

华东地区稻麦轮作农田生态系统 N_2O 排放的模拟研究*

勾 继 郑循华 王明星

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

李长生

(美国新罕布什尔大学, NH 03824, USA)

摘 要 利用 DNDC (DeNitrification and DeComposition) 模式, 对华东地区典型稻麦轮作农田生态系统的 N_2O 排放特征进行了模拟研究。结果表明: 该模式能模拟出轮作周期中 N_2O 的主要排放峰值和排放趋势, 但与实测值相比, 模拟结果普遍有些偏小。相对而言, 该模式对旱地阶段的模拟结果比较理想, 尤其是对春季小麦返青至成熟期的模拟最好。因此, 我们就该阶段影响 N_2O 排放的主要因子进行了敏感性研究。结果指出, 对这一阶段 N_2O 排放影响最大的是化肥的施用, 其他比较重要的影响因子还包括犁地方式、有机肥、降水量、降水中的 N 含量以及温度等。

关键词: N_2O 排放; 模式模拟; 敏感因子; 农业生态系统

1 引言

工业化以来, 大气 N_2O 浓度增长了大约 15%^[1]。尤其是最近 40 多年来呈急剧上升趋势, 年平均增长率达到了 0.2%~0.3%^[1]。以现在的增长速度, 到 2050 年, 大气 N_2O 的体积分数将达到 $350 \times 10^{-9} \sim 400 \times 10^{-9}$ [2]。 N_2O 在大气中对环境和气候的影响表现在两方面: (1) 对流层大气 N_2O 吸收地面长波辐射, 其浓度增加直接导致温室效应增强; (2) 平流层中 N_2O 影响臭氧的光化学过程^[3]。土壤微生物过程代表着大气 N_2O 最大的源^[4,5], 土壤排放在大气 N_2O 源汇收支平衡中起主导作用^[6]。因此, 对土壤源的深入研究显得非常重要。本研究利用 6.7 版的 DNDC (DeNitrification and DeComposition) 模式^[7], 对华东太湖地区典型稻麦轮作农田生态系统的 N_2O 排放及影响因素进行模拟研究, 以期深入了解 N_2O 的排放机制。

2 DNDC 模式简介

DNDC 以反硝化作用和分解作用为主要过程, 是一个关于农业生态系统土壤碳、

1998-10-30 收到, 1999-08-08 收到修改稿

* 本研究得到 973 预选项目 PD9522、国家自然科学基金资助项目 49675270 和 49975027 以及大气边界层物理和大气化学国家重点实验室的共同支持

氮生物地球化学循环的数值模式^[8]。模式以土壤性质、气候状况和农业生产措施为输入信息,可模拟农业生态系统中 N_2O 、 NO 、 N_2 、 CO_2 、 NH_3 和 CH_4 等气体的产生与排放。该模式包括土壤气候、分解作用、反硝化作用和植物生长 4 个子模式。

土壤气候子模式是一个一维的土壤热量和水分传输模式,利用土壤的物理特性和逐日的气温、降水资料来计算每小时和每天的土壤平均温、湿度的分布状况,以用于其他 3 个子模式。分解作用子模式以 1 d 为时间步长,计算逐日的分解作用、硝化作用、氮挥发以及 CO_2 的产生等过程,当土壤湿度超过 40% WFPS (Water-Filled Pore Space) 时,模式启动反硝化过程,计算每小时的反硝化速率和 N_2O 、 N_2 的产生速率。植物生长子模式模拟植被每天对水分和氮素的吸收、根的呼吸作用、植物的生长以及被分配到植物根、茎、叶和果实中的生物量,以最理想产量及其占生物量的比重作为输入参数。在 DNDC 中,这 4 个子模式相互影响,共同决定着 1 d 或 1 h 时间步长内 N_2 和 N_2O 的排放。在降雨过程中或在降雨事件发生后的一定时间内,反硝化作用的时间步长为 1 h。

3 生态系统的特征及模式的输入数据

本文的研究对象是位于太湖流域的江苏省稻麦轮作农业生态系统。耕层土壤为粘壤土,粘粒含量为 47%,有机质、全氮 (N)、全磷 (P_2O_5) 和全钾 (K_2O) 的含量分别为 34.93、1.88、1.15 和 13.4 $g \cdot kg^{-1}$, pH 值为 6.5。年降水量 1 080 mm, 4~5 月 (春雨)、6~7 月 (梅雨) 和 9 月 (秋雨) 是 3 个明显的雨季。月平均最高气温 28.5 $^{\circ}C$,最低气温 2.9 $^{\circ}C$,属亚热带季风性气候。典型的耕作方式为水稻与旱地作物 (小麦或油菜) 轮作,周期 1 年。常规水肥管理方式为有机堆肥 (经堆腐半年左右的麦秸或稻草) 与尿素、 NH_4HCO_3 或三元复合肥 (N: P_2O_5 : K_2O = 12%:6%:7%) 等化学肥料配合施用,水稻生长期多次排水晒田。用于模拟的输入数据如表 1 所示。

表 1 输入数据资料

类 型	输 入 数 据
地理状况	江苏吴县: 31°16'N, 120°38'E; 土地利用类型: 农业用地
气候	1996、1997 年气象数据 (逐日降水量和最高、最低气温); 降水中的 N 浓度 ($mg \cdot L^{-1}$): 1.5
土壤性质	质地: 粘壤土; 容重: 1.15 $g \cdot cm^{-3}$; 粘粒含量: 0.47 (<0.005 mm); pH 值: 6.5; 初始耕层土壤有机 C 含量: 0.0203 $kg \cdot kg^{-1}$
农业生产措施	轮作情况: 稻麦轮作, 周期 1 年; 作物残茬还田率: 10%; 最佳产量 (子粒干重 $kg \cdot ha^{-1}$): 水稻 7500、小麦 3750; 播种/移栽和收获日期: 小麦: 11-01~05-27、水稻: 06-18~10-27; 犁地: 2 次, 第 1 次: 06-15, 深度: 20 cm, 第 2 次: 11-01, 深度: 10 cm; 施肥: 化肥, 尿素 (以 N 计) 382 $kg \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ 、有机肥 (以 C 计) 4930 $kg \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$; 灌溉: 1 次: 06-13~06-16, 水深: 4.3 cm; 淹水: 5 次, 第 1 次: 06-17~07-23, 第 2 次: 07-28~08-12, 第 3 次: 08-24~09-11, 第 4 次: 09-18~09-25, 第 5 次: 09-27~10-02

4 模拟结果和分析

4.1 模拟值与实测值的对比分析

利用 DNDC 模式对华东地区典型稻麦轮作农田生态系统在 1 个轮作周期内 (1996-11-01~1997-10-31) N₂O 的排放情况进行了模拟, 结果如图 1 所示。可以看出, 模式基本上模拟出了 1 年中主要的 N₂O 排放峰值和排放趋势, 但模拟值与实测值相比普遍有些偏低, 这说明模式已经能反映 N₂O 产生与排放的关键过程, 但还不够细致。在小麦生长阶段 (从 11 月至翌年 5 月), N₂O 的排放主要是降雨和施肥造成的, 模拟结果能够反映出几次 N₂O 的显著排放过程, 如前期 (11 月)、中期 (3、4 月) 以及后期 (5 月) 的一系列峰值。在水稻生长期 (6~10 月), N₂O 的排放则是土壤的干湿交替过程和施肥共同作用的结果, 模拟结果虽然给出了由灌排交替造成的一系列排放峰, 但未能反映出淹水阶段由施氮肥引起的 N₂O 显著排放。

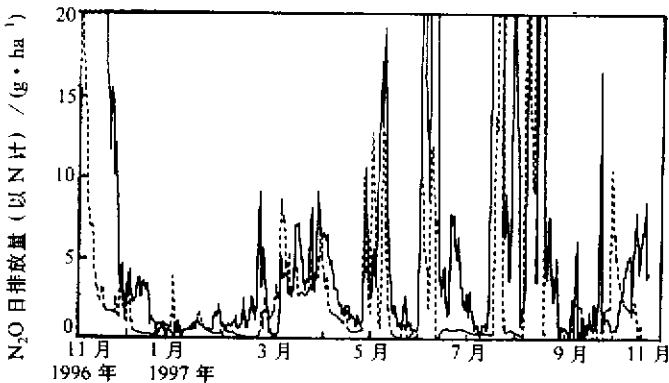


图 1 在 1 个稻麦轮作周期内, N₂O 排放量的模拟值与实测值的比较
——: 观测值;: 模拟值

为了更细致地了解模式对农业生产各个阶段的模拟效果, 将各阶段 N₂O 排放的模拟值 (分为硝化过程排放量、反硝化过程排放量及总排放量) 与实测值列表对比 (表 2), 并进行分析。小麦生长前期 (11、12 月), 实测值比模拟值高 3~4 倍, 且硝化过程排放量比反硝化过程排放量大 2~3 倍, 说明硝化作用是这一阶段产生 N₂O 的主要过程。模拟的 N₂O 排放总量显著低于实测值的原因, 很可能是模式低估了反硝化作用的

表 2 农作物生长各个阶段 N₂O 排放量的模拟值与实测值比较 (单位: g · ha⁻¹, 以 N 计)

项目 \ 阶段		小麦				水稻		轮作周期排放总量
		前期	越冬期	返青成熟期	后期	淹水期	排水期	
模拟	反硝化	56.2	23.5	109.9	90.3	92.6	361.5	733.9
	硝化	182.0	50.5	199.5	6.9	16.0	66.4	521.4
	总量	238.2	74.0	309.4	97.2	108.6	427.9	1255.3
实测	总量	1121.0	81.9	330.8	1191.0	1135.0	1859.9	5919.5
实测 / 模拟 (总量)		4.7	1.11	1.10	12.3	12.3	4.4	4.7

N_2O 排放量。经水田阶段长期浸泡所产生的粘粒分散作用,使小麦生长前期的土壤结构比其他旱地阶段致密得多,土壤的透气性较差,因而,反硝化作用可能比其他未实行灌溉的旱地阶段显得更为重要。而 6.7 版本的 DNDC 模式将土壤当作一个结构没有季节性变化的系统来处理,这就很可能低估了该阶段的反硝化 N_2O 排放量。小麦返青至成熟期(3月~5月中旬)的模拟效果最好,模拟的 N_2O 排放总量仅比实测值偏低 10%。在这一阶段,通过硝化作用排放的 N_2O 约为反硝化作用排放量的 2 倍。这是因为春季麦田土壤的通气状况较好,硝化作用过程旺盛,而反硝化作用则受到一定程度的抑制。实验中观测到这一阶段土壤中 NO_3^- 的相对积累^[9]也正说明了这一点。小麦越冬期(1、2月)的情形与返青成熟期类似, N_2O 的排放以硝化作用为主,模拟效果也较理想。不过,由于这一阶段的温度较低, N_2O 的排放量也相对较少。小麦生长后期和水田阶段(5月中旬~10月)的特点是反硝化作用的 N_2O 模拟排放量比硝化作用的模拟排放量高若干倍。主要原因是,这一阶段的 N_2O 排放主要来自旱地灌溉,大量降水和水田的多次灌水、排水晒田等剧烈干湿交替过程引起的爆发式排放。在这些过程中,土壤湿度较大,反硝化作用占据了主导地位。在该阶段中,实测的 N_2O 排放总量为模拟值的 12 倍,这说明 6.7 版 DNDC 模式对剧烈干湿交替情况下 N_2O 排放的模拟还存在比较严重的问题,模式本身有待于进一步改进。

以上对比分析结果说明,6.7 版 DNDC 对春季麦田 N_2O 排放的模拟结果比较理想,但对于其他阶段,尽管模式能够模拟出 N_2O 排放的变化趋势,但模拟排放量的绝对数值仍不可靠。6.7 版 DNDC 模式较多地经受了旱地 N_2O 排放田间测量结果的检验,所以该模式对旱地的模拟远比水田要好得多。因此,我们选取了旱地阶段中模拟最好的阶段,即春季小麦返青至成熟期,进行统计分析,以定量了解模拟结果的可信程度。该阶段从 3 月初到 5 月中,共计 76 天,删除了其中的 6 个奇异点,共保留了 70 个数据点,并用其进行该阶段 N_2O 排放量的模拟值与实测值的对比分析,并作散点图及拟合曲线(图 2)。分析结果给出,模拟值与实测值呈显著正相关,相关系数为 0.63 ($P < 0.001$)。可见,这一阶段的模拟结果是十分可靠的。

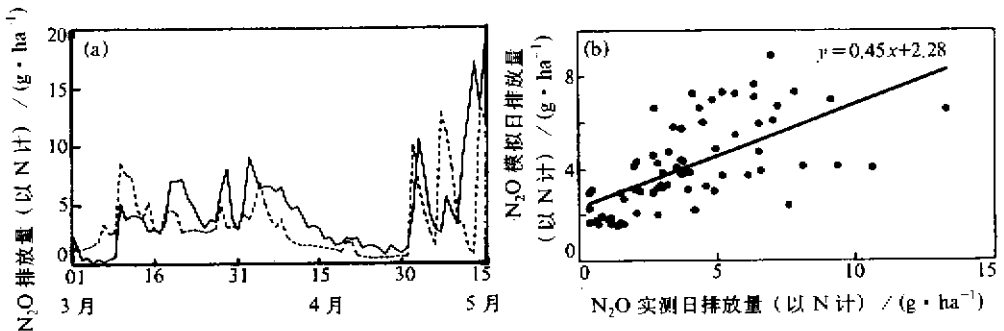


图 2 春季小麦返青至成熟期 N_2O 排放的模拟值与实测值的比较与检验
(a) 模拟值与实测值的对比; (b) 模拟值与实测值的散点图和拟合曲线

——: 观测值;: 模拟值

4.2 敏感性实验

以上的检验结果表明,6.7 版 DNDC 模式能较好地模拟旱地阶段,尤其是小麦返

青至成熟期的 N_2O 排放。以下将通过敏感性实验来揭示影响这一时期 N_2O 排放的主要因素。进行敏感性实验的因子包括降水、温度、犁地以及化肥和有机肥的施用, 对每个因子的模拟实验结果如图 3 所示。

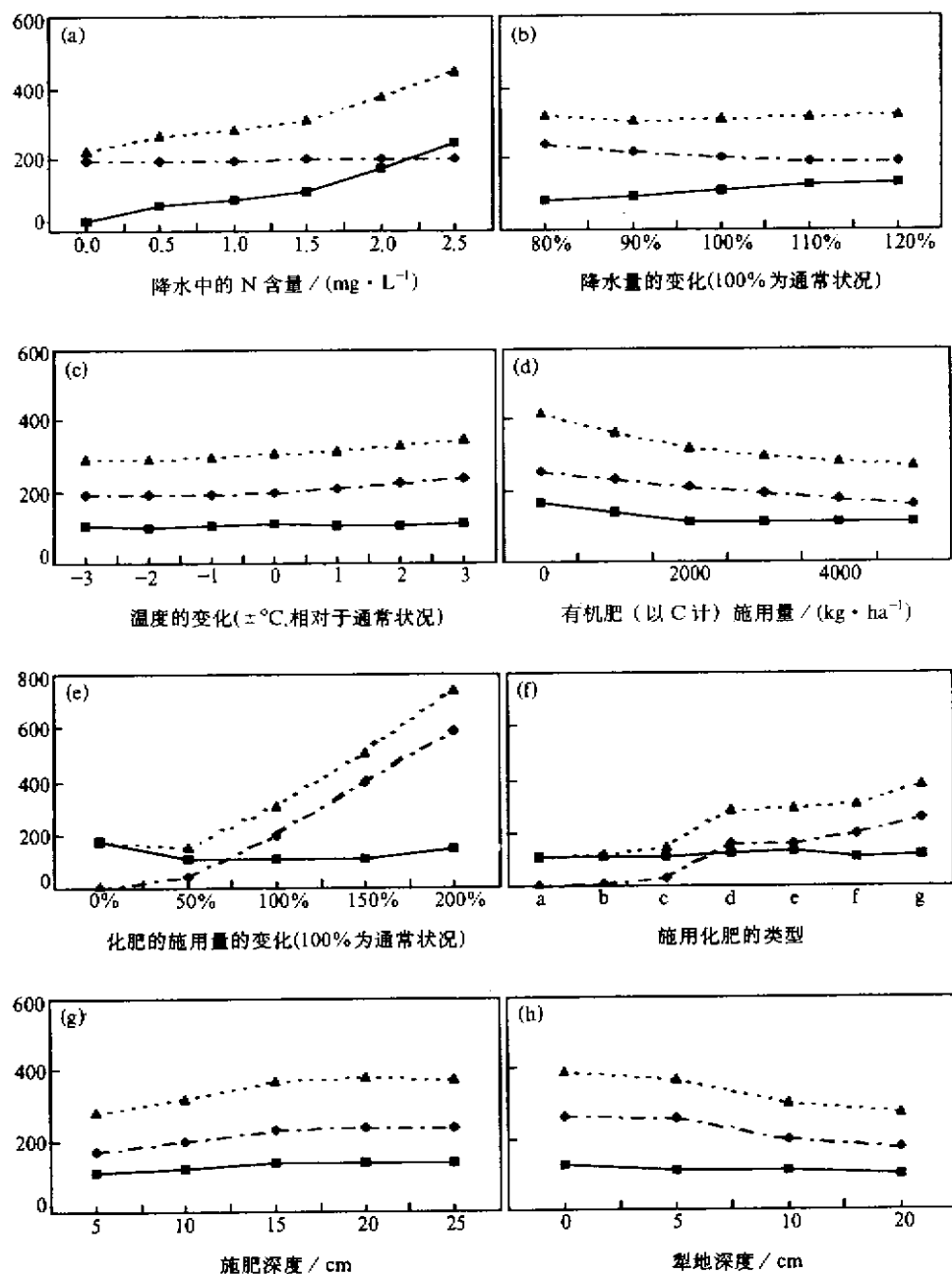
降水 降水影响 N_2O 排放的主要因素包括降水中的氮素含量和降水量。如图 3a 所示, 在降雨量一定的前提下, 随着降水中 N 含量的增加, 来自反硝化作用的 N_2O 排放量和总 N_2O 排放量都呈增长趋势, 而硝化作用排放的 N_2O 却基本不变。这是由于随着降水进入到土壤中的氮素主要以硝酸盐形态存在, 降水中氮素含量的增加实际上是增加了土壤中反硝化作用的反应底物, 从而促进了反硝化作用, 而对硝化作用没有明显的影响。随着降水量的增加, 硝化作用的 N_2O 产量不断减少, 反硝化作用产生的 N_2O 持续增长, 而总的 N_2O 排放量却变化不大 (见图 3b)。这是由于降水量增加使土壤湿度加大, 促进反硝化作用而抑制了硝化作用的缘故。

温度 如图 3c 所示, 随着温度的增加, 反硝化作用产生的 N_2O 量变化不大, 而硝化作用产生的 N_2O 量却持续增长, N_2O 的排放总量也有所增加。这一点不难理解, 由于温度的升高, 土壤中微生物的活性增加, 各种生物化学反应的速度也持续增长, 这就促进了硝化作用, 加大了该过程中 N_2O 的产生和排放^[10]; 另外, 由于春季麦田土壤的通气状况较好, 反硝化作用受到一定程度的抑制, 所以, 反硝化作用产生的 N_2O 一直处于较低水平, 变化不大。

有机肥 随着有机肥施用量的增加, 硝化作用、反硝化作用的 N_2O 产量都不断减少 (图 3d)。这一现象可以解释为: 土壤有机质的大量分解会消耗土壤中的 O_2 , 从而抑制了硝化作用, 减少了 N_2O 的硝化作用产量; 另外, 由于土壤中氧气的损耗, 也可能使土壤中的 N_2O 气体被作为替代 O_2 的电子受体而还原成为 N_2 , 从而抑制了 N_2O 的排放。实验室内添加有机质的模拟培养实验结果已初步证明了这一点^[11]。

化肥 化肥用量、化肥类型和施肥深度都影响着土壤 N_2O 的排放。随着化肥 (这里指尿素) 用量的增加, N_2O 的硝化过程排放量和总排放量急剧上升, 而反硝化过程排放量则变化不大 (图 3e)。这是因为施用尿素仅直接增加了硝化作用反应底物浓度。不同类型的化肥, 由于其所含的 N 素形态不同, 对于 N_2O 排放的影响也显著不同 (图 3f)。其中, 铵态氮肥和尿素的 N_2O 排放量较大, 而硝态氮肥则相对较少。对此, 可作出如下解释: 春季麦田土壤的通气状况较好, 硝化作用过程占据主导地位, 而反硝化作用则受到一定程度的抑制。铵态氮肥和尿素为硝化作用提供了充足的反应底物, 从而促进了 N_2O 的排放, 但其中的氨水和碳酸氢铵较易挥发损失, 因此, 它们产生的 N_2O 量也不大。在这一时期, 反硝化作用受到抑制, 因而即使施用硝态氮肥, 也不会激发大量的 N_2O 排放。施肥深度对 N_2O 排放量的影响如图 3g 所示, 化肥表施 (在模式中处理为 5 cm) 时, N_2O 的排放量最小, 随着施肥深度的增加, N_2O 的排放量不断增加, 这可能是由于施肥深度增加有利于减少肥料的损失, 可持续地提供硝化作用和反硝化作用所需的氮素。

犁地 如图 3h 所示, 犁地深度增加抑制了硝化作用和反硝化作用的 N_2O 产量, 从而使 N_2O 的排放总量减少。原因可以解释为: 深耕改善了深层土壤的通气状况, 一方面抑制了反硝化作用; 另一方面, 深耕虽然有利于硝化作用的彻底进行, 但却不利于硝化作用中间产物 N_2O 的形成^[11]。

图3 N_2O 排放的敏感性实验

(a) 至 (h) 分别表示 N_2O 排放对一种因素的敏感性, 纵坐标为 N_2O 排放量 (以 N 计), 单位: $g \cdot ha^{-1}$.

(a) 降水中的 N 含量; (b) 降水量; (c) 温度; (d) 有机肥用量; (e) 化肥用量;

(f) 化肥类型, 横坐标字母分别代表: a: 硝态氮肥, b: 碳酸氢铵, c: 氨水,

d: 硫酸铵, e: 磷酸铵, f: 尿素, g: 硝酸铵; (g) 施肥深度;

(h) 犁地深度对 N_2O 排放量的影响

—■—: 反硝化, —●—: 硝化, ...▲...: N_2O 总量

4.3 讨论

以上研究结果表明, 虽然 6.7 版 DNDC 模式的模拟结果有些偏低, 但能够很好地反映出本地区农田土壤 N_2O 的总体排放趋势。在目前关于 N_2O 排放的模式中, 模拟结果能够达到这种程度的并不多见。该模式在美国主要用于模拟旱地的 N_2O 排放。虽然也用于模拟水稻田的 N_2O 排放, 但由于模式中对水田条件及强烈干湿交替过程的处理过于简化, 实际上这种简化处理的结果是使模式难以反映真实情况。因而, 该版本的 DNDC 模式尚不能对水田或干湿交替频繁发生的旱地的 N_2O 排放进行有些模拟。另外, 由于当前的实测资料有限, 我们还不能对模式进行长期模拟效果的检验。因此, 我们对于该模式的检验还是很全面的, 还需要对该模式进行改进完善和进一步检验研究。

5 结论

综上所述, DNDC 模式能够较好地模拟出本地区农田生态系统的 N_2O 排放趋势, 尤其是对春季麦田土壤 N_2O 排放的模拟效果十分理想, 这说明该模式已经抓住了实质性的 N_2O 排放关键过程。但模拟值普遍比观测值偏低, 说明该模式还有待于进一步完善。从敏感性实验的结果来看, 影响本地区春季麦田 N_2O 排放的主要因子是化肥的施用 (包括化肥的用量、类型和施肥深度), 其次是犁地方式、有机肥的施用量、温度、降水量和降水中的氮含量。

参 考 文 献

- 1 IPCC, Climate Change, Summary for Policymakers, the Science of Climate Change, in: IPCC Second Assessment Report, 1995, 21~24.
- 2 Bolin, B., J. Jager and B. R. Doos, The greenhouse effect, climatic change and ecosystem, A Synthesis of present knowledge, In: The greenhouse effect, climatic change and ecosystems (ed. B. Bolin et al.), SCOPE 29, John Wiley & Sons, New York, 1986, 1~32.
- 3 王明星, 大气化学 (第二版), 北京: 气象出版社, 1999, 99~150.
- 4 Prinn, R., D. Cunnold and R. Rasmussen et al., Atmospheric emissions and trends of nitrous oxide deduced from ten years of ALE-GAGE data, *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**, 18369~18385.
- 5 Rasmussen, R. A. and M. A. K. Khalil, Atmospheric trace gases: trends and distributions over the last decade, *Science*, 1986, **232**, 1623~1624.
- 6 IPCC, 1992, IPCC Supplement, Full Scientific Report, Working Group 1: Scientific Assessment of Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO / UNEP.
- 7 Li, C., S. Frohling and T. A., Frohling, A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events, I. Model structure and sensitivity, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 9759~9776.
- 8 郑循华, 王明星, 王跃思等, 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N_2O 产生与排放的影响, *应用生态学报*, 1996, **7**(3), 213~219.
- 9 郑循华, 王明星, 王跃思等, 华东稻麦轮作生态系统 N_2O 排放过程研究, *应用生态学报*, 1997, **8**(5), 495~499.
- 10 郑循华, 王明星, 王跃思等, 温度对农田 N_2O 产生与排放过程的影响, *环境科学*, 1997, **18**(5), 1~5.
- 11 郑循华, 农田 N_2O 产生与排放过程研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1996, 91~95.

A Simulating Study of N_2O Emission from a Rice–Wheat Rotation Ecosystem in Southeast China

Gou Ji, Zheng Xunhua and Wang Mingxing

*(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)*

Li Changsheng

(New Hampshire University, Durham NH 03824, USA)

Abstract DNDC model is applied to simulate the nitrous oxide emissions from a rice–wheat rotation ecosystem in Southeast China. The result shows that the model is able to simulate most of the N_2O emission pulses and trends. Although the simulated N_2O emission fluxes are generally smaller than the measured ones, the model outputs during the dry land periods, especially during the wheat reviving and maturing stages in spring, are much better than those in other periods. Some sensitive experiments were made via simulating the N_2O emissions in spring, when there is a smallest gap between the simulated fluxes and the measured ones. We can draw a conclusion from the results that fertilization is the most important regulating factor while the N_2O emission is sensitive to some other factors such as temperature, precipitation, manure, tillage and the wet deposition of atmospheric nitrate.

Key words: N_2O emission; model simulating; sensitive factors; agricultural ecosystem