态,即下午单峰,夜间单峰,下午和夜间双峰,无规则变化。这 4 种模态在本实验中都观测到,而且以上午极小下午明显极大最为常见,双峰模态中次峰一般远远小于主峰。对 1995 年和 1996 年 8 个箱子在整个季节排放的日变化进行统计,平均每日 24 h 甲烷排放的最大值和最小值出现的频率分别如图 1、图 2 所示。可以看出,正午前后至傍晚最大值出现的频率最高,约占 60%、午夜出现最大值的频率仅为 10%。清晨 6:00~10:00 出现排放最小值的频率最高,占 50%。进一步分析还可以看出在水稻生长的不同阶段,极大值和极小值出现的频率存在一些差异。

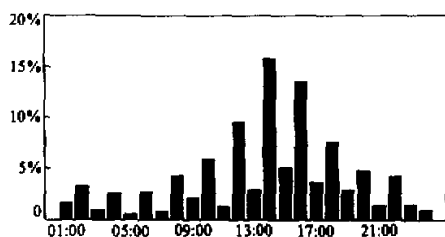


图 1 苏州稻田甲烷排放的日最大值出现的频率的时间分布

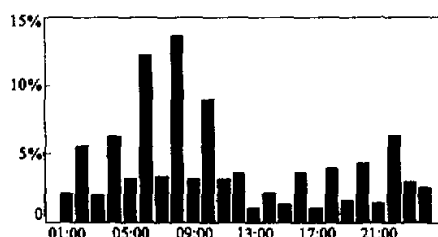


图 2 苏州稻田甲烷排放的日最小值出现的频率的时间分布

由观测结果可以看出,在同一块田中不同箱子测得的甲烷的排放存在一定的差异,就是说在一块田这样有限的空间内甲烷的排放仍然存在较大的离散性。这正是在许多的实验中在一块田内设置多个箱子来进行测量的原因。由于这种离散性,对大量的观测资料进行统计处理与分析,给出统计意义上的具有一定的空间和时间代表性的参数无疑能给我们的研究提供有益的启迪。表 1 给出水稻生长的不同阶段,一天中不同时段排放甲烷占日总排放的百分比。由表 1 可以看出,1995 年 9 月 20 日以前 12:00~18:00 (下午)的排放明显高于 6:00~12:00 (上午)的排放,约 10% 左右,9 月 20 日以后,两者的差别不明显。相比之下,1996 年下午略高于上午,但两者的差别不如 1995 年明显。白天 (6:00~18:00) 甲烷的排放占日总排放的 55% 左右。考虑到 12:00~18:00 (下午)的平均气温或土壤温度高于 6:00~12:00 (上午),白天的平均气温或土壤温度高于夜间,上述的比较结果也说明了气温或土壤温度是影响甲烷排放日变化的一个主要因子^[5~7]。无疑,土壤温度直接影响稻田 CH_4 的产生和氧化,土壤的温度对 CH_4 的排放的影响似乎更密切^[7]。在土壤表面,通过白天热通量的向下输送和晚上的向上输送,气温与土壤温度紧密相关。水稻植株是稻田土壤中产生 CH_4 的主要输送路径^[1],气温通过影响水稻植株的某些生长代谢过程,间接影响水稻植株对 CH_4 的输送和排放。王明

星等认为杭州晚稻 CH_4 排放的午夜峰值与白天的异常高温和气孔的开闭有关^[8]。太阳辐射主要通过影响空气温度和土壤的温度来影响甲烷的产生和排放,还可能通过植物的光合作用来间接影响甲烷的排放。菲律宾稻田观测发现高的 CH_4 的产生和排放与水稻生长较好和辐射较强相关联^[9], Sass 也观测到类似的结果^[10]。1995 年 8 月 16 日观测到高达 $148.5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的通量, 1995 年 9 月 1 日观测到高达 $241.1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的巨大通量, 这与当日的高温有关, 很可能是温度的急剧升高激活土壤中的产甲烷菌, 使之异常活跃, 充分利用土壤中的有机质产生 CH_4 , 造成短期内 CH_4 排放的异常高值。而随后由于可用土壤有机质的减少, 虽然温度依然很高, 但排放却减少。

表 1 水稻生长不同阶段及每日中不同时段的甲烷排放占日总量的百分比

时间	插秧~7月20日	7月21日~ 8月20日	8月21日~ 9月20日	9月20日~收割	%
1995 年 6:00~12:00	23	22	23	27	24
1995 年 12:00~18:00	34	35	31	25	30
1995 年 6:00~18:00	57	57	54	52	54
1996 年 6:00~12:00	25	26	26	27	26
1996 年 12:00~18:00	27	29	29	28	28
1996 年 6:00~18:00	52	55	55	55	54

3.2 太湖流域单季稻甲烷排放的季节变化

将每块田中 2 对 4 个采集箱的每日连续测得的排放通量进行平均, 得到水稻整个生长季节的两种不同施肥处理时的平均的甲烷排放的逐日变化。图 3 和图 5 分别给出了 1995 年和 1996 年实测的苏州地区单季稻甲烷排放的逐日变化, 图中的 3 条曲线分别是田间上空的空气的每日最高温度和两块田中日平均的甲烷排放通量。图 4 和图 6 分别给出了相应的田间水位和降雨量的变化资料。

从图 3 和图 5 可以看出, 在水稻的整个生长季节, 甲烷的排放存在至少两个显剧的极大值, 第一极大值出现在水稻移栽后的一个月左右, 第二个极大值和第三个极大值出现的时间 1995 年和 1996 年有些不同。1995 年第二个极大值出现在移栽后的 55 天左

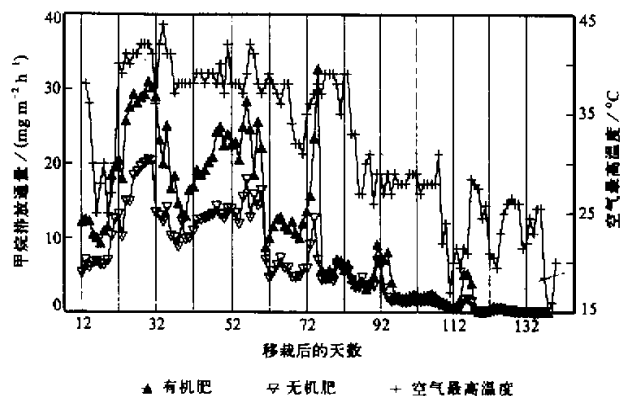


图 3 1995 年苏州稻田甲烷排放的逐日变化

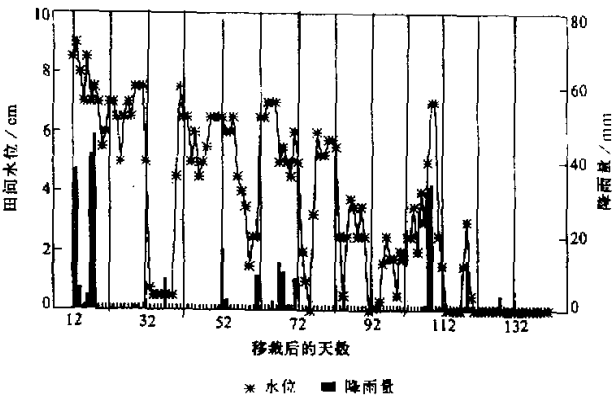


图4 1995年水稻生长期田间水位和降雨的变化

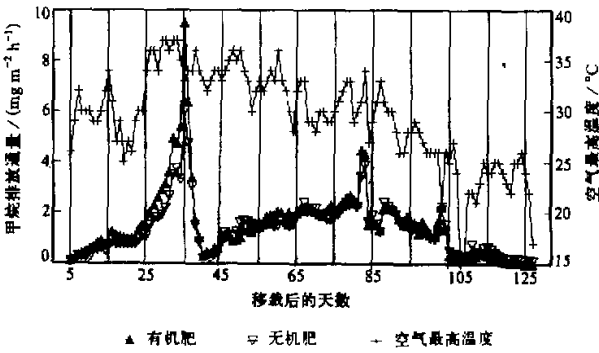


图5 1996年苏州稻田甲烷排放逐日变化

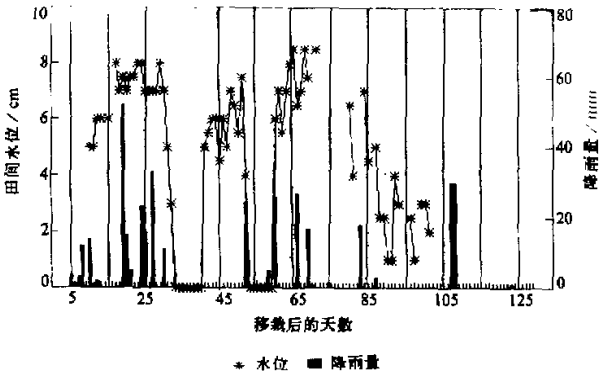


图6 1996年水稻生长期田间水位和降雨的变化

右, 第三个极大值出现在移栽后 70 天左右, 即在第二次晒田复水后。1996 年在移栽后的 55 天左右并没有出现显著极大值, 而差不多在 1995 年的第三个极大值时出现了第二个不太明显极大值。随后的排放也存在几个小小的波动, 这主要是由于天气过程导致温度的变化以及施肥和喷洒农药导致土壤的扰动所引起的排放增加。在水稻收割前一周甲烷的排放基本上已经为零排放, 偶尔出现负通量。1995 年在水稻移栽后的前两个月甲烷的排放占整个季节排放的 71% (尿素) 和 74% (NH_4HCO_3), 1996 年前两个月的排放占整个季节排放的 48% (尿素) 和 45% (NH_4HCO_3)。10 月以后的排放相当小, 1995 年 10 月 1 日以后的排放占整个季节排放的 3% (尿素) 和 2% (NH_4HCO_3), 而 1996 年 10 月 1 日以后的排放占整个季节排放的 3% (尿素) 和 6% (NH_4HCO_3)。

稻田甲烷排放的季节变化是气候、水管理、施肥、土壤和水稻的生长等因子共同作用的结果。水稻移栽后不久, 前茬作物 (即小麦) 遗留在土壤中的有机质和新加入的有机质 (第一次施肥) 确保了土壤中的有机质的充分供应, 灌水后的土壤中形成良好的厌氧环境为甲烷的产生提供了条件, 从而土壤中 CH_4 的产生率较高。从图 3 和图 5 中空气的最高温度变化可以看出太湖流域梅雨季节之后空气温度迅速增加, 也激发了稻田中甲烷的产生和排放的增加, 由图 3、图 5 明显可以看出甲烷排放的第一峰值的上升时间与温度的攀升完全同步。

根据当地的传统耕作措施, 7 月下旬和 8 月初进行两次持续约一周的晒田, 目的是增加土壤中的根系的氧气含量, 使根系更加发达^[4]。晒田期间, 田间进行追肥。第一峰值的下降时间与晒田的时间基本上是同步的。复水后, 土壤中再次形成厌氧环境, 追肥又加入新的有机质, 从而使甲烷的产生和排放增加。1995 年再次晒田时甲烷的排放又开始下降, 如图 4 所示, 在这次晒田期间, 即 1995 年 8 月 18 日出现一次大的降水过程, 晒田不彻底, 所以形成的第二个峰下降时间极为短暂。由于 1996 年甲烷的排放相对于 1995 年而言较低, 第二个峰不太明显, 而是维持比较缓慢的增长, 到水稻抽穗后排放开始缓慢降低。王明星等指出第二个峰和第三个峰的出现与水稻分蘖期和成熟期根系的腐败物质和根的流出物使土壤中 CH_4 的产生率较高有关^[3,6]。10 月份以后, 气温和土壤温度逐渐降低, 而田间保持时干时湿, 由于晒田的结果田间甚至出现裂纹, 使得土壤中 CH_4 的氧化率大大增加, 土壤中产生的 CH_4 几乎都被氧化, 使得排放很低, 甚至偶尔出现负通量。

从上面的分析不难看出晒田明显影响了甲烷的排放。在南京地区的观测实验观测到晒田使甲烷的排放减少了 50%^[8]。Yagi^[11]则指出间歇灌溉的稻田中当水刚排干时发现 CH_4 排放的急剧增加, 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大气中, 尔后由于氧化的增加, CH_4 的排放开始下降。间歇灌溉使整个季节总的排放减小了 42%~45%。在苏州的观测实验中, 晒田开始时采取停止灌溉, 让田间水自然渗漏干涸的办法, 所以没有观测到田间水刚排干时 CH_4 的显著的排放。然而, 持续约一周的晒田使甲烷氧化大大增加, 有时田间甚至出现裂缝, 破坏了土壤中的有机质含量和利于 CH_4 产生厌氧环境, 以致于复水后 CH_4 的产生和排放长时间内得不到恢复^[6]。可见和间歇灌溉类似, 晒田作为我国南方一种传统的耕作措施, 对减少稻田 CH_4 排放具有很大的价值。然而实验表明^[12], 甲烷在土壤中的氧化存在一个利于氧化的最佳湿度范围, 土壤湿度在此范围内 CH_4 的氧化最大。对 N_2O 的排放观测研

究^[13]也发现, N_2O 的排放也存在一个最佳湿度范围, 在此范围内 N_2O 的排放最大。因此, 间歇晒田时须小心防止由于土壤湿度的变化, 将可能通过硝化和反硝化过程的增加而导致氮的气相损失和 N_2O 的排放^[13,14]增加。间歇灌溉作为稻田 CH_4 的一种减排措施, 其可能引起 N_2O 排放的增加是关注的焦点, 但有些实验中, 并没有发现 N_2O 排放的增加^[11]。可见, 晒田作为一种潜在的减排措施值得进一步研究。

3.3 施肥效应

大量的观测研究^[3~7]基本上都认为植物体的腐烂、动物的粪肥等有机肥能增加稻田甲烷的排放, 但化肥对排放的影响机理却不十分清楚, 不同的实验结果差异很大, 有的甚至相反。北京的测量结果^[15]认为 NH_4HCO_3 基本上不能减少稻田甲烷的排放, 而尿素比 NH_4HCO_3 能更有效地减少甲烷的排放。意大利稻田的观测结果显示尿素的施用使稻田 CH_4 排放减少, 而美国加利福尼亚的实验^[16]、美国路易斯安那的实验^[17]和中国杭州的实验^[18]观测到尿素使 CH_4 排放增加。在苏州的实验表明两种施肥处理的田间水稻产量几乎没有差别, 但是与 NH_4HCO_3 相比, 尿素的使用将使稻田 CH_4 的排放增加, 其中 1995 年尿素加堆肥处理的田中 CH_4 的排放是 NH_4HCO_3 加堆肥处理的田中 CH_4 的排放的 1.7 倍, 而 1994 年和 1996 年两者的差别较小, 整个季节平均时前者比后者多 10%~20%。其中 1996 年在收割前的一个月左右, NH_4HCO_3 加堆肥处理的 CH_4 的排放常常多于尿素加堆肥处理的 CH_4 的排放, 如图 3 和图 5 所示。在苏州实验中, 最后一次追肥是 8 月中旬, 即移栽后的 55 天左右, 考虑到化肥的主要作用时间约为 1~2 周, 这样理论上从 9 月份开始两种不同施肥处理的田间甲烷的排放量应该相差不会太大。从图中明显看出, 实际上在 9 月中旬以后两者基本上没有什么差别, 从侧面证明了两种施肥对稻田 CH_4 的排放的作用和影响。

3.4 土壤扰动及水稻的生长状况等因子对甲烷排放的影响

在苏州的观测实验中, 经常发现土壤的扰动在短时内明显导致甲烷排放的增加。如 1996 年 7 月 26 日 (即水稻移栽后的第 36 天) 的施用尿素和 NH_4HCO_3 的田间日平均排放分别高达 $9.5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $6.0 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 是整个生长季节的最高峰值 (如图 5 所示), 这正好与当日下午的施肥对土壤的扰动密切相关。田间挪动箱子时, 经常可见明显的气泡产生, 向大气中排出大量的 CH_4 。其原因主要是因为土壤受到扰动时, 土壤中积累的大量的 CH_4 以气泡的形式输送到水面, 而后气泡破裂 CH_4 直接释放大气中, 而 CH_4 自然排放时大部分在传输路径中被氧化掉。

比较同一块田中不同箱子的 CH_4 排放, 我们发现这种 CH_4 的排放与箱子中水稻的生长状况有关, 生长茂盛的箱子中甲烷的排放相对较高。仅以 1995 年 9 月份以后的排放为例, 由于此时施肥本身的作用已经很小, 可以不考虑由于施肥的不均匀导致不同箱子中产生的甲烷的不同。表 2 给出了 1995 年 9 月和 10 月不同箱子中的平均的 CH_4 排放率, B_3 和 D_2 箱子中甲烷的排放明显高于其他箱子中的排放, 其原因与这两个箱子中水稻生长较好, 黄熟稍晚密切相关。这同在美国得克萨斯的研究结果^[10]相吻合。

3.5 年际变化

1995 年整个水稻生长季节的施尿素的排放特征值为 $0.260 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 施 NH_4HCO_3 的排放特征值为 $0.158 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 与杭州地区早稻的观测结果^[6]及南京地区的观测结果^[15]比较接近, 但明显低于杭州晚稻的排放。1994 年和 1996 年的排放则明

表 2 1995 年苏州稻田 9 月与 10 月份不同箱子中 CH_4 排放的差异 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})$

月份	箱 A1	箱 A2	箱 C1	箱 C2	箱 B1	箱 B2	箱 D1	箱 D2
9 月	2.1	2.0	1.7	1.9	4.3	9.2	3.8	4.8
10 月	0.5	0.7	0.4	0.6	0.9	3.2	0.4	1.3

显偏低, 1996 年两种施肥处理的 CH_4 季节排放的特征值分别为 $0.036 \text{ g} / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $0.031 \text{ g} / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。比较而言, 1995 年施尿素所排放的 CH_4 是 1996 年相应的施尿素所排放的 7.3 倍, 1995 年施 NH_4HCO_3 所排放的 CH_4 是 1996 年相应的施 NH_4HCO_3 所排放的 5.1 倍。1994 年的排放和 1996 年比较接近, 在 1994 年资料不太完整的条件下, 平均得到 1994 年施尿素的季节排放特征值约为 $0.034 \text{ g} / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 施 NH_4HCO_3 的季节排放特征值约为 $0.031 \text{ g} / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。综合这 3 年的资料苏州地区稻田甲烷排放总量有明显的年变化。为更直观地比较这 3 年甲烷排放的差异, 图 7 同时画出 1994 年、1995 年和 1996 年两种施肥处理的甲烷的季节变化, 横轴为水稻移栽后的天数。从整个水稻生长季节来看, 从 9 月底即移栽后 85 天左右开始, 两年的排放差异不太明显, 尽管 1995 年仍有几天的排放出现小峰, 并高于 1996 年

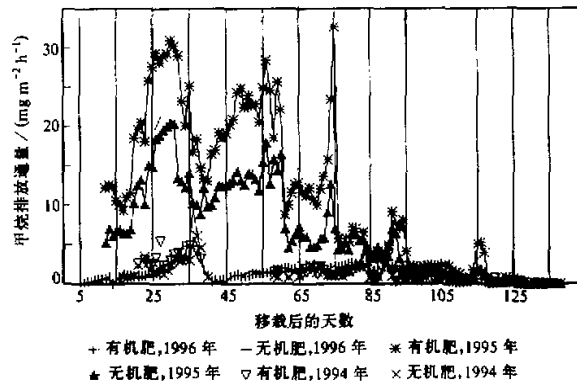


图 7 1994~1996 年苏州稻田甲烷排放的季节变化的比较

由于同一地区的连续 3 年的实验条件基本相同, 仅仅是气候条件不能由我们来控制。尽管在意大利稻田的观测发现^[19]土壤 5 cm 深处的温度从 20°C 上升到 25°C 时排放加倍, 中国四川观测到当 5 cm 深处的土壤温度从 18°C 上升到 31°C 时排放迅速增加^[20], 然而到底是什么原因导致这种同一地区年际间排放的巨大差异, 目前还不能清楚地作出解释^[3]。实际上, 在中国其他地区也曾观测到这种年际差异, 南京稻麦轮作的稻田 1990 年的排放量为 $10.8 \text{ mg} / \text{m}^2$, 而 1991 年的排放量为 $25.2 \text{ mg} / \text{m}^2$, 是 1990 年的 2.3 倍^[15]。杭州 1989 年的早稻的排放是 1988 年的 4 倍, 而 1988 年晚稻的排放差不多是 1987 年和 1989 年的 $1/3$ ^[16], 从气候和水稻品种方面不足以解释这种年际差异^[3,5]。根据 1995 年和 1996 年田间的观测记录的空气的最高温度和最低温度, 在整个生长季节 1995 年平均的最高温度为 31.6°C , 1996 年为 29.0°C , 而 1995 年平均的最低温度为 21.0°C , 1996 年为 21.7°C 。从水稻移栽后的前 3 个月的平均来看, 1995 年平均

的最高温度为 36.1°C , 1996 年为 31.1°C , 而 1995 年平均的最低温度为 25.1°C , 1996 年为 24.1°C 。然而, 从 1995 年 CH_4 排放的季节变化图 (图 3) 上任意截取一段水位、施肥和水稻生长状态基本不变的邻近时段, 粗略估计, 甲烷排放的变化相差不过 2~3 倍, 也就是说由于气候因子 (如温度和辐射) 的变化, 如果 1995 年和 1996 年两年的 CH_4 排放差异在 2~3 倍是可能的, 但实际上 1995 年和 1996 年年际间的差异高达 5~7 倍, 大大地出乎意料。从目前的资料还难以解释 1994 年至 1996 年该地区排放的年际差异, 这说明了稻田 CH_4 的产生、氧化、输送和排放机理仍有很多工作要做。要想揭示苏州地区这种排放的巨大年际差异, 有待更长时间的系统观测和实验。

4 结论

(1) 统计表明, 苏州地区稻田 CH_4 排放的日变化以上午出现极小值, 午后出现极大值的单峰模态为主, 午后至傍晚出现峰值的频率为 60%, 6:00~10:00 出现极小值的频率约 50%, 午夜出现峰值的频率约 10%。季节变化中存在 2~3 个峰。

(2) 根据 1994 年~1996 年苏州地区的实测资料的平均, 苏州地区单季稻施尿素加堆肥的稻田 CH_4 排放特征值为 $0.11 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 而施 NH_4HCO_3 加堆肥的稻田 CH_4 排放略低, 其特征值为 $0.07 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

(3) 与 NH_4HCO_3 相比, 尿素使 CH_4 的排放增加。1995 年施尿素加堆肥的稻田 CH_4 排放比施 NH_4HCO_3 加堆肥的稻田 CH_4 排放高 70%, 而 1996 年两者差异不大, 前者比后者高 10%~20%。

(4) 晒田作为我国一种传统的耕作措施, 有利于减少稻田 CH_4 的排放。

(5) 尽管我国先后对五大类主要的水稻种植区的水稻甲烷的排放进行了近 10 年的大量的观测, 并发现稻田甲烷排放存在较大的时空变化, 但是, 本文首次得到苏州地区甲烷排放的相差 5~7 倍的巨大的年际差异。目前对甲烷排放的年际变化的研究还很少, 利用已有的资料还无法解释这种巨大的年际变化, 但这种年际变化对于利用有限的观测资料推算我国稻田甲烷排放总量和编制排放清单无疑具有重要的价值, 有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Dlugokencky, E. J., Steele, L. P., Lang P. M. and Masarie, K. A., 1994, The growth rate and distribution of atmospheric methane, *J. Geophys. Res.*, **99**, 17021~17043.
- 2 Fung, I., John, J., Lerner, J. et al., 1991, Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle, *J. Geophys. Res.*, **96**, 13033~13065.
- 3 Wang Mingxing and Shanguan Xingjian, 1996, CH_4 emissions from various rice fields in China, *Theoretical and Applied Climatology*, Springer Verlag, 1~10.
- 4 Yao Heng and Chen Zongliang, 1994, Seasonal variation of methane flux from a Chinese rice paddy in a semi arid, temperate region, *J. Geophys. Res.*, **99**, 16471~16477.
- 5 Wassmann, R., Neue, H. U. et al., 1994, Temporal patterns of methane emissions from rice fields treated by different modes of N application, *J. Geophys. Res.*, **99**, 16457~16462.
- 6 上官行健、王明星等, 1994年, 我国华中地区稻田甲烷的排放特征, *大气科学*, **18**(3), 358~365.

- 7 Schutz, H., Holzapfel-Pschorn, A. et al., 1989, A 3-year continuous record on the influence of daytime, season and fertilizer treatment on methane emission rates from a Italian rice paddy, *J. Geophys. Res.*, **94**, 16405~16416.
- 8 Wang Mingxing, Dai Aiguo, Shen Renxing et al., 1990, CH₄ emission from a Chinese rice paddy field, *Acta Meteorologica Sinica*, **4**, 265~275.
- 9 Neue, H. U., Latin, R. S. et al., 1992, Methane emission from rice soils of the Philippines. CH₄ and N₂O Global Emission and Controls from Rice Fields and Other Agriculture and Industrial Sources, ed. by K. Minami, A. Mozier and R. Sass, NIAES Series 2, 55~64.
- 10 Sass, R. L. et al., 1990, Methane production and emission in a Texas rice field, *Global Biogeochemical Cycles*, **4**, 47~68.
- 11 Yagi, K., Tsuruta, H. and K. Minami, 1996, The effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field, automated methane monitoring, *Global Biogeochemical Cycles*, **10**, 255~267.
- 12 Czepiel, P. M., Crill, P. M and Harris R. C., 1995, Environmental factors influencing the variability of methane oxidation in temperate zone soils, *J. Geophys. Res.*, **100**, 9359~9364.
- 13 郑循华等, 1996, 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对N₂O产生与排放的影响, *应用生态学报*, **7**(3), 273~279.
- 14 Neue, H. U., 1993, Methane emission from rice fields, *Bioscience*, **43**, 466~474.
- 15 Chen Z. L., Li D. B. et al., 1993, Features of CH₄ emission from rice fields in Beijing and Nanjing, *Chemosphere*, **26**, 239~245.
- 16 Cicerone, R. J. and Shetter, J. D., 1981, Sources of atmospheric methane: measurements in rice paddies and a discussion, *J. Geophys. Res.*, **86**, 7203~7209.
- 17 Lindau, C. W. and P. K. Bollich, 1993, Methane emissions from Louisiana First and Ratoon crop rice, *Soil Sci.*, **156**, 42~48.
- 18 Wassmann, R., Schuetz, et al., 1992, Quantification of methane emissions from Chinese rice fields (Zhejiang Province) as influenced by fertilizer treatment, *Biogeochemistry*, **20**, 83~101.
- 19 Holzapfel-Pschorn, A., R. Conrad and W. Seiler, 1986, Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soils, *Plant and Soil*, **92**, 223~233.
- 20 Khalil, M. A. K. and R. A. Rasmussen, 1991, Methane emission from rice fields in China, *Envir. Sci. Tech.*, **25**, 979~981.

Methane Emission from Rice Paddy Field of Taihu Area

Xiong Xiaozhen, Shen Renxing, Wang Mingxing, Zhen Xunhua,
Wang Yuesi and Li Jing

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

Martin Kogge

(Fraunhofer Institute for Atmospheric Environmental Research, Germany)

Abstract According to the measurement of CH₄ emission from rice paddy field of Taihu area during 1994 to 1996, some statistic characteristics of the daily variation of CH₄ emission are presented; the seasonal variation and annual variation of CH₄ emission, and the effects of related factors regulating CH₄ emission are analyzed too. The results show that the representative value of CH₄ emission in Taihu area is 0.07~0.11 g/(m²·d), but the annual difference is large, and the total emission in 1995 is 5~7 times of the emission in 1994 and 1996. Compared with the treatment of NH₄HCO₃, the use of urea increased the emission by 10%~70%. Field baking lead to the decrease of CH₄ emission, however, the disturbance of the soil has increased CH₄ emission. The relation of CH₄ emission with the growth of rice plant and the variation of temperature on CH₄ emission are also discussed in this paper.

Key words rice field methane emission daily variation seasonal variation annual variation