

旱作及水作条件下稻田 CH_4 和 N_2O 排放的观察研究*

李曼莉¹ 徐阳春¹ 沈其荣^{1†} 周春霖² 黄新宇¹ 殷晓燕¹
尹金来² Dittert K³

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 江苏沿海地区农业科学研究所, 江苏盐城 224002)

(3 德国基尔大学)

摘要 通过田间试验研究不同土表覆盖处理旱作和水作水稻全生育期内土壤微量气体的排放。结果表明,旱作稻田当季 N_2O 的排放总量是水作稻田的5~6倍,而水作稻田 CH_4 的排放总量是旱作稻田的8~19倍。不同覆盖旱作处理 N_2O 的排放总量为:裸露>覆膜>盖草, CH_4 排放总量为:覆膜>裸露>盖草。水作稻田 CH_4 的排放与水稻生育期关系密切,以分蘖盛期的 $5.0 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 为最大。旱作稻田 N_2O 的排放与施氮关系密切,其排放通量峰值出现的时间因施氮时期不同而异,基肥的峰值 ($2116.7 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) 出现在施肥后第11 d;分蘖肥的峰值 ($4394.3 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) 出现在施肥后第9~10 d;穗肥的峰值则在施肥后的第6 d 出现,达 $3335.0 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。

关键词 水作水稻,土表覆盖,旱作水稻, CH_4 , N_2O

中图分类号 X511

CH_4 和 N_2O 是与全球气候变化密切相关的两种温室气体,其增温势分别为 CO_2 的62和284倍^[1]。大气中增加的 CH_4 和 N_2O 约70%~90%来自于生物源,其中相当一部分来自于农田生态系统^[2]。资料表明,稻田是 CH_4 和 N_2O 的主要生物排放源之一^[1,3]。全球由于施用化学氮肥而从农田排放的 N_2O -N 达 $2\sim 3 \text{ Tg a}^{-1}$ ^[2], 占全球生物源排放总量的21%~46%。全球稻田 CH_4 排放量为 $35\sim 60 \text{ Tg a}^{-1}$, 占全球生物源排放总量的10%~15%^[4]。

土表覆盖旱作水稻是一项崭新的栽培技术,它具有节水、省工、节本等优点,然而这种栽培方式对温室气体排放的影响如何尚未见报道。本文通过对不同覆盖处理旱作稻田与水作稻田 CH_4 和 N_2O 排放特点进行的比较,旨在阐明水稻旱作栽培对大气环境和温室效应的影响,为该技术的推广提供环境评价依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

田间试验在江苏沿海地区农业科学研究所试验场进行($33^\circ 27' \text{N}$, $120^\circ 11' \text{E}$),供试土壤为黄泛冲积物发育的盐潮土,有机质和全氮含量分别为 12.5 g kg^{-1} 和 0.8 g kg^{-1} , pH 8.3。供试水稻生长季平均温度 23.7°C ,降雨总量为 484.2 mm 。

1.2 试验设计

试验设水稻旱作和水作两部分,旱作含覆膜、盖草和裸露3个处理。每个处理重复3次,小区面积

* 国家自然科学基金项目(批准号:30070446)资助

† 通讯作者, E-mail: qshen@njau.edu.cn

收稿日期:2002-07-08;收到修改稿日期:2003-02-17

为 6 m × 12 m, 旱作处理小区随机排列。水、旱作稻株、行距均为 25 cm × 15 cm, 每穴定苗 3 株。供试水稻品种为特优 559。

1.3 水肥管理

所有旱作处理水稻于 2001 年 5 月 9 日直播后覆盖地膜直至秧苗 2~3 叶期, 地膜覆盖处理在秧苗处开一小口破膜放苗; 盖草和裸露两处理则揭去地膜, 盖草处理按 6 000 kg hm⁻² 覆盖半腐解稻草; 裸露处理按旱作种植方式。水作水稻 5 月 13 日落谷, 6 月 13 日移栽。旱作水稻分别于 5 月 6 日、6 月 13 日和 7 月 31 日施基肥、分蘖肥和穗肥; 水作则于 6 月 13 日、6 月 26 日和 7 月 31 日施基肥、分蘖肥和穗肥。氮肥用尿素, 用量为 N 225 kg hm⁻², 按基肥、分蘖肥和穗肥 4:3:3 的比例施用; 磷、钾用普钙和氯化钾, 均作基肥施用, 用量分别为 P 45 kg hm⁻² 和 K 90 kg hm⁻²。水作水稻在灌浆期以前(除 7 月 17 日到 7 月 24 日烤田期外)均保持 5 cm 水层; 旱作处理每个小区用 6 个张力计控制土壤水分在田间持水量的 90% 左右。9 月 29 日收获覆膜和水作处理, 10 月 6 日收获盖草和裸露处理。

1.4 采样和测定

在水稻出苗并完成上述的覆膜、盖草和裸露处理后, 于各处理小区中设立气样采集的微区, 每个微区包含 2 行, 每行 4 穴, 微区中的处理方式与小区内完全一致, 即地膜覆盖处理在秧苗处开一小口破膜放苗, 盖草处理按 6 000 kg hm⁻² 覆盖半腐解稻草; 裸露处理按旱作物种植方式。气样的采集用静态密闭箱法^[5], 箱体尺寸为 50 cm × 60 cm × 90 cm(苗期采用 30 cm 高箱体), 用外接三通阀的聚乙烯管采样, 采样量为 60 ml, 采样时间为中午 12:00。水稻生长期间每周采样 1 次, 每次施肥后连续采集 10 d。采用气相色谱仪(Shimadzu, GC-14A)测定样品中 N₂O 和 CH₄ 的浓度^[6]。通过对每组 4 个样品的混合比与相对应的采样间隔时间(0、10、20、30 min)进行直线回归, 计算该采样点的气体排放速率。继而根据大气压力、气温、气体常数、采样箱的有效高度、气体分子量等, 求得单位面积的排放量。单位面积上和单位时间内, 由农田释放或吸收温室效应气体通量 F 是由多因素形成的综合宏观数据, 可表示为:

$$F = \Delta m / A \cdot \Delta t = \rho \cdot v \cdot \Delta c / A \cdot \Delta t = \rho \cdot h \cdot \Delta c / \Delta t$$

其中 ρ 为气体密度, h 为箱子高度, $\Delta c / \Delta t$ 为单位时间内采气箱内待测气体浓度的变化率。N₂O 和 CH₄ 排放通量结果用每次测定 3 个重复的平均值及标准偏差表示, 排放总量以水稻生长季平均排放通量乘以整个生长季的时间。水稻生长季平均排放通量是每次采样时的平均排放通量按照相邻 2 次观测间隔时间加权平均的值。

2 结果与讨论

2.1 水稻不同栽培方式对稻田 CH₄ 排放通量的影响

水稻生长期间稻田 CH₄ 的排放通量因栽培方式和生育期不同而异(图 1)。水作稻田 CH₄ 的排放通量远大于旱作稻田, 最高可达到 5.0 mg m⁻² h⁻¹; 而覆膜, 盖草和裸露等旱作处理稻田 CH₄ 的排放量始终 < 1.0 mg m⁻² h⁻¹。从水作水稻的生育进程上看, CH₄ 的排放随水稻进入分蘖期而增强, 到 7 月中旬的分蘖盛期达到最大排放量, 这与前人的研究结果相吻合, 主要是由于土壤中 CH₄ 浓度的增加及水稻茎秆的增粗所致^[7]。7 月 17 日~24 日烤田期间 CH₄ 的排放通量迅速下降, 可能是由于大量 O₂ 扩散到土壤中, 使 CH₄ 的产生受到抑制。烤田结束回水后, 土壤中 CH₄ 的排放又重新升高, 至 8 月 21 日水稻进入抽穗期时达到第二排放高峰, 这主要于水稻根系的衰亡补充碳源有关^[8]。以后因稻田间歇湿润灌溉, 使土壤的还原环境被打破, 大大降低了土壤中产甲烷菌的活性, CH₄ 的排放迅速减弱, 并随生育进程呈下降趋势。由于旱作水稻的分蘖期比水作滞后, 其 CH₄ 排放的峰值也相应滞后(图 1)。

2.2 水稻不同栽培方式对稻田 N₂O 排放通量的影响

稻田 N₂O 的产生和排放与水分、氧气、温度、有机质含量、pH 等因素有关^[9], 而田间水分状况是决定 N₂O 季节变化的重要因素^[10]。水稻生长季节稻田 N₂O 的排放通量也因不同处理和生育时期而异(图 2)。水作处理 N₂O 的排放通量始终维持在较低水平, 即使在 7 月 17 日至 24 日的烤田期间, 也未出现明显的排放高峰。旱作处理 N₂O 的排放通量均高于水作, 且在每次施肥后一周左右出现排放高峰时差异极显著。基肥和穗肥在高峰后又有一个较小的释放高峰。侯爱新等^[11]在培养试验中也观察到类似的现象。水稻生长后期土壤中无机氮含量因水稻的吸收已降至较低水平, 加之气温下降, N₂O 的排放通量均

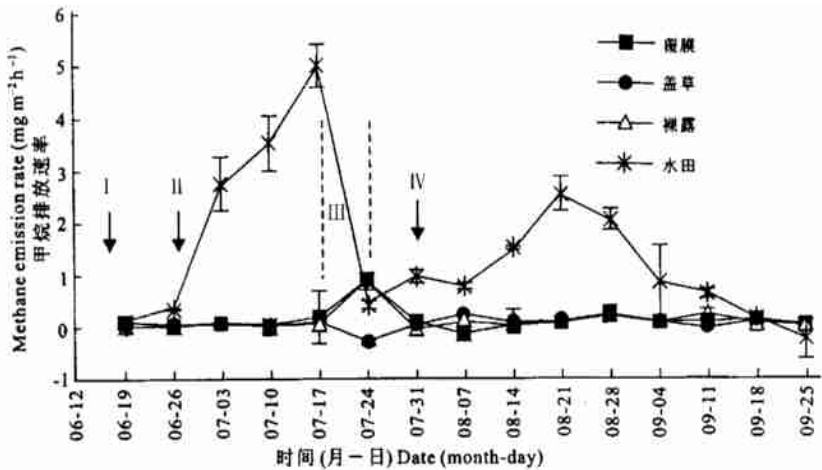


图 1 不同处理稻田甲烷排放通量的季节变化

Fig.1 Methane emission rate during the growing period

I. 水田基肥; II. 水田分蘖肥; III 搁田; IV. 穗肥

较低。水稻整个生育期盖草处理 N_2O 的排放通量明显低于覆膜和裸露处理。

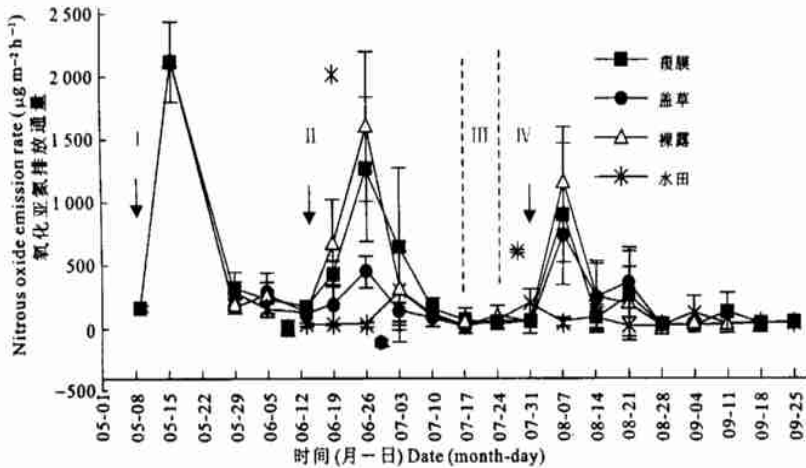


图 2 不同处理氧化亚氮排放通量的季节变化

Fig.2 Nitrous oxide emission rate during the growing period

I. 基肥; II. 分蘖肥; III 搁田; IV. 穗肥

2.3 施肥对稻田 N_2O 排放的影响

N_2O 的排放通量的变化趋势因不同施肥时期迥异(图 3~ 图 5)。旱作稻田 5 月 6 日施用基肥后连续测定的结果表明,前 9 d 内 N_2O 的排放通量无明显增加,自第 10 d 起排放通量急速上升,第 11 d 时达到排放最大高峰($2116.7 \mu g m^{-2} h^{-1}$),以后迅速下降;而水作施用基肥后 10 d 内 N_2O 的排放通量未见显著增加。旱作处理施用分蘖肥后, N_2O 的排放通量的变化趋势也因土面覆盖物的不同而异: 盖草处理在施肥后第 9 d 首先达到最大排放通量 $4394.3 \mu g m^{-2} h^{-1}$, 比覆膜和裸露的均提前 1 d, 且覆膜和裸露处理 N_2O 的排放通量的增加趋势比较平缓,第 10 d 盖草处理的 N_2O 排放通量已有下降趋势,覆膜和裸露处理仍有上升趋势,且裸露处理的排放通量增加很快。可见,分蘖肥施用后,覆膜和裸露处理 N_2O 的排放通量的峰值比盖草的迟出现 1~ 2 d。

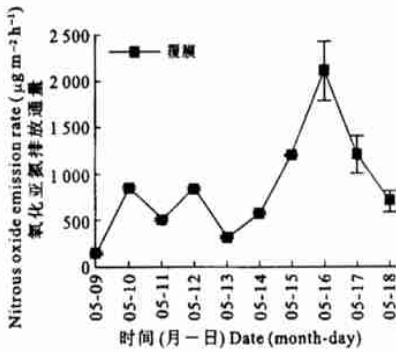


图 3 旱地施肥后氧化亚氮的排放规律

Fig. 3 Nitrous oxide emission rate in ten days after N applied as basal fertilizer under upland condition

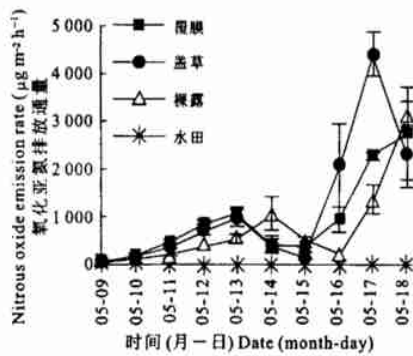


图 4 旱地施分蘖肥、水田施基肥氧化亚氮排放规律

Fig. 4 Nitrous oxide emission rate in ten days after N fertilizer applied at tillering stage under upland condition and as basal fertilizer under paddy

水稻施用穗肥后,前 5 d N₂O 的排放通量均低于 600 µg m⁻² h⁻¹ (图 5), 各处理均在第 6 d 达到最大的 N₂O 排放通量。以裸露处理的 N₂O 的排放通量为最大,达到 3 335.0 µg m⁻² h⁻¹, 且第 7 d 仍维持在同一水平, 然后迅速下降; 盖草处理的 N₂O 的排放通量也达到峰值 2 853.6 µg m⁻² h⁻¹, 小于裸地的最大排放通量, 且达到最大排放通量后, 迅速下降, 达到初始值; 覆膜处理的 N₂O 的最大排放通量只有 2 005.1 µg m⁻² h⁻¹, 然后缓慢下降, 三种不同处理均在第 10 d 回到初始排放水平。尽管在施穗肥后第 6 d 也有排放高峰出现, 但水作处理的 N₂O 的排放通量始终在 1 000 µg m⁻² h⁻¹ 以下。有研究认为, 水稻田 N₂O 排放峰值与施肥有关^[12], 也有研究结果表明施肥与 N₂O 的排放没有明显相关^[13]。本试验中, 水田施用基肥和分蘖肥, N₂O 排放都没有明显的增加, 但在穗肥施用后, 水作处理与旱作处理同期出现排放峰值。总的来说, 施用穗肥 9 d 内 N₂O 的平均排放通量: 裸露 > 盖草 > 覆膜 > 水作。

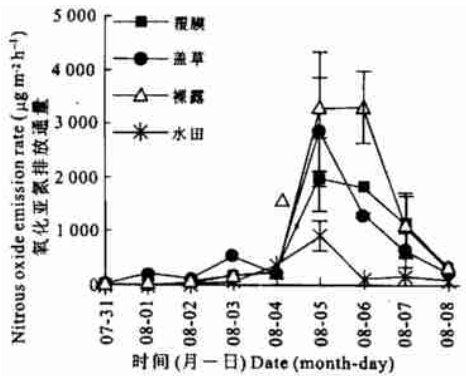


图 5 不同处理施穗肥后氧化亚氮排放规律

Fig. 5 Nitrous oxide emission rate in nine days after N fertilizer applied at booting stage

综上所述, 稻田 N₂O 的排放明显受施肥影响, 但施肥后 N₂O 的排放特征却因不同施用时期而异, 基肥、分蘖肥和穗肥施用后的最大排放高峰分别出现在第 11、9 和 6 d。究其原因可能是由于不同时期的气温差异所致。基肥施用 5 月, 气温较低, 平均气温 23.3 °C, 氮肥在土壤中的转化速率较缓, 因此到第 11 d 才检测到排放峰值, 而穗肥的施用期刚好在 7 月底, 是水稻生长季中气温最高的时期, 平均气温达到 29.0 °C, 土壤中的硝化作用和反硝化作用随温度的升高而增强, 因此施肥引起的 N₂O 的排放峰值也提前出现。而分蘖肥施用期间由于降雨的影响其规律并不明显。徐文斌等^[14]通过 t 检验也发现 N₂O 排放通量季节变化受温度季节性渐变的控制。

2.4 不同处理稻田 CH₄ 和 N₂O 的总排放量

水稻全生育期不同处理 CH₄ 和 N₂O 的排放总量差异明显 (表 1)。旱作水稻 N₂O 的当季排放总量是水作的 5~6 倍; 而水作水稻 CH₄ 的排放总量是旱作的 8~19 倍。旱作处理中 N₂O 排放总量为: 裸露 > 覆膜 > 盖草, CH₄ 排放总量为: 覆膜 > 裸露 > 盖草。本试验中, 旱作条件下覆盖半腐解稻草 CH₄ 排放量比覆膜和裸露处理分别低 57.57% 和 46.66%。此现象值得关注, 其机理有待进一步研究。

表 1 不同处理氧化亚氮和甲烷一季排放总量比较

Table 1 Total emissions of nitrous oxide and methane in different treatments

处理 Treatment	N ₂ O(mg m ⁻²)	CH ₄ (mg m ⁻²)	处理 Treatment	N ₂ O(mg m ⁻²)	CH ₄ (mg m ⁻²)
覆膜	1 260.5	586.6	裸露	1 380.1	466.6
盖草	1 105.8	248.9	水田	214.8	4 634.4

在 20 a 时间尺度上, 单位质量 N₂O 全球增温潜势(GWP) 为 CH₄ 的 4.6 倍^[1], 以此为依据计算, 水作处理 GWP 分别是覆膜、盖草和裸露处理的 0.9、1.1 和 0.8 倍; 若以 100 a 计 N₂O 的 GWP 为 CH₄ 的 13.3 倍^[1], 则水作处理对全球的增温效应贡献小于旱作各处理, 旱作处理中 GWP: 盖草 < 覆膜 < 裸露。显然长期而言, 水稻旱作对温室效应的贡献并不比水作少。因此, 国际上认为种水稻国家的土壤对全球温室效应的影响大于种旱地作物国家的土壤, 这一论点值得进一步研究和商榷。

3 小结

1. 水稻水作和三种不同覆盖旱作处理 CH₄ 和 N₂O 的排放通量差异明显。旱作明显减少 CH₄ 的排放, 特别是盖草处理, 水稻全生育期 CH₄ 的排放总量比水田减少了 20 倍, 但 N₂O 的排放总量有所增加, 就长时期而言, 对全球温室效应的影响亦不可小视。

2. 水作水稻 CH₄ 的排放与水稻生育期关系密切。旱作水稻 N₂O 的排放受施肥影响明显, 施用基肥、分蘖肥和穗肥达到排放高峰的时间各异, 分别出现在肥料施用后的第 11、9 和 6 d。

3. 盖草处理 CH₄ 和 N₂O 的排放都较低, 其产量与覆膜处理接近(水作, 覆膜, 盖草和裸露处理的产量分别为 9.6×10^3 、 8.5×10^3 、 8.5×10^3 、 7.8×10^3 kg ha⁻¹) 且可操作性强, 因此采用稻草覆盖进行水稻旱作不失为一项切实可行的措施。

参考文献

1. IPCC. Climate Change: IPCC WGI third assessment report. Chapter 6. Assessment and Expert Review Draft. 2000
2. FAO, IAEA. Measurement of methane and nitrous oxide emissions from agriculture. A Joint Undertaking by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Atomic Energy Agency, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1992, 5~6
3. Dlugokencky EJ, Steele LP, Lang PM, *et al.* The growth rate and distribution of atmospheric methane. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 17 021~ 17 043
4. Wang M X. Methane in the rice field, in: *From Atmospheric General Circulation to Global Change*, Beijing: China Meteorological Press, 1996. 647~ 659
5. 黄国宏, 陈冠雄, 吴杰, 等. 东北典型旱作农田 N₂O 和 CH₄ 排放通量研究. *应用生态学报*, 1995, 6(4): 383~ 386
6. 黄耀, 蒋静艳, 宗良纲, 等. 种植密度和降水对冬小麦田 N₂O 排放的影响. *环境科学*, 2001, 22(6): 20~ 23
7. Bossio D A, Horwath W R, Mutters R G, *et al.* Methane pool and flux dynamics in a rice field following straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.*, 1999, 31: 1 313~ 1 322
8. Yang S S, Chang E H. Effect of fertilizer application on methane emission/production in the paddy soils of Taiwan. *Biol. Fertil. Soils*, 1997, 25: 245~ 251
9. 齐玉春, 董云社. 土壤氧化亚氮产生、排放及其影响因素. *地理学报*, 1999, 54(6): 534~ 542
10. 黄国宏, 陈冠雄, 韩冰. 土壤含水量与 N₂O 产生途径研究. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 53~ 56
11. 侯爱新, 陈冠雄. 不同种类氮肥对土壤释放 N₂O 的影响. *应用生态学报*, 1998, 9(2): 176~ 180
12. 徐华, 邢光熹, 张汉辉. 太湖地区水田土壤 N₂O 排放通量及其影响因素. *土壤学报*, 1995, 32(增): 144~ 150
13. 卢维盛, 张建国, 廖宗文. 广州地区晚稻田 CH₄ 和 N₂O 的排放通量及其影响因素. *应用生态学报*, 1997, 8(3): 275~ 278
14. 徐文斌, 刘维屏, 刘广深. 温度对旱地土壤 N₂O 排放的影响研究. *土壤学报*, 2002, 39(1): 1~ 8

METHANE AND NITROUS OXIDE FLUXES IN AEROBIC AND WATERLOGGED PRODUCTION SYSTEMS OF RICE CROP

Li Man-li¹ Xu Yang-chun¹ Shen Qi-rong¹ Zhou Chun-lin² Huang Xi-yu¹

Yin Xiao-yan¹ Yin Jin-lai² Klaus Ditter³

(1 College of Natural Resources & Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 Agricultural Research Institute of Jiangsu Coastal Area, Yancheng, Jiangsu 224002, China)

(3 Christian Albrechts University of Kiel, Germany)

Summary

A field experiment was carried out in Yancheng to assess CH_4 and N_2O emission rate in such two different cultivation systems of rice as traditional paddy production and aerobic production with different covers. There were four treatments, i. e., three treatments designed in aerobic rice production system such as the plots covered with plastic film (I), straw mulch (II) and bare (without any cover) (III) and one treatment in waterlogged rice production (as CK). The emission of N_2O and CH_4 was measured during the entire cultivation period in the two completely different cultivation system. The results obtained were as follows. The total N_2O fluxes in aerobic condition was five to six times higher than that in paddy soil, while the total emissions of CH_4 in paddy soil was eight to nineteen times higher than that in aerobic condition. The total N_2O emissions during the growth period of rice within the three treatments in aerobic condition were significantly different. They were in the order of I > III > II, whereas the order of the total CH_4 emissions was III > I > II. The maximum emission rate of CH_4 ($5.0 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) from waterlogged soil was found in the tillering stage of the rice crop. Fertilization was the primary factor affecting the N_2O emissions in aerobic condition. The peaks of the emission rates of N_2O from aerobic soil were observed in the eleventh day, the ninth to tenth day and the sixth day after N applied as basal fertilizer, applied at tillering and booting stage, respectively.

Key words Rice, Waterlogged soil, Aerobic soil, Methane, Nitrous oxide