

华东稻田 CH_4 和 N_2O 排放*

郑循华 王明星 王跃思 沈壬兴 上官行健

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

M. Kogge J. Heyer H. Papen

(夫琅和费大气环境研究所, 德国)

金继生 李老土

(江苏吴县市农科所, 苏州 215128)

摘 要 稻田 CH_4 和 N_2O 排放的季节变化规律完全不同, 两者的排放通量随土壤水分条件变化而互为消长, 但它们的日变化形式则比较一致。晴天时的 CH_4 和 N_2O 排放日变化规律明显, 主要表现为下午单峰模态, 有时 CH_4 排放夜间出现一个次峰。 CH_4 和 N_2O 排放总量因肥料类型而不同, 堆肥加尿素处理比 NH_4HCO_3 处理少排放 N_2O 30%, 多排放 CH_4 12%。

关键词 CH_4 排放 N_2O 排放 稻田

1 引言

大气中增加的 N_2O 和 CH_4 , 约 70%~90% 来自于生物源, 其中相当大一部分来自于农田生态系统。全球由于施用化学氮肥而从农田排放的 N_2O ~N 达 $2\sim3\text{ Tg a}^{-1}$ ^[1], 占全球生物源排放 N_2O ~N 总量的 21%~46%。全球水稻田排放 CH_4 为 $35\sim60\text{ Tg a}^{-1}$, 占全球生物源排放 CH_4 总量的 10%~15%^[2]。目前, 人们已认清了许多稻田 CH_4 排放的现象和规律, 并初步提出了一些稻田 CH_4 减排途径, 如用腐熟有机肥替代新鲜有机肥, 或采用适当的灌溉技术^[3]。但是, 在采取措施减少稻田 CH_4 排放的同时, 有可能增加 N_2O 排放, 如何协调其中的矛盾, 是一个很值得研究的问题。为此, 1994 年来, 以太湖地区麦茬稻为例, 对稻田 CH_4 和 N_2O 排放进行了同步自动连续观测研究, 以揭示两者的相互关系, 为制定合理的稻田 CH_4 减排措施提供依据。

2 观测实验方法

实验中用两套自动观测系统分别对 CH_4 和 N_2O 排放通量同时进行全天候连续观测。 CH_4 自动系统中设置有一个能将水稻植株和其他 CH_4 排放途径分离开的特制采样

1995-03-21 收到, 1996-03-01 收到修改稿

* N_2O 观测研究曾得到大气边界层物理和大气化学国家重点实验室的部分资助

箱。同时, 还就水分、养分、温度等生态因子进行了观测和实验, 以研究它们对 CH_4 和 N_2O 排放的影响。

实验田设在江苏吴县市农科所实验场 ($31^\circ 15' \text{N}$, $120^\circ 34' \text{E}$) 内, 土壤为潜育型黄泥土, 是太湖地区的典型水稻土类型, 耕层土壤为粘壤质, 其养分含量分别为有机质 3.493%, 全氮 0.188%, 全磷 (以 P_2O_5 计) 0.115%, 全钾 (以 K_2O 计) 1.34%, pH 值为 6.5, 耕作制度为两年三熟。实验共设两个代表当地常规水肥管理方式的田间处理, 即堆肥加尿素加常规灌溉 (简称有机肥处理) 和 NH_4HCO_3 加常规灌溉 (简称化肥处理), 施肥总量为 $191 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ 纯氮, 堆肥和 25% 的化肥插秧前施作基肥, 返青、拔节和孕穗期各追施 25% 的化肥。

3 结果与讨论

3.1 CH_4 排放季节变化

太湖地区麦茬稻田的 CH_4 排放有明显季节变化规律性。从图 1 可以看出, 插秧后两周内有一次较强的 CH_4 排放, 这与杭州和湖南早稻的情形一致, 产生此排放极值的原因主要是刚淹水后前茬作物遗留在土中的以及新加入的有机质发酵而在土壤中产生了较多的 CH_4 , 图中显示的有机肥处理排放高于化肥处理排放正是说明了这一点。大约在田间淹水三周时出现极小值后, CH_4 排放随水稻进入分蘖期而增强, 到 7 月中旬的水稻分蘖盛期达到排放最大值, 一直到 9 月初水稻抽穗以前, CH_4 排放都保持在较高水平, 这是高温和水稻旺盛生长的结果。这一阶段的日平均土壤温度最高, 达 $25 \sim 35^\circ \text{C}$, 高温促进了土壤中 CH_4 的微生物产生过程。同时, 这一阶段的水稻生长也最旺盛, 植株将土壤中产生的 CH_4 输送到大气的能力最强。但从图 1 显然可见, 这一阶段中 7 月下旬和 8 月中旬的排水晒田导致了 CH_4 排放的两次大幅度下降。在 CH_4 排放随水层变薄而减弱的过程中, 当水层厚度下降到 $0 \sim 1 \text{ cm}$ 时, 通常会陡然出现一个

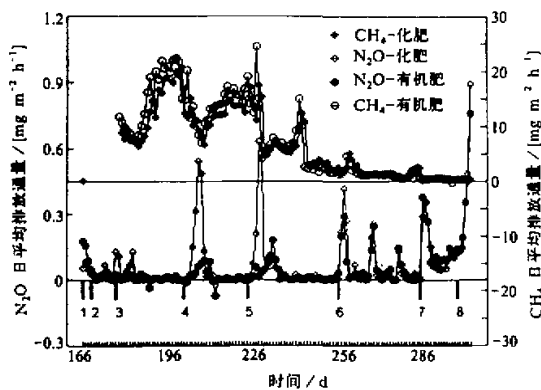


图 1 稻田 CH_4 和 N_2O 排放

(1) 泡田, (2) 施肥, (3) 追施氮肥, (4) 追施氮肥, 排水晒田一周, (5) 追施氮肥, 排水晒田一周, (6) 开始灌排交替, (7) 停止灌溉, (8) 收割水稻

CH_4 排放极值, 其强度有时可达到或超过开始排水以前的水平, 一至两天后, 排放又继续下降, 直到稻田复水。排水导致的排放下降幅度取决于稻田土壤的落干程度, 恢复灌水后排放逐渐上升, 约 10 天后才恢复到接近晒田前的水平。晒田引起 CH_4 排放下降的原因之一可能是, 大量 O_2 扩散到土壤中, 使 CH_4 在从产生地点传输到大气以前就被氧化。此外, 水稻为了减少水分蒸腾而关闭气孔, 也会限制 CH_4 排放。水稻开始抽穗以后, CH_4 排放迅速减弱, 除 9 月下旬和 10 月中旬出现过两个不太明显的极值外, 一直呈下降趋势。这主要是因为水稻生长后期, 生理活动减弱, 输送 CH_4 的能力下降。从图 1 还可以看出, 两个实验处理的 CH_4 排放差异不很显著, 有机肥处理的总排放仅比化肥高 12%。除了第一个排放极大值和营养生长盛期的两次人为排水引起明显的 CH_4 排放极小值外, 本实验处理无论是各个极大值出现和持续时间, 还是排放强度, 都与实行沼渣加持续灌水处理的湖南晚稻非常相近。

3.2 CH_4 排放日变化

晴天且田间有水层覆盖时, 太湖地区麦茬稻田的 CH_4 排放日变化很有规律性, 主要表现为单峰模态 (如图 2a), 极大值出现在下午 13~16 时左右, 与温度日变化一致。这种日变化形式和湖南地区早、晚稻以及杭州地区早稻相一致。实验中还常常观测到双峰形式的 CH_4 排放日变化 (如图 2b), 但不如杭州地区晚稻的双峰明显, 主峰出现的时间与单峰形式相同, 次峰一般出现在夜间 2 时左右, 其强度远比主峰小。抽穗期间, 连续几天观测到夜间至凌晨出现的单峰形式。当田间无水层或水层厚度接近于零时, 排放最大值出现的时间比淹水时约提前 1~4 个小时。田间水分越少, 最大值出现得越早, 但日变幅也越小, 原因可能是水稻为了减少水分蒸腾而在高温到来时关闭了部分气孔。阴雨天气时, CH_4 排放的日变化随机性很大, 这与杭州和湖南地区的情形一致。水稻抽穗以后的排放日变幅远小于抽穗以前。

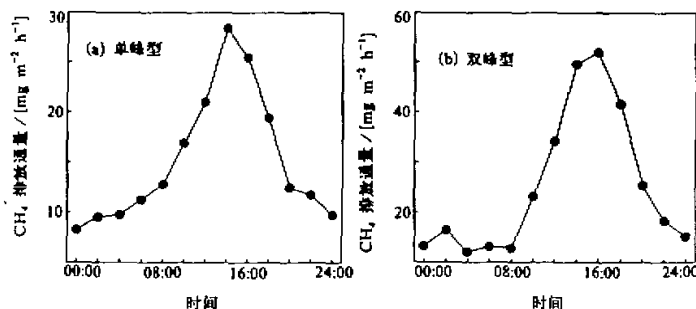


图 2 CH_4 排放通量日变化

除抽穗开花期以外, 通过气泡和扩散途径排放 CH_4 的日变化形式与总排放基本一致, 但常常在 20 至次日 4 时左右出现非常明显的次峰, 表现为典型的双峰型日变化。出现次峰的原因可能是夜间水稻停止光合作用后多数气孔关闭, 土壤中产生的 CH_4 不能及时通过气孔排出, 积蓄在土壤中的 CH_4 积累过多后就形成气泡排出。水稻分蘖期和拔节孕穗期, 通过这两条途径排放的 CH_4 占总排放的 3%~67%, 平均 31%。可

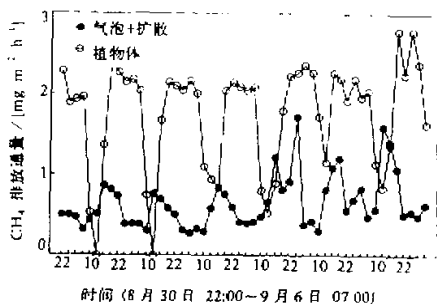


图3 水稻抽穗开花期不同途径的 CH_4 排放日变化

决定的。花期之后, 几乎观测不到明显的水稻植株排放日变化。所以, 水稻返青阶段和生殖生长阶段的稻田 CH_4 排放日变化形式主要取决于气泡和扩散排放途径。

3.3 N_2O 排放季节变化

水稻生长期中, N_2O 排放的季节变化与 CH_4 完全不同, 田间水分状况和施肥是决定 N_2O 季节变化的主要因素, 到水稻成熟期, 温度的影响也比较明显。从图1可见, 6月中旬田后, 日平均 N_2O 排放通量逐渐降到检测限附近, 淹水阶段, 几乎都检测不到明显的 N_2O 排放, 即使施氮肥, 引起的排放也较为微弱。但在7月下旬和8月中旬, 施肥后紧接着晒田, 却引起 N_2O 排放显著增加, 通量极大值比淹水期高出5~10倍, 明显排放所持续的时间取决于晒田天数, 恢复灌水后, N_2O 排放通量立即降到检测限附近。9月中旬到10月中旬, 淹水和晒田交替进行, 每一次晒田都产生一个明显的 N_2O 排放极大值。10月中旬停止灌溉以后, N_2O 排放明显, 但一次连续几天的阴雨降温天气导致排放大幅度回落, 直到天气转晴后, 排放又随土壤湿度减少而大幅度回升。

稻田排放的 N_2O 主要来源于硝化和反硝化土壤微生物产生过程, 前者是好氧过程, 后者是厌氧过程。直接影响 N_2O 生物化学产生过程的因子包括温度、 O_2 供给状况和反应底物有效性。 NO_3^- 和 NH_4^+ 或含氮有机物 ($\text{R} \sim \text{NH}_2$) 分别是反硝化和硝化作用的反应底物。稻田土壤水分状况不仅制约着 O_2 供给状况, 还影响 N_2O 从产生地点向大气的传输过程。在水稻成熟期以前, 日平均气温、水温 and 浅层土壤温度都在 20°C 以上, 具备产生 N_2O 的适宜温度条件, N_2O 排放主要受田间水分状况和反应底物浓度控制。而在水稻成熟期, 温度却成了影响 N_2O 排放的关键因素之一。观测结果表明, 虽然在这一阶段的土壤湿度适宜, 但当耕层土壤的日平均温度下降到 15°C 时, N_2O 排放受到抑制。经分析, 在稻田因排水而由湿变干的过程中, N_2O 日平均排放通量与同日的土壤湿度观测值呈较明显的负相关, 线性相关系数 $|r| > 0.6$ 。 N_2O 通量和耕层土壤的 NO_3^- 含量之间也存在正相关性, $r > 0.5$, 但尚未发现 N_2O 排放通量同 NH_4^+ 含量直接相关, 通常 $|r| < 0.1$, 这可能是因为 NH_4^+ 含量的测量频率太低, 不能反映 NH_4^+ 对 N_2O 排放发生作用的瞬时性。

从图1还可以明显看出, 肥料类型对稻田 N_2O 排放的影响不同。施 NH_4HCO_3 引

见, 这一阶段的稻田 CH_4 排放日变化形式由植物体、气泡和扩散途径共同决定。图3给出了水稻抽穗开花期间不同 CH_4 排放途径的日变化。显然, 通过水稻植株维管组织排放 CH_4 的日变化不同于气泡和扩散传输过程, 早晨7时左右开始迅速下降, 10~13时左右达到最低, 然后又迅速回升, 19时左右基本水平地保持极大值状态。由此可以认为, 水稻抽穗开花期夜间至凌晨出现的峰值, 是由水稻植株排放途径

起的排放极大值比堆肥加尿素高 5 倍左右, 且施肥后前者达到排放极大值的时间比后者早 2~5 天, 晒田但不施肥的情况下, 两种肥料处理的排放极大值强度和出现极值的时间均相当一致。水稻生长前期和中期, 有机肥处理中存在更多的可分解有机碳, 从而提高了土壤还原性, 使 NH_4^+ 被硝化氧化成 NO_3^- 后, 紧接着被反硝化还原成了 N_2 , 排放的 N_2O 主要产生于硝化作用阶段, 而对于纯化肥处理, 硝化和反硝化两个过程对 N_2O 排放的贡献都很重要, 因而, 化肥处理施氮肥后的 N_2O 排放增加幅度比有机肥处理强得多。施入土壤中的尿素, 只有被脲酶分解成 NH_4^+ 后, 才能参与硝化作用, 所以, 施尿素后的 N_2O 排放极大值比施 NH_4HCO_3 延迟。经长时间分解后, 水稻生长后期两个处理的可分解有机碳浓度比较接近, 田间又不再施肥, 因此, N_2O 排放的情形比较一致。

3.4 N_2O 排放日变化

对于土壤水分过饱和的稻田, 施氮肥后 N_2O 排放显著增强。通常, 头几天的排放通量逐渐上升幅度大于日变化幅度, 日变化规律不明显, 但几天过后, 往往表现出较明显的日变化规律性, 即上午排放通量迅速上升, 到 12 时左右达到极大值 (如图 4a)。未施肥时排水晒田也导致 N_2O 排放显著增强, 但日排放极大值出现的时间随机性很大, 只有当天气持续晴朗, 田间较长时间未施肥, 土壤湿度相对稳定时, 才能观测到有规律的日变化。如图 4b 所示, 对于长时间未施肥, 且土壤水分不饱和的稻田, 通常在下午 13~17 时左右达到日排放极大值, 夜间的排放相对稳定, 变化形式与温度日变化一致。土壤水分过饱和稻田的日排放极大值比水分不饱和稻田提前 1~5 小时, 这可能与 N_2O 扩散传输过程有关。 N_2O 气体在水和泥浆中的扩散传输速率比空气中慢 2~4 个数量级, 因而, 对于水分过饱和稻田, 土壤中产生的 N_2O 难以及时排出而积蓄起来, 到白天温度上升时才因扩散速率加快而排放。水稻植株也可能在排放土壤中夜间积蓄的 N_2O 中起了一定作用。可以认为, 土壤水分过饱和时的规律性 N_2O 排放日变化取决于受温度影响的 N_2O 气体在土壤和水中的扩散传输过程。相反, 对于土壤水分不饱和稻田, 土壤中产生的 N_2O 可以及时地通过土壤充气孔隙排出, N_2O 排放的规律性日变化很大程度上取决于土壤中的 N_2O 产生过程, 日排放极大值比气温和表层土壤温度明显延迟, 其原因可以解释为: 土壤中微生物产生 N_2O 的过程对表层土壤温度极大值的响应存在时滞效应。

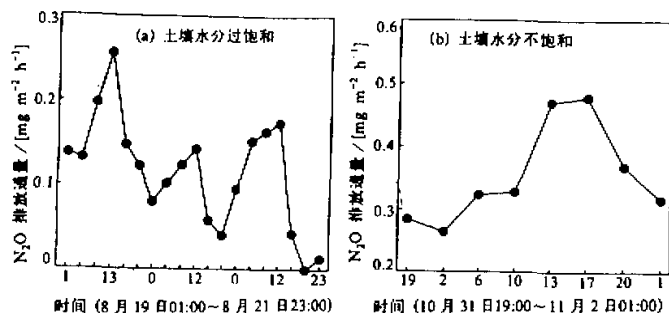


图 4 稻田 N_2O 排放日变化

3.5 稻田 CH_4 和 N_2O 排放的相互关系

同步连续观测结果表明, 稻田 CH_4 和 N_2O 排放随土壤水分条件变化而互为消长(如图 1)。水稻分蘖后期和拔节孕穗期的两次排水晒田显著削弱了 CH_4 排放, 但却促进了 N_2O 排放。在水稻生长前期, 淹水阶段几乎检测不到 N_2O 排放, 但 CH_4 排放却很强, 而在水稻生长后期, N_2O 排放相对较强, 而 CH_4 排放却逐渐趋近于零。稻田 CH_4 和 N_2O 排放的互为长落关系可从图 5 得到更直观的反映。这种差异的原因是两种

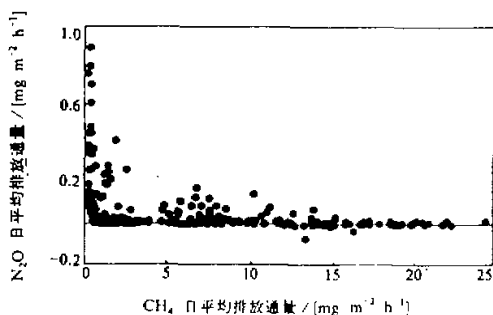


图 5 稻田 CH_4 和 N_2O 排放的关系

气体的微生物产生过程要求不同的环境条件。 CH_4 产生过程要求厌氧环境, 而 CH_4 的氧化消耗过程要求好氧环境, 当排水使土壤通气状况改善时, 既促进了 CH_4 氧化过程, 同时又可能部分地抑制了 CH_4 产生过程。另外, 当田间水分不足时, 为了减少水分蒸腾, 水稻可能关闭部分气孔, 从而减少了植物体途径的 CH_4 排放。硝化作用是好氧的, 反硝化作用是厌氧的, 但只有当 O_2 供应部分地受到

限制时, 才促进硝化过程形成 N_2O , 同样, 只有存在适量的 O_2 分压时, 才能促进反硝化产生 N_2O 的过程, 而较严格的厌氧环境则会使反硝化作用的中间产物 N_2O 被进一步还原成 N_2 ^[4~6], 从而抑制 N_2O 排放, 这就是淹水时几乎检测不到 N_2O 排放通量, 有时甚至观测到负通量的原因。排水晒田时, 较适宜的土壤湿度导致了同时适宜于硝化和反硝化过程产生 N_2O 的 O_2 供给状况, 因而引起显著的 N_2O 排放。

尽管存在以上显著差异, 稻田 CH_4 和 N_2O 排在日变化形式上却有共同之处, 即当环境条件稳定时, 两者具有与温度相似的日变化形式, 反之, 则日变化的随机性很大, 这说明它们的日变化都与温度对传输过程的影响有关。

水稻生长期内的 CH_4 排放总量分别为有机肥处理 $245.33 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, 化肥处理 $218.60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, 抽穗以前的排放占总排放量的 $89\% \sim 92\%$ 。 N_2O 的总排放量分别为有机肥处理 $1.62 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, 化肥处理 $2.31 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ 。 N_2O 有机肥处理的排放量比化肥处理少 30% , 抽穗以前的排放占总排放量 $27\% \sim 48\%$ 。在水稻生长季前后的旱地阶段, 既未检测到 CH_4 排放, 也未观测到明显的 CH_4 负通量, 因此, 可以认为太湖地区稻麦轮作周期内的 CH_4 排放全部集中在水稻生长季。 N_2O 的情形则不同, 整个稻麦轮作周期排放量达 $9.6 \sim 13.6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, 水稻生长季的排放量仅约占 30% 。在 20 年时间尺度上, 单位质量 N_2O 全球增温潜势 (GWP) 为 CH_4 的 4 倍^[7], 以此为依据, 水稻生长季排放 N_2O 的 GWP 仅为 CH_4 的 $2.6\% \sim 4.2\%$, 但就整个稻麦轮作周期而言, N_2O 的 GWP 为 CH_4 的 $15.6\% \sim 24.8\%$ 。若以 500 年内 N_2O 的 GWP 为 CH_4 的 20 倍^[7]计, 则稻麦轮作周期内排放 N_2O 的 GWP 为 CH_4 的 $78\% \sim 124\%$ 。这说明, 尽管生态系统排放的 N_2O 绝对量远小于 CH_4 , 但就长时期而言, 所排放的 N_2O 对全球环境的影

响并不亚于 CH_4 。考虑到 N_2O 生物源分布广泛和化学氮肥用量在逐年增加, N_2O 生物源排放相对于稻田 CH_4 排放的重要性在全球范围内可能更大。因此, 在进行温室气体的非工业源排放研究时, 生态系统排放 N_2O 的问题, 特别是农田排放 N_2O 的问题应当同稻田排放 CH_4 的问题一样受到重视。

参 考 文 献

1. FAO and IAEA, 1992, Measurement of methane and nitrous oxide emissions from agriculture, A Joint Undertaking by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and the International Atomic Energy Agency, International Atomic Energy Agency, Vienna, 5~6.
2. Wang Mingxing, 1996, Methane in rice agriculture, in: *From Atmospheric General Circulation to Global Change*, Beijing: China Meteorological Press, 647~659.
3. Wang Mingxing et al., 1992, Methane in the rice field: production, emission and control measures, in: *Proceeding of the CEC / PRC Joint Workshop on Global Climate Change*, 77~82.
4. Anderson, I. C. and J. S. Levine, 1986, Relative rates of nitric oxide and nitrous oxide production by nitrifiers, denitrifiers, and nitrate respirers, *Appl. Environ. Microbiol.*, **51**, 938~945.
5. Firestone, M. K. and E.A. Davidson, 1989, Microbiological basis of NO and N_2O production and consumption in soil, in: *Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere* (ed. M.O. Andreae and D. S. Schimel), New York: John Wiley and Sons, 7~21.
6. Poth, M. and D.D. Focht, 1985, ^{15}N kinetic analysis of N_2O production by *Nitrosomonas europaea*: An examination of nitrifier denitrification, *Appl. Environ. Microbiol.*, **49**, 1134~1141.
7. Shine, K.P., R.G. Derwent and D.J. Wuebbles et al., 1990, Radiative forcing of climate, in: *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment* (ed. J. T. Houghton et al.), Cambridge: Cambridge Univ. Press, 47~68.

CH_4 and N_2O Emissions from Rice Paddy Fields in Southeast China

Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi, Shen Renxing, Shangguan Xingjian

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

J. Heyer, M. Kogge, H. Papen

(Fraunhofer Institute for Atmospheric Environmental Research, Germany)

Jin Jisheng and Li Laotu

(Wuxian Institute of Agricultural Sciences, Suzhou 215128)

Abstract The seasonal variations of CH_4 and N_2O emission from rice fields are completely different. The N_2O emission intensively increases while CH_4 emission decreases because of drainage. However, their patterns of diurnal variations are similar. The maximum emissions of both gases usually occur in the afternoon on clear days. Sometimes, another smaller peak of CH_4 emission could be observed during the night. Significant effects of fertilizer application on N_2O and CH_4 emissions were also detected.

Key words CH_4 emission N_2O emission rice paddy fields