

# 长江三角洲稻田 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 排放规律的数值模拟\*

刘建栋 周秀骥

于 强

中国气象科学研究院,北京 100081

中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101

**摘要** 建立了 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 排放数值模式,模式可以正确反映稻田 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 排放特征. 数值分析证实了水稻生长期内 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 排放的消长关系,并揭示出 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 年际排放量的正相关关系. 气象因子中,生长期平均气温与 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放间存在明显正相关. 敏感分析表明温度升高后,生长期平均气温与 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量之间的正相关关系将略有加强. 反演了苏州地区近百年 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 排放状况,表明近期人类农业生产对温室效应具有巨大增进效应.

**关键词** 稻田 温室气体 排放规律 数值模拟

CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 是两种重要温室气体<sup>[1]</sup>,稻田是 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的主要农业排放源. 近年 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放量正在分别以每年 0.9% 和 1% 的速率递增,而目前有机肥、无机肥的大量使用对这两种温室气体具有较强的增排效应<sup>[2~5]</sup>.

长江三角洲是中国水稻主产区之一,研究该地区稻田 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 排放规律,为实现农业可持续发展提供有效途径,成为重要研究课题. 本文在综合诸多学科研究成果的基础上<sup>[6~12]</sup>,建立起具有较强依据的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放数值模式,并利用该模式揭示了 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的敏感因子以及诸多因素间的相互关系,以期在此基础上为该地区 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的可靠监测和有效调控提供科学依据.

## 1 模型的建立

模型由气象资料处理、作物生长、碳氮循环等 5 部分 12 个子模块耦合组成,简介如下.

### 1.1 气象资料处理

由太阳轨道方程得到地理纬度为  $\psi$ , 太阳时角为  $\omega$  的太阳光合有效辐射  $P(\omega)$  为

$$P(\omega) = \frac{0.5 \times Q \times \sinh \times (1 + 0.4 \sinh)}{3600 \times D_s}, \quad (1)$$

$$D_s = D_L (\sin \psi \sin \delta + 0.4 \times \sin^2 \psi \sin^2 \delta + 0.2 \times \cos^2 \psi \cos^2 \delta) + 12 \times \cos \psi \cos \delta \left( 2 + 1.2 \frac{\sin \psi \sin \delta}{\pi} \right) \times \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \psi \sin^2 \delta}{\cos^2 \psi \cos^2 \delta}}, \quad (2)$$

2000-10-20 收稿, 2001-02-23 收修改稿

\* 国家自然科学基金重大项目(批准号: 49899270)和中国科学院百人计划项目资助

式中  $Q$  为日总辐射量, 由日照百分率换算;  $h$  为太阳高度角;  $D_s$  为中间变量;  $\delta$  为赤纬;  $D_L$  为日长. 根据大气传输方程, 散射辐射  $S_p$  为

$$S_p = P(\omega) \times D_f, \quad (3)$$

$D_f$  为散射辐射所占比例, 时角为  $\omega$  的直接光合有效辐射为  $P(\omega) - S_p(\omega)$ . 群体温度和土壤剖面的平均温度根据 William 等<sup>[13]</sup>的方法计算.

## 1.2 作物生长过程

作物模式由发育阶段模式、光合作用与呼吸作用模式、同化物分配模式耦合而成, 光合作用模式中群体日总光合量

$$P_0 = \min(W_s, N_s) \times \int_0^{D_L} \int_0^L P(Lc, t) dL dt, \quad (4)$$

其中  $P_0$  为群体日总光合量 ( $\text{kgCO}_2\text{hm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ),  $Lc$  为群体中某一层的叶面积系数,  $t$  为时间.  $P(Lc, t)$  为单位叶面积的光合速率 ( $\text{kgCO}_2\text{hm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ),  $L$  是叶面积系数,  $W_s$  和  $N_s$  为水分和氮对光合作用的影响因子, 采用 Goudriaan 的三点积分方法求解  $P_0$ <sup>[14]</sup>. 光合作用受水分胁迫以及氮含量等的共同影响, 并与碳氮循环和地下水运动模式相联系.

## 1.3 土壤中碳转化与转移过程

土壤有机碳分为 3 个活性碳库和 1 个惰性碳库, 每个活性碳库分为 2~3 个子库<sup>[9,11,15]</sup>. 根据一阶动力方程, 分层计算每个碳库的分解

$$\frac{dC_i}{dt} = \mu_{Ci} \times \mu_{Ni} \times \mu_{Ti} \times \mu_{Mi} \times \mu_{Li} \times K_i \times C_i, \quad (5)$$

式中  $C_i$  为库的大小 ( $\text{kg}\text{hm}^{-2}\text{L}^{-1}$ ),  $t$  为时间 (步长为 1d),  $i$  代表不同的碳库,  $K_i$  是库的比分解速率,  $\mu_{Ci}$ ,  $\mu_{Ti}$  和  $\mu_{Mi}$  分别为土壤质地, 温度和水分对分解的影响, 用相应函数表示<sup>[11,15]</sup>. 模拟中用源趋动方式计算  $\text{CO}_2$  排放量, 并依据土壤氧化还原势 (Eh) 等计算  $\text{CH}_4$  排放过程.

## 1.4 土壤中氮转化与转移过程

底物铵态氮浓度  $D_N$  受环境条件影响

$$R_N = \begin{cases} D_N \times HM/0.03 \times [1 - \exp(-K_{35} \times f_T)] \times f_{SW} \times f_{PH} & (\text{不淹水}) \\ D_N \times HM/0.03 \times [1 - \exp(-K_{35} \times f_T)] \times f_{Eh} & (\text{淹水}), \end{cases} \quad (6)$$

式中  $R_N$  为铵态氮转化为硝态氮的速率 ( $\text{kg}\text{Nhm}^{-2}\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$ ),  $K_{35}$  为 35℃ 时硝化速率,  $HM$  为微生物和腐质碳库之和,  $f_T$ ,  $f_{SW}$ ,  $f_{PH}$  和  $f_{Eh}$  分别为温度, 土壤水分, pH 值和 Eh 值对硝化过程的影响因子. 在厌氧条件下, 反硝化是氮的主要转化过程, 反硝化菌的生长依赖于可溶性碳及相应氮氧化合物的浓度, 根据双底物 Michaelis-Menten 方程计算

$$U_N = U_{\max} \times \frac{S_C}{K_C + S_C} \times \frac{N_x}{K_N + N_x}, \quad (7)$$

其中  $U_N$  为反硝化菌的相对生长速率,  $U_{\max}$  为最大生长速率,  $S_C$  为可溶性碳浓度,  $K_C$  和  $K_N$  分别为可溶性碳和氮氧化合物的半饱和参数,  $N_x$  为氮氧化物浓度. 作物对无机氮的吸收取决于本身需求及土壤和根系提供氮的能力, 土壤有机氮根据 C/N 比与土壤碳库相联系.

$\text{N}_2\text{O}$  排放速率  $E_N$  与土壤水分状况和它们各自的吸附能力有关, 可表示为

$$E_N = \begin{cases} H_N \times P_i & (\text{不淹水}) \\ 0.01 \times H_N \times (Ar + T/100) & (\text{淹水}), \end{cases} \quad (8)$$

式中  $H_N$  为  $N_2O$  在土层中的含量,  $A_r$  为植物孔隙系数,  $T$  土壤温度,  $P_i$  为中间变量.

## 2 模型验证

模型模拟了熊效振等观测的  $CH_4$  排放过程<sup>[2]</sup>, 以及  $N_2O$  排放观测实验(图 1), 虽然个别过程仍存在一定偏差, 待进一步研究, 但总体而言, 模型较好地反映了水稻生长期  $CH_4$  和  $N_2O$  的排放规律, 因此, 利用模型揭示  $CH_4$  和  $N_2O$  排放规律是可靠的.

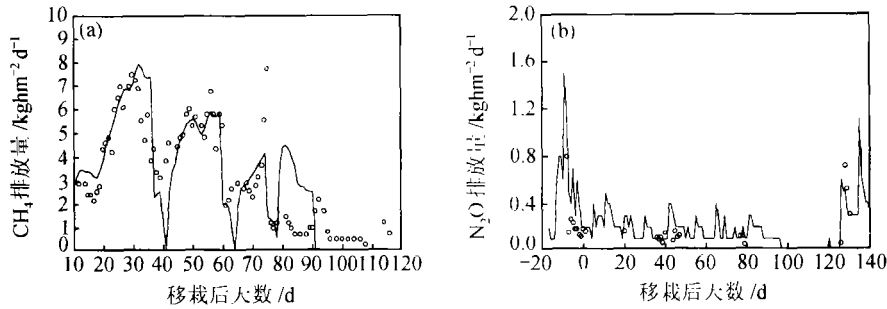


图 1 稻田  $CH_4$  及  $N_2O$  排放的模拟

(a) 苏州  $CH_4$  排放, 1995; (b) 常熟  $N_2O$  排放, 1999; — 模拟值; o 实测值

## 3 模型的应用

模拟对象为苏州地区单季稻, 稻田 6 月 15 日开始淹水, 6 月 18 日移栽, 7 月 22 日~7 月 28 日第 1 次晒田, 8 月 12 日~8 月 18 日第 2 次晒田, 10 月 13 日停灌排水, 10 月 31 日收割. 6 月 15 日施用  $10000 \text{ kg hm}^{-2}$  腐殖做为底肥, 拔节期追施无机肥  $NH_4HCO_3$   $300 \text{ kg hm}^{-2}$ , 这是目前当地较常用的一种高产种植措施. 研究中保持此基值不变, 对生长期及年际间的  $CH_4$  及  $N_2O$  排放进行模拟, 以揭示出单纯由气象要素引起的  $CH_4$  及  $N_2O$  排放规律.

### 3.1 生长期内 $CH_4$ 及 $N_2O$ 排放关系分析

保持基值背景不变, 输入苏州地区 1953~1995 历年逐日气象资料, 得到逐年生长期内  $CH_4$  及  $N_2O$  排放状况, 结果表明淹水期稻田以排放  $CH_4$  为主, 但在淹水前、晒田以及灌排交替时,  $N_2O$  排放剧增,  $CH_4$  排放和  $N_2O$  排放之间存在明显的消长关系. 为了进一步探讨两者关系, 对 1953~1995 年  $CH_4$  及  $N_2O$  排放进行平均, 结果(图 2(a))证明在平均状况下  $CH_4$  和  $N_2O$  之间也存在明显的消长关系, 图 2(b)是平均状况下生长期内  $CH_4$  及  $N_2O$  排放相关图, 生长期内  $CH_4$  和  $N_2O$  之间存在显著的负相关关系.

### 3.2 气象要素对 $CH_4$ 及 $N_2O$ 年际间排放量的影响

对 1953~1995 历年生长期气象因子以及生长期  $CH_4$  和  $N_2O$  排放量的相关分析表明: 年际间的  $CH_4$  和  $N_2O$  排放不同于生长期内的消长关系, 而是存在着一种正相关关系(图 3(a)), 气象因子中总辐射和降水量对生长期  $CH_4$  和  $N_2O$  排放总量相关均不显著, 但生长期平均气温与  $CH_4$  排放量的相关系数  $R = 0.49 (N = 43)$ , 与  $N_2O$  排放量的相关系数  $R = 0.37 (N = 43)$ , 分别通过 0.01 和 0.05 的相关显著检验. 将两者的排放量  $ET_C$  和  $ET_N$  合并为  $CH_4$  和  $N_2O$  的全球增温潜势<sup>[1]</sup>  $GWP_b = 63 \times ET_C + 270 \times ET_N$ . 图 3(b)是历年生长期平均气温与  $GWP_b$  以及各自

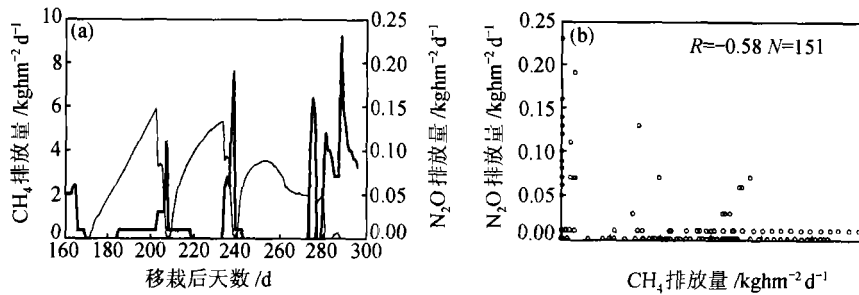


图2 水稻生长期内 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放消长关系分析

图中: 一为 CH<sub>4</sub> 排放; 一为 N<sub>2</sub>O 排放

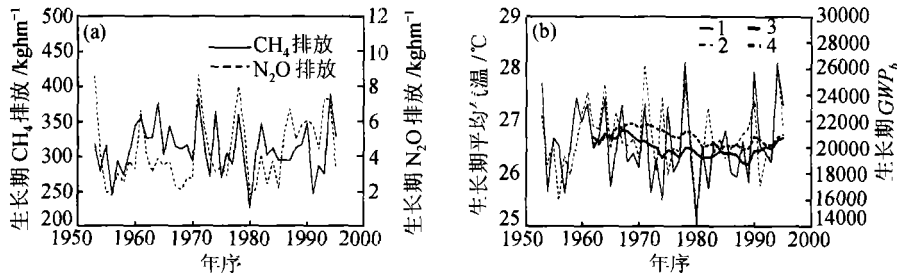


图3 气象因子对 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 排放影响的数值分析

1 示平均温度, 2 示 GWP<sub>b</sub> 值, 3 示气温滑动平均, 4 示 GWP<sub>b</sub> 滑动平均

10年滑动平均值, 它表明: 生长期平均气温与 GWP<sub>b</sub> 的变化趋势相当一致。

### 3.3 气候变化对 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 排放的影响

考虑到本研究是为长江三角洲大气-生态环境的近期变化提供一种较客观的科学预测, 因此重复利用 1953~1995 历年逐日气象资料, 用逐日温度上升  $\Delta T^{\circ}\text{C}$  的方法进行敏感分析 (图 4)。

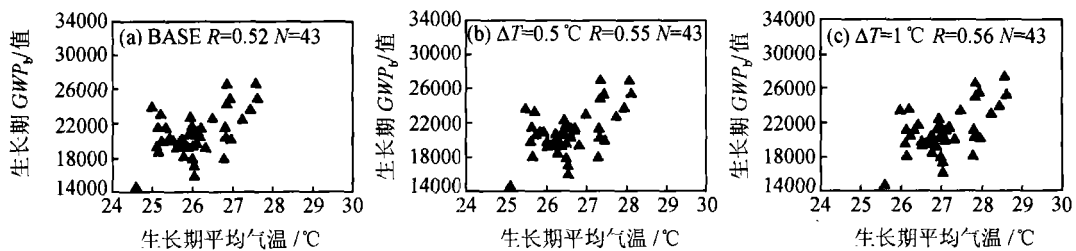


图4 温度与 GWP<sub>b</sub> 相关敏感分析

敏感分析表明: 当温度升高 0.5 $^{\circ}\text{C}$  后, GWP<sub>b</sub> 值将比目前平均增加 3.78%, 当温度升高 1 $^{\circ}\text{C}$  后, GWP<sub>b</sub> 值将比目前增加 5.66%。温度上升使 GWP<sub>b</sub> 上升, 而 GWP<sub>b</sub> 又使温度上升, 生长期温度与 GWP<sub>b</sub> 之间的相关系数不但没有降低, 反而略有增加, 表明全球变暖背景下, 温度与 GWP<sub>b</sub> 之间的正相关关系将进一步略有加强。

### 3.4 人类活动对 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 排放的影响

1949 年以后人多地少的局面日趋严重,追求高产导致肥料的大量投入,所以 1949 前后施肥量发生重大变化.在初步探明了气象条件对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放影响后,利用模型进一步揭示人类活动对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放影响十分重要.

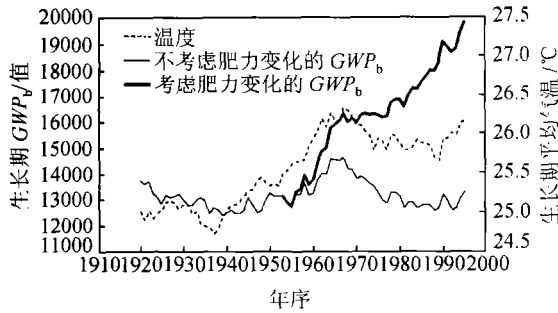


图 5 人类活动对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放影响分析

由于 1950 年前的逐日气象资料严重缺乏,而 1951~1952 年的逐日气象资料中存在大量漏记日数,因此,利用 1953~1995 年逐日气象资料反演了 1910~1952 年逐日气象资料.反演时以 1953~1995 年逐日资料为基值,依据 1910~1952 年上海年平均温度曲线<sup>[16]</sup>,若基值年的年平均气温为  $T_B$ ,反演年的年平均气温  $T_X$ ,基值年第  $i$  日的平均气温为  $T_{bi}$ ,则反演年的第  $i$  日的平均气温反演值为  $T_{xi} = T_{bi} \times T_X / T_B$ ,模拟背景分为两种,背景 A 为 1910~1995 历年背景中其他值与基值相同,但完全去除无机肥,仅施用  $3000 \text{ kg hm}^{-2}$  腐殖;背景 B 与背景 A 相同,但 1953 年开始无机肥和有机肥按线性增加,至 1995 年完全恢复基值中的无机肥和有机肥施肥量.10 年滑动平均结果(图 5)清楚显示出由于肥力的大量投入,引起 1953 年后 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的  $GWP_b$  的迅速增加,目前追求高产的大肥力投入引起的  $GWP_b$  比建国前低肥力投入引起的  $GWP_b$  值高出近一倍.

## 4 结论

建立了农田生态系统 C, N 循环生物地球化学模型,模型较好地反映了稻田 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 排放特征,数值分析表明:

(1) 在长江三角洲地区目前常规高产措施下,稻田生长期内 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放之间存在明显的消长关系,但年际间两者却表现为一种正相关关系.气象要素中总辐射和降水量与生长期 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 排放总量间相关均不显著,但是生长期平均温度与 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放同时有明显正相关,10 年滑动平均结果揭示出生长期平均气温与 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的总体增温潜势  $GWP_b$  变化趋势相当一致.

(2) 温度升高不会改变温度对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 总体排放效应的正相关关系,反而可能会导致 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 总体排放的继续增加.目前追求高产的大肥力投入引起的  $GWP_b$  比 1949 年以前低投入引起的  $GWP_b$  值高出近一倍,并且随着肥力投入,  $GWP_b$  还有进一步增加的趋势,人为因素引起的  $GWP_b$  剧增远远超过了气象因子引起的  $GWP_b$  年际波动.

**致谢** 张宇博士在美国新罕布什尔大学进行博士学位论文研究期间,在 Li Changsheng 教授指导下完成了模型前期工作,1999 年常熟 N<sub>2</sub>O 排放观测实验资料得到了国安研究员的帮助,谨此一并致以诚挚感谢.

## 参 考 文 献

- 1 IPCC. Climate Change 1994. London: Cambridge University Press, 1995. 73
- 2 熊效振, 等. 太湖流域单季稻的甲烷排放研究. 大气科学, 1999, 23(1): 9
- 3 蔡祖聪, 等. 氮肥品种对稻田 CH<sub>4</sub> 排放的影响. 土壤学报, 1995, 32(2): 136
- 4 陈冠雄, 等. 稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放及养萍和施肥的影响. 应用生态学报, 1995, 6(4): 378
- 5 侯爱新, 等. 稻田和排放关系及其微生物学和一些影响因子. 应用生态学报, 1997, 8(3): 270
- 6 Cao M, et al. Modeling methane emissions from rice paddies. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9: 193
- 7 Sigren L K, et al. Comparison of soil acetate concentrations and methane production, transport, and emission in two rice cultivars. Global Biogeochem. Cycles, 1997, 11: 1
- 8 Sigren L K, et al. Effects of field drainage on soil parameters related to methane production and emission from rice paddies. Global Biogeochem Cycles, 1997, 11: 151
- 9 Li C, et al. Simulation trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model. Geoderma, 1997, 81: 45
- 10 Parton W J, et al. Rates and pathways of nitrous oxide production in a short grass steppe. Biogeochemistry, 1988, 6: 45
- 11 Li C, et al. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. J of Geophys Res, 1992, 97: 9759
- 12 Potter C S, et al. Process modeling of controls on nitrogen trace gas emissions from soil world-wide. J of Geophys Res, 1996, 101: 1361
- 13 Williams J P, et al. A model for diurnal variation in soil and air temperature. Agricultural Meteorology, 1981, 23: 205
- 14 Goudriaan J. A simple and fast numerical method for commutation of daily totals of crop photosynthesis. Agri Forest Meteorol, 1986, 38: 249
- 15 Li C, et al. Modeling carbon biochemistry in agricultural soils. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8: 237
- 16 叶笃正, 等主编. 中国的全球气候变化预研究. 北京: 地震出版社, 1992. 31