

应用大气扩散模式进行区域稻田甲烷源强估算

刘建国¹, 张远航², 邵可声², 陆思华¹, 王振远³, Sjaak Slanina⁴, Hugo A. C. , Denier van der Gon⁵(1. 北京大学技术物理系, 北京 100871, E-mail: jgliu99@hotmail.com; 2. 北京大学环境科学中心, 北京 100871; 3. 中国农业科学院作物所, 北京 100081; 4. Netherlands Energy Research Foundation ECN, Westerduinweg 3, P. O. Box 1, 1755 ZG Petten(N. H.), The Netherlands; 5. Laboratory of Soil Science and Geology, Wageningen Agricultural University, P. O. Box 37, 6700 AA, Wageningen, The Netherlands)

摘要: 传统通量箱方法对区域稻田甲烷源强的估算具有很大不确定性. 本研究应用箱模式和 ATDL 模式估算区域稻田甲烷排放率. 箱模式和 ATDL 模式估算排放率分别为: 6 月 $13.2 \sim 30.4 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $6.1 \sim 8.5 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 9 月 $10.4 \sim 20.0 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $5.5 \sim 9.3 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 而传统通量箱方法估算排放率为: 6 月 $0.3 \sim 14.3 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 9 月 $0 \sim 0.3 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 分析表明, 北京地区水稻生长季的接地逆温等不利气象条件使箱模式应用的基本假设难以满足, 使之得出偏高的估算结果. ATDL 模式能较好地适应这种不利气象条件, 并在 6 月得出了与通量观测结果相近的估算结果, 而其 9 月高于通量观测结果的估算, 却可能证实了通量箱方法难以测得的干旱稻田土壤裂缝的甲烷排放, 有待于进一步研究证实.

关键词: 稻田; 甲烷; 区域甲烷排放率; 箱模式; ATDL 模式
中图分类号: X131.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2000)06-05-0006

Application of Atmospheric Diffusion Model on The Estimate of Methane Em ission from Rice Fields

Liu Jianguo¹, Zhang Yuanhang², Shao Kesheng², Lu Sihua¹, Wang Zhenyuan³, Sjaak Slanina⁴, Hugo A. C. Denier van der Gon⁵(1. Department of Technological Physics, Peking University, Beijing 100871, China E-mail: jgliu99@hotmail.com; 2. Center of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Crop Institute of China Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4. Netherlands Energy Research Foundation ECN, Westerduinweg 3, P. O. Box 1, 1755 ZG Petten(N. H.), The Netherlands; 5. Laboratory of Soil Science and Geology, Wageningen Agricultural University, P. O. Box 37, 6700 AA, Wageningen, The Netherlands)

Abstract: A atmospheric diffusion model to estimate the methane emission from rice fields was established. It turned out that the unfavorable meteorological conditions caused an overestimate for box model($13.2 \sim 30.4 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ in June and $10.4 \sim 20.0 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ in September), but ATDL model handled the unfavorable meteorological condition and give reasonable results($6.1 \sim 8.5 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$) closed to the closed chamber measurement($0.3 \sim 14.3 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$) in June. The overestimate of ATDL($5.5 \sim 9.3 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$) compare to the closed chamber measurement ($0 \sim 0.3 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$) in September probably proved the methane emission from ditches of dry rice fields in the autumn.

Keywords: regional methane emission; rice fields; box mode; ATDL model

稻田是最大的人为甲烷源之一, 近年 IPCC 的研究虽认为从前估算的源强过高, 但其仍然约占全球甲烷总源强的 11%. 中国是水稻种植面积最大的国家之一, 近 10 年来许多科学家对中国稻田甲烷的排放量进行了研究^[1~4]. 但过

去的研究普遍基于传统的静态通量箱方法, 因静态通量箱的放置改变了水稻生长的气体交换

基金项目: 中荷国际合作项目
作者简介: 刘建国(1972~), 男, 硕士, 讲师, 主要从事大气环境化学及相关领域研究.
收稿日期: 2000-04-02

环境,更重要的是稻田甲烷排放率却存在较大的空间差异,而一定数量的静态通量箱难以全面覆盖广大的稻田区域,这使该方法具有很大不确定性.本研究试图运用大气扩散模式对区域稻田甲烷排放率进行估算和验证,减少传统方法的不确定性.

1 方法原理

稻田可被看作源强分布均匀并在一定时间内排放率恒定的区域甲烷排放面源.在一定气象条件下,稻田排放的甲烷将在混合层下均匀混合,并通过大气扩散在稻田的上下风向形成浓度差.在时间尺度较小情况下,化学反应和沉降过程可以被忽略.因此,通过观测稻田的上下风向的浓度差,可以运用箱模式对稻田甲烷区域排放率进行估算,公式如下^[5]:

$$Q = \frac{(c_2 - c_1)uH}{L} \quad (1)$$

式中, Q 是排放率($\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$), c_1 和 c_2 分别是上下风向的浓度, u 是风速(m/s), L 是虚拟箱的下风距离, H 为混合层高度(m).

ATDL (Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory) 模式实际上是一种改进的箱模式, 其将高斯扩散的原理引入到箱模式中, 可以克服简单箱模式难以处理的污染物垂直混合不均匀的情况. 其区域甲烷排放率计算公式为:

$$Q = \frac{(c_2 - c_1)ua(1 - b)}{\pi/2 \left| \frac{2}{3}L \right|^{1-b}} \quad (2)$$

其中, Q 、 c_1 、 c_2 、 u 和 L 同公式(1), a 和 b 是高斯扩散参数 $\sigma_z = ax^b$ 中的系数.

2 实验

2.1 模拟计算

北京地区夏秋季主导风向为南北风, 白天为南风, 风速较高, 一般为 $2.0 \text{ m/s} \sim 4.5 \text{ m/s}$. 夜晚为北风, 风速较小, 一般 $1.0 \text{ m/s} \sim 2.0 \text{ m/s}$. 白天的气温较高, 夜晚天空少云. 这种气象条件下, 夜间的地面热辐射容易形成近地逆温层, 并在清晨随着地表增温, 逆温层被破坏而

逐渐形成混合层. 由于实验中甲烷浓度测量的精度是 50×10^{-9} , 小于 50×10^{-9} 的浓度差将无法应用于模式计算. 为取得理想的气象条件以测得有效的浓度差, 实验首先根据北京市气象条件特点进行了箱模式的数值模拟运算. 数值模拟结果表明, 在混合层高度较低(一般 $H < 1000 \text{ m}$), 风速较小(一般 $u \leq 2.5 \text{ m/s}$) 和排放率较高(一般 $Q > 1 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$) 条件下可得到有效的浓度差. 可见, 尽管箱模式比较简单, 其所要求的气象条件却比较严格.

2.2 实验地点和时间

实验稻田在北京市西北方向距市中心区约 50 km . 所选稻田区域面积近 50 hm^2 , 呈长方形, 南北边距约为 2.9 km . 稻田区域范围内仅有一个小村庄和一条小河, 其南向和北向基本为旱地作物农田, 稻田是该区域绝对主导的甲烷源.

根据箱模式的数值模拟情况, 为取得理想的甲烷浓度差, 实验采样时间选择在早晨 $5:00 \sim 9:00$, 并在 1997 年 6 月下旬和 9 月中旬进行了 2 次实验.

2.3 监测内容、采样点和仪器

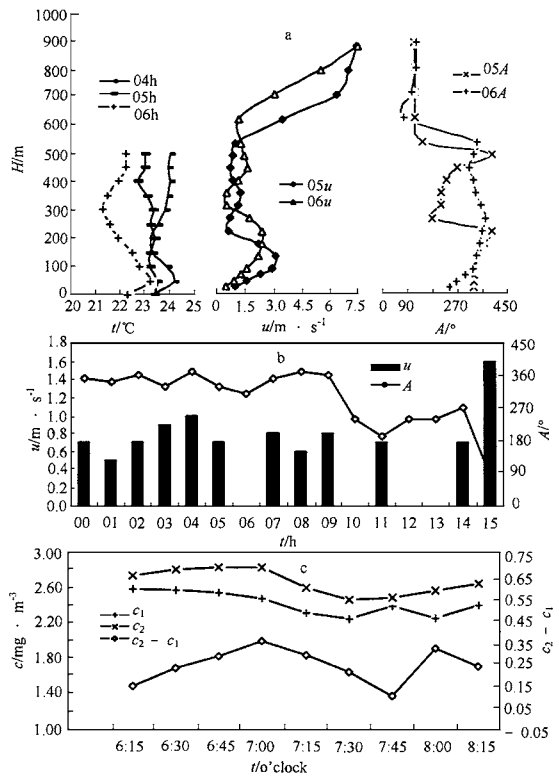
在实验稻田区域同时进行上下风向甲烷浓度测定、静态通量箱方法的甲烷通量测量和气象因子观测. 根据主导风向特点, 甲烷浓度的测定分别在实验稻田区域的南北边缘设上、下风向设置浓度采样点. 静态通量箱的通量测量采取随机布点方式进行. 甲烷浓度测定在一台精度为 50×10^{-9} 的 GC-FID 上进行. 采用声雷达、经纬仪、探空气球, 电子测风仪等观测混合层高度、地面和高空风场、大气稳定度、温度和湿度等气象参数.

3 实验结果与讨论

3.1 气象条件和浓度差

图 1 和图 2 是 6 月和 9 月实验气象条件和浓度差的典型观测结果. 实验开始时段内普遍存在接地逆温层, 大气稳定度多为中性 D 类 (见表 3). 6 月清晨的接地逆温层以及低层的不接地逆温层一般在 $6:00 \sim 7:00$ 间迅速消散并形成 700 m 以上的高空混合层, 这种温度层结

迅速变化的特点是由于 6 月份气温较高引起早晨地表增温很快造成的. 9 月气温较低, 地表升温相对缓慢, 接地逆温层直至 8: 00~ 9: 00 才缓慢消散. 6 月实验时的风速较小, 地面风速约在 0.5 m/s~ 1 m/s 之间, 并常出现静风. 在 9 月实验时风速相对变大, 地面风速约在 1 m/s~ 2 m/s 之间. 实验时段的风向基本为北风. 通常在实验开始阶段测得的浓度差较小, 然后缓慢增大. 这是因为夜间甲烷排在清晨 5: 00 较低, 随着早晨太阳升起, 地表及气温逐渐升高, 水稻植物体的活跃, 稻田甲烷的排放率会缓缓提高^[6], 所测浓度差因此提高. 随着地表温度和气温的不断升高, 接地逆温层逐渐抬升至消散, 所测浓度差因此又随之下降.



a. 实验区域风温廓线 b. 实验区域地面

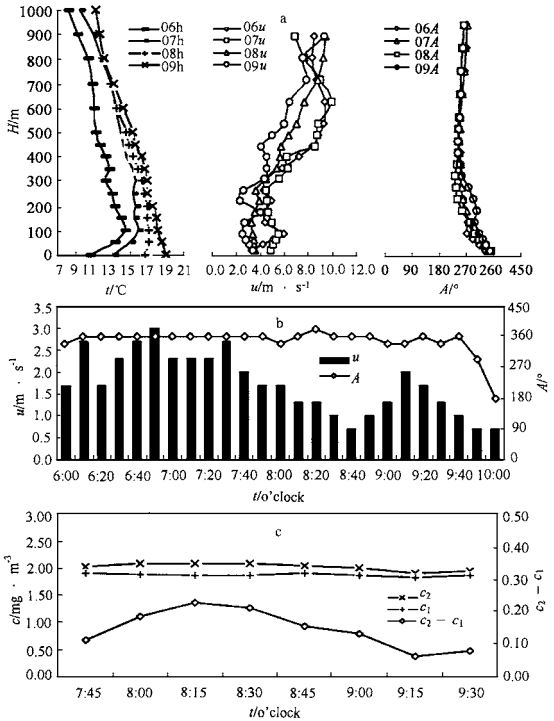
风场 c. 浓度差状况

(u: 风速, A: 风向角, t: 温度, “05”等: 测定时间)

图1 6 月份实验气象条件和浓度差变化

3.2 甲烷排放通量

稻田甲烷排放率与稻田的灌溉、施肥、品种等农田管理措施密切相关. 本实验区域稻田分



a. 实验区域风温廓线 b. 实验区域

地面风场 c. 浓度差状况

(u: 风速, A: 风向角, t: 温度, “05”等: 测定时间)

图2 9 月份实验气象条件和浓度差变化

别属于近 100 个农户, 各农户的稻田管理措施差别很大. 随机通量箱测量表明(见表 2), 6 月实验区域稻田的甲烷排放率具有很大的空间变化, 9 月的实验稻田甲烷的排放率则接近于 0. 据统计调查, 实验稻田区域的常规灌溉形式基本一致. 水稻品种间差异也可忽略, 造成稻田甲烷排放率差别的主要原因在于有机肥施加状况的区别. 就有机肥对稻田甲烷排放率的影响而言, 实验区域稻田甲烷排放率应介于无机化肥型稻田和有机稻杆型稻田甲烷排放率之间. 表 3 给出了中国农业科学院(CAAS)与本实验同期观测的无机化肥型稻田和有机稻杆型稻田的甲烷排放率. 从无机肥稻田到稻秆稻田, 在 06-26~ 06-29 的甲烷排放率为 0.3~ 14.3 mg · (m² · h)⁻¹, 09-12~ 09-18 为 0~ 0.3 mg · (m² · h)⁻¹, 与本实验随机的通量观测相符合, 基本可以代表实验区域稻田的甲烷排放率. 北京地

区稻田在水稻生长季内常存在 2 个甲烷排放高峰: 6 月~ 7 月间水稻的分蘖期和 8 月~ 9 月之间的开花期, 一般前者大于后者. 06-26~ 06-29 采样期的稻田处于第 1 个甲烷排放高峰期的末尾阶段, 因此有较高的排放率. 09-12~ 09-18 采样期的稻田处于第 2 个甲烷排放高峰期已经结束的基线排放期, 稻田已基本无水. 因此, 9 月本实验和 CAAS 实验的通量测量都得出甲烷的 0 排放.

表 1 通量箱随机测量的甲烷排放率/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$

指标	06-26~ 06-29	09-12~ 09-18
排放率	0.4~ 8.5	~ 0
平均值	4.7	~ 0

表 2 2 种施肥条件下稻田甲烷排放率
(CAAS)/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$

施肥条件	06-26~ 06-29	平均值	09-12~ 09-18	平均值
稻秆+ 无机肥	12.6~ 16.3	14.3	0~ 0.5	0.3
无机肥	0.2~ 0.6	0.3	0~ 0.1	~ 0

3.3 模式计算结果和讨论
箱模式和 ATDL 模式的计算结果分别见表 3 中 Q_{BM} 和 Q_{AM} 栏. 甲烷排放率的箱模式和 ATDL 模式计算结果分别为: 6 月, $13.2 \sim 30.4 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $6.1 \sim 8.5 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 9 月, $10.4 \sim 20.0 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $5.5 \sim 9.3 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

表 3 模式计算结果

时间	风向 ¹⁾ /度	风速 ¹⁾ /m • s ^{- 1}	混合层 高度 ¹⁾ /m	大气稳定 度 ²⁾ (A - F)	下风距离 ³⁾ /m	浓度差 ⁴⁾	甲烷排放率	
						(c ₂ - c ₁)	$\text{/m g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	
						/m g • m ^{- 3}	Q _{BM}	Q _{AM}
06-27T5: 00~ 6: 00	250	0.92	200	E-D	4101	0.19	30.4	7.9
06-28T6: 00~ 7: 00	310	1	150	D	4101	0.13	17.7	6.1
06-29T6: 00~ 7: 00	330	1	75	D	3349	0.16	13.2	7.8
06-29T7: 15~ 8: 45	350	0.8	100	C	2945	0.15	14.6	8.5
平均值							19.0	7.6
09-13T7: 00-8: 45	190	0.80	75	D	2945	0.14	10.4	5.5
09-17T7: 45~ 8: 30	360	1.40	50	D	2900	0.14	11.8	9.3
09-18T8: 30~ 9: 30	350	1.30	150	C	2945	0.08	20.0	7.7
平均值							14.1	7.5

1) 计算时段的观测平均值 2) Pasqill 稳定度分类 3) 根据风向和采样点位而定 4) 计算时段观测的有效浓度差($c_2 - c_1 \geq 50 \mu\text{l}/\text{m}^3$)的平均值.

从模式计算和通量测量结果比较看(见表 4), 箱模式 6 月和 9 月结果普遍显著高于通量测量结果的上限. ATDL 模式 6 月的结果与通量测量结果相近, 但 9 月的结果也都显著高于通量结果的上限. 箱模式的一个基本假设是, 甲烷在逆温层结下垂直混合均匀. 然而, 从实际的气象条件观测结果看, 6 月和 9 月实验过程中都存在接地逆温, 且风速较小, 这使甲烷难以有效地垂直混合, 并容易在近地面积累, 导致实验测得的浓度及浓度差大于箱模式假设条件的均匀混合浓度及浓度差, 这是箱模式得出过高甲

烷排放率计算值原因. 另一方面, ATDL 模式却可在甲烷排放率较高的 6 月得出了与通量测量相近的估算结果, 这也证实了该模式处理这种垂直混合不均情况的优越性. 说明在目前区域尺度稻田甲烷源强传统估算方法较大的不确定性情况下, 大气扩散模式可作为一种简单方法对区域尺度甲烷源强进行粗略估算并对传统方法结果进行验证. 但是, 9 月 ATDL 模式却显著高于通量箱测量结果. 稻田临近的农村旱田在秋季收割季节燃烧秸竿和堆肥等非稻田甲烷源因不规则的风向变化而引入到甲烷浓度测

量之中是一个可能的原因;然而,秋季稻田土壤裂缝中积存甲烷在一定气象条件下的释放形成了临时排放源是更为可能的原因,因为少量的通量箱难以覆盖广大的实验区域,ATDL模式在9月的结果却可能测得了这一排放,但有待进一步证实. 由于模式相对简单而适应气象条件变化的水平不高,无论对箱模式还是ATDL模式,6月和9月观测到的实际气象条件同模式模拟计算结论相比都不甚理想,6月的近地混合层的迅速抬高和9月过高的风速都使模式获取有效数据的时段变得有限. 同时,目前 50×10^{-9} 的甲烷浓度测量精度也使有效浓度差的获得受到制约,使模式只有在排放率较高时才易进行理想估算.

表 4 模式计算和通量测量甲烷排放率 结果对比/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$			
时间	通量测量	箱模式	ATDL 模式
06-26~ 06-29	0.3~ 14.3	13.2~ 30.4	6.1~ 8.5
09-12~ 09-18	0~ 0.3	10.4~ 20.0	5.5~ 9.3

4 结论

由于1997年北京地区水稻生长季期间存在接地逆温等不利的气象条件,箱模式的基本假设难以满足,使之对实验区域稻田甲烷排放率的计算结果偏高. ATDL模式却可有效地处理这种气象条件,取得较好的应用效果,解决了传统通量箱法无法规避的稻田甲烷排放率较大空间差异的问题,并可能推算出通量箱难以测量的秋季稻田甲烷排放. 在目前区域稻田甲烷源强传统估算方法存在较大不确定性的情况

下,大气扩散模式可作为一种简单估算方法对大面积区域甲烷源强进行估算,验证传统方法结果,尤其在甲烷排放率较高的情况下,大气扩散模式更有其应用价值. 然而,由于大气扩散模式相对简单,对实际的气象条件的较严格依赖,同时受到甲烷浓度检测精度的限制,有效的模式估算较大程度上受到观测的实际气象条件的影响. 此外,水稻具有特定的生长时期和甲烷排放的季变化形势,大气扩散模式的理想应用时段只能限于水稻生长季中的甲烷排放高峰期和每天的特定时间内,难以反映出稻田甲烷排放的季变化和日变化,这也是大气扩散模式应用于此的局限. 如进一步提高甲烷的测量精度,更加合理有效的甲烷浓度和局地气象条件的监测布点,大气扩散模式有望取得更为理想的应用结果,同时也有望应用在不同区域甲烷源的排放率估算.

参考文献:

- 1 邵可声. 北京地区稻田农业管理措施与甲烷排放关系的初步研究. 农村生态环境,1993,9(增): 43~ 37.
- 2 王明星,戴爱国,黄俊等. 中国 CH_4 排放量估算. 大气科学,1993,17(1): 52~ 64.
- 3 Khilil M A K, Resmussen R A. The methane sources in China, historical and current emissions. Chemosphere, 1993, 26: 127~ 142.
- 4 宋文质等. 我国农田土壤的主要温室气体 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放研究. 环境科学,1996,17(1): 85~ 88.
- 5 Hanna S R, Steven R. Handbook on Atmospheric Diffusion. Technical Information Center, U. S. Dept. of Energy, 1982.
- 6 Denier VanderGon H A C, Neue H U. Influence of organic matter incorporation on the methane emission from a wetland rice field. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9: 11~ 12.