

# DNDC 模型对北京旱地农田 N<sub>2</sub>O 排放的模拟对比分析

谢军飞, 李玉娥

(中国农业科学院农业气象研究所, 北京 100081)

**摘要:**通过 DNDC (Version 77)模型和田间原位观测,对北京地区大豆农田的 N<sub>2</sub>O 排放特征进行了模拟与对比分析。结果表明, DNDC 模型能较好地模拟田间实测到的大豆生长期内 N<sub>2</sub>O 排放通量、气温和土壤地表温度的变化和 N<sub>2</sub>O 排放对每日降水的响应。但模型还存在一些问题:对于干旱期和非农业活动期农田的 N<sub>2</sub>O 排放反应灵敏度不够,模型低估了干旱期和非农业活动期农田的 N<sub>2</sub>O 排放通量。总的来说,在以生长期为时间尺度的计算上,模拟和实测值总量相差不大,在将来北京地区旱地农田 N<sub>2</sub>O 排放量估算上有很强的应用价值。为了进一步确定影响大豆生长期内 N<sub>2</sub>O 排放的主要因子,本文还进行了敏感性实验分析。结果表明,在一定范围内,在其他条件不变的情况下, N<sub>2</sub>O - N 排放模拟值对土壤初始表面有机碳含量的变化较为敏感,随着土壤初始表面有机碳含量的增加, N<sub>2</sub>O - N 排放模拟值也随着线性增加;另外, N<sub>2</sub>O - N 排放模拟值对降雨中 N 素的含量变化也较为敏感,随着降雨中 N 素的含量的升高, N<sub>2</sub>O - N 排放模拟值也随着非线性增加。

**关键词:**DNDC 模型; 旱地农田; N<sub>2</sub>O 排放; 北京地区

**中图分类号:**X16 **文献标识码:**A **文章编号:**1672 - 2043(2004)04 - 0691 - 05

## Comparative Analysis on Measured and DNDC (DeNitrification - DeComposition) Modeled N<sub>2</sub>O Emissions from Upland Farm in Beijing

XIE Jun-fei, LI Yu-e

(Agricultural Meteorology Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The present paper deals with simulation and contrastive analysis on N<sub>2</sub>O emission characters from soybeans farm in Beijing through DNDC (version 77) model and a farm automatic sampling system. The results showed that DNDC model was well applied to simulate the N<sub>2</sub>O emission flux, air temperature and soil surface temperature changes from soybean growth period from the farm. The response of N<sub>2</sub>O emission flux to daily precipitation; but there were some problems that the response sensitivity was not enough about N<sub>2</sub>O emission simulation value to dry land period and non - agriculture activities. N<sub>2</sub>O emission flux during drought and non - agriculture activities periods was lower than estimated by the DNDC. However, during the time scaling for growth, there was small gap between the simulated N<sub>2</sub>O emission fluxes and measured ones. This meant that the model can be well applied to estimate upland farm N<sub>2</sub>O emission fluxes in the future. In order to confirm primary factors affecting N<sub>2</sub>O emission during soybeans growth term, the analysis for sensitivity experiment were made under some ranges when which others conditions were kept invariability. The results showed that N<sub>2</sub>O - N emission simulation value was more sensitivity than change of soil surface organic C content, with increasing of soil surface organic C content, N<sub>2</sub>O - N emission simulation value increase with linearity. In addition, N<sub>2</sub>O - N emission simulation value also was more sensitivity to change of N content in rainfall, while with increasing of N content in rainfall period, N<sub>2</sub>O - N emission simulation value increased with non - linearity.

**Keywords:** DNDC model; upland farm; N<sub>2</sub>O emission

收稿日期: 2004 - 01 - 02

基金项目: 国家“973 计划”项目: 气候公约谈判和履约对策的综合基础研究资助(2002CB412508)

作者简介: 谢军飞(1976-), 男, 硕士生。E-mail: xiejunfei@sohu.com

大气中 N<sub>2</sub>O 作为主要的大气微量化学成分,虽然在大气中的含量很低,1998 年仅为 314 μL·m<sup>-3</sup>(表示十亿分之一体积混合比)左右 [IPCC, 2001],但却是重要的温室气体,目前还正以一定的速度在增长。研究表明,N<sub>2</sub>O 对全球温室效应的贡献为 6% [IPCC, 2001]。

旱地农田生态系统作为大气中 N<sub>2</sub>O 的重要源,研究其 N<sub>2</sub>O 的排放总量,有助于准确了解未来大气中 N<sub>2</sub>O 浓度的变化趋势。然而由于受气候、土壤类型和农业活动的影响,其 N<sub>2</sub>O 排放存在高度的时空变化,仅根据少量的田间点位观测还远不能估算区域旱地土壤 N<sub>2</sub>O 排放量,建立和运用模型是非常有必要的。

目前,可以用来估算 N<sub>2</sub>O 排放的模型还有限,如 DNDC(小尺度过程模式) [Li et al., 1992a, b, 2000]、CASA(大尺度经验模式) [Potter et al., 1996]、Hole-in-the-Pipe(小尺度概念模型) [Firestone and Davidson, 1989]、NGAS(半经验模型) [Parton et al., 1996]。在这些模型中,惟有 DNDC 模型是针对农业土壤痕量气体排放估算开发的小尺度过程模型。该模型既可以对某一试验点的 N<sub>2</sub>O 排放通量进行点位模拟,也可以估算区域的排放。一些试验数据已经证明 DNDC 模型能够较好地模拟一些不同农业土壤中 N<sub>2</sub>O 的排放状况 [勾继等, 2000; 王效科等, 2001; 徐文彬等, 2002]。但必须注意到,该模型是建立在美国的自然生长条件下由美国 New-Hampshire 大学研制而成的。在我国,近年来主要集中在南方稻麦农田的 N<sub>2</sub>O 排放模拟上 [勾继等, 2000; 王效科等, 2001; 徐文彬等, 2002], 然而,关于北京地区旱地农田的 N<sub>2</sub>O 模拟还尚不多见,其模型有待进一步验证。

在获得大豆田间 N<sub>2</sub>O 排放原位观测数据的基础上,本文选用 DNDC 模型 (Version 77) 来模拟田间 N<sub>2</sub>O 的排放,并对模拟与实测值进行了对比分析,以了解 DNDC 模型在北京地区应用的可行性和存在的主要问题。

## 1 研究方法

### 1.1 大豆田间 N<sub>2</sub>O 排放通量原位观测

大豆田间的 N<sub>2</sub>O 排放通量原位观测设在中国农业科学院作物所昌平实验站 (北纬 40°13', 东经 116°14')。该实验站属于季风型大陆性气候,夏季多雨,春秋干旱,冬季寒冷干燥是该地区的气候特点。其试验地土壤为褐潮土,其中 0~20 cm 土层为轻壤土。在开始试验的同时对主要农化性状进行了测定:有机质含

量为 1.63%、全氮 (N) 为 0.354%、全磷 (P) 为 0.012%、全钾 (K) 为 0.025%、土壤 pH 值为 6.88、土壤容重为 1.54(g·cm<sup>-3</sup>)。这种自然和农业条件在北京地区有很强的代表性。

从 2002 年 7 月到 10 月,排放通量的原位观测试验在大豆田内的 9 个小区 (10 m×4 m) 上进行,在试验中采用自动观测系统对每个小区的 N<sub>2</sub>O 排放通量进行自动连续采样,每个小区进行 6 次·d<sup>-1</sup> 采样,从 6:00—24:00 点,每次耗时 3 h,其运行的基本原理是:从置于田间的密闭静态气体采样箱 (长宽均为 70 cm,高为 140 cm) 自动抽取空气样品,然后传输到美国惠普 (HP) 公司的 GC-5890 II 气相色谱仪中分析 N<sub>2</sub>O 浓度。田间土壤温度数据是在每一个采样箱附近的土壤 5、10 cm 土层深度安装热敏电阻温度探头获得。日气温、日降雨量通过附近的自动气象站观测得到。

### 1.2 DNDC 模型的模拟

DNDC 模型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、氮生物地球化学循环的数值模型。该模型包括土壤气候、分解作用、反硝化作用和植物生长 4 个子模式。该模型的主要理论假设包括:土壤排放 N<sub>2</sub>O 表现为产生一系列 N<sub>2</sub>O 排放峰的过程;微生物的反硝化作用过程是土壤 N<sub>2</sub>O 的主要生成过程;降雨、灌溉和农业活动是产生 N<sub>2</sub>O 排放峰的直接驱动因子;土壤湿度变化控制着反硝化作用和硝化分解作用的发生与否 [Li et al., 1992 年]。

该模型以土壤性质、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<sub>2</sub>O 等气体的产生与排放,还可以输出每日土壤及植物体中的 C、N 含量、土壤不同层次的温湿度数据以及排放到大气中的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 及 N<sub>2</sub> 气体量等相关项目。DNDC 模型的数据输入项目见表 1 [Li et al., 1992 年]。

## 2 结果与分析

### 2.1 DNDC 模型对旱田 N<sub>2</sub>O 排放的模拟及与实测资料的对比分析

在一个生长期,本文利用 DNDC 77 模型对北京旱地农田 N<sub>2</sub>O 的排放通量进行了模拟,并与同期实测值进行了对比,其结果如图 1 所示。

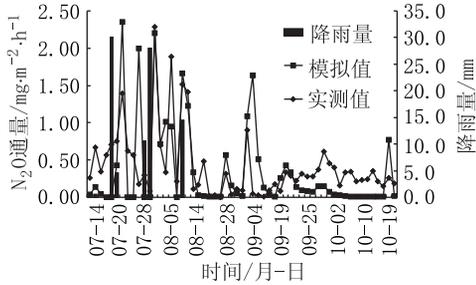
从图 1 中可以看出,田间实测到的 N<sub>2</sub>O 排放峰主要受降雨事件和施肥的影响。模型模拟结果基本上捕捉到田间实测到的强降雨和 9 月 18 日施肥后首次引

表 1 DNDC 模型的数据输入项目

Table 1 Input items data for the DNDC model utilized in the present study

因子	项目
地理状况*	试验地的经纬度
气候条件**	日最高、最低气温和日降水量
土壤状况***	容重、质地和粘粒含量、有机质和 pH
农业管理措施*	土地利用类型、作物产量、作物物候(播种期和收获期)、肥料使用量(无机肥和有机肥)、施肥时间(有机肥和无机肥)、耕地(时间和方式)、灌溉(时间、水量和 pH)、淹水(始末时间)和锄草(时间和方式)

注: \*实验站人员提供; \*\*实验站自动气象站获得; \*\*\*实验室分析获得。

图 1 大豆生长期内 N<sub>2</sub>O 排放通量模拟值与实测值对比Figure 1 Comparison of the simulated and measured data for N<sub>2</sub>O emission flux during the growth of soybeans

发的较大 N<sub>2</sub>O 排放峰, 两者在主要 N<sub>2</sub>O 排放峰的峰值和出现时间上较为接近, 模型较好地拟合了田间 N<sub>2</sub>O 排放通量的生长期变化。

为进一步说明模型的拟合效果, 本文对相关数据进行了分析: 在 N<sub>2</sub>O 排放通量生长期变化上, DNDC 模型的模拟值与田间实测值的皮尔逊(Pearson's)相关系数为: 0.574 ( $n = 57$ ), 经相关系数显著性  $T$  检验,  $P < 0.01$ , 相关性显著, 这表明模型模拟值与田间实测值具有相似的 N<sub>2</sub>O 排放通量生长期变化趋势。其统计描述还显示, 整个大豆生长期内实测的日均 N<sub>2</sub>O 排放通量值为  $0.4158 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 而模拟的日均 N<sub>2</sub>O 排放通量值为  $0.377 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 两者比较接近。

总的来说, DNDC 模型基本上正确地模拟了大豆生长期内所观测到的 N<sub>2</sub>O 排放变化规律和 N<sub>2</sub>O 排放对每日降水的响应, 但在数据分析中也发现了模型还存在一些问题: 模型低估了干旱期和非农业活动期农田的 N<sub>2</sub>O 排放通量。DNDC 模型认为农田排放 N<sub>2</sub>O 在时间上是不连续的, 其排放过程受降雨和农业活动所驱动, 表现为一些系列 N<sub>2</sub>O 脉冲排放峰 [Li et al., 1992a]。因此, 模型能较好地捕捉温带地区降雨和农业活动引发的农田 N<sub>2</sub>O 排放峰的峰值和位置, 但对于干旱期和非农业活动期农田的 N<sub>2</sub>O 排放反应灵敏度不够。虽然明显低估了非排放峰区的农田 N<sub>2</sub>O 排放通量, 但由于模型模拟的 N<sub>2</sub>O 排放峰值比对应的实测值普遍要高, 在以生长期为时间尺度的计算上, 模拟和

实测值总量相差不大。

## 2.2 DNDC 模型对气温和土壤温度的模拟及与实测值的对比分析

DNDC 模型不仅可以较好地模拟旱地农田大豆 N<sub>2</sub>O 排放通量的生长期变化, 同时还能很好地模拟影响 N<sub>2</sub>O 排放的日平均气温和土壤日平均地表温度的变化, 见图 2、图 3。

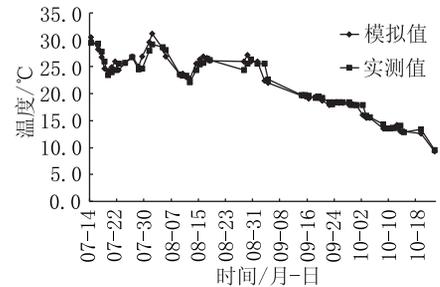


图 2 大豆生长期内日平均气温模拟值与实测值对比

Figure 2 Comparison of the simulated and measured data for averaged daily ambient temperature during the growth of soybeans

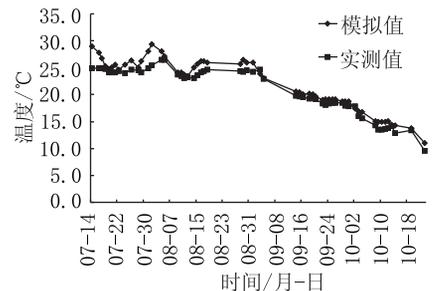


图 3 大豆生长期内土壤日平均地表温度模拟值与实测值对比

Figure 3 Comparison of the simulated and measured data for averaged daily temperature at soil surface during the growth of soybeans

从图 2、图 3 可以看出, DNDC 模型很好地模拟了日平均气温和土壤日平均地表温度的变化, 而且模拟值和对应的实测值非常接近。其中土壤日平均地表温度的模拟值与实测值的皮尔逊相关系数为: 0.982 ( $n = 57$ ),  $P < 0.01$ , 相关性显著。而日平均气温的模拟效果更好, 皮尔逊相关系数为: 0.984 ( $n = 57$ ),  $P < 0.01$ 。

### 2.3 DNDC 模型敏感性试验分析

以上的模型检验结果表明, DNDC 模型能有效地模拟大豆生长期旱地农田 N<sub>2</sub>O 排放变化和相关影响因素。通过对大豆生长期旱地农田 N<sub>2</sub>O 排放的敏感性试验, 有助于我们进一步确定影响大豆生长期旱地农田 N<sub>2</sub>O 排放的主要因子, 并为今后的重点研究提供相关依据。

在敏感性试验中, 对于各种影响因素的敏感性检验采取的方法为: 只改变某个因子的大小, 而保持其他因子不变, 以研究该因子的变化对 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响。模型对气温、土壤表面有机碳含量、降雨量和降雨中 N 素含量变化的敏感性进行的分析结果表明, N<sub>2</sub>O - N 排放模拟值对土壤初始表面有机碳含量的变化很敏感, 随着土壤初始表面有机碳含量的增

表 2 N<sub>2</sub>O - N 排放模拟值对气温、土壤表面有机碳含量、降雨中 N 素含量变化的敏感性分析

Table 2 The analysis on the sensitivity of the simulated N<sub>2</sub>O - N emission value against N content in rainfall, air temperature, and organic C contents at soil surface

影响因素		敏感性分析					
气温	气温变化/℃	-3.0	-2.0	-1.0	+1.0	+2.0	+3.0
	模拟值变化/%	-2.26	-1.24	-0.12	0.04	0.19	0.54
降雨量	降雨量变化/%	70	80	90	110	120	130
	模拟值变化/%	-12.37	-5.97	-4.52	-3.91	-9.11	-9.04
土壤表面有机碳含量	含量变化/%	70	80	90	110	120	130
	模拟值变化/%	-24.2	-15.27	-7.27	6.12	11.6	16.5
降雨中 N 素含量	含量变化/mg N · L <sup>-1</sup>	-1.0	-0.5	+0.5	+1.0	+1.5	
	模拟值变化/%	40.38	17.00	12.94	22.07	28.54	

壤微生物对有机氮的分解。

另外, N<sub>2</sub>O - N 排放模拟值对降雨中 N 素的含量变化也较为敏感, 在其他条件不变的情况下, 随着降雨中 N 素的含量的升高, N<sub>2</sub>O - N 排放模拟值也随着迅速增加, 这是由于伴随着降水进入到土壤中的氮素主要以硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)的形态存在, 降水中 N 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,

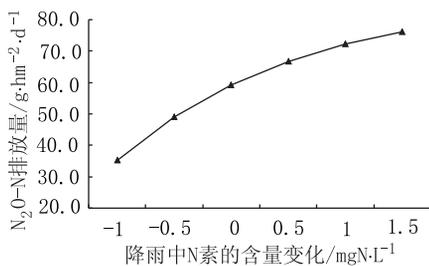


图 5 N<sub>2</sub>O - N 排放模拟值对降雨中 N 素含量变化的敏感性分析

Figure 5 The analysis on sensitivity of the simulated emission flux of N<sub>2</sub>O - N against variation of nitrogen from precipitation

加, N<sub>2</sub>O - N 排放模拟值也随着线性增加, 见表 2、图 4。这可能与土壤的有机质 C/N 比较低有关, 增加有机碳含量将提高土壤有机质 C/N 比, 从而有利于土

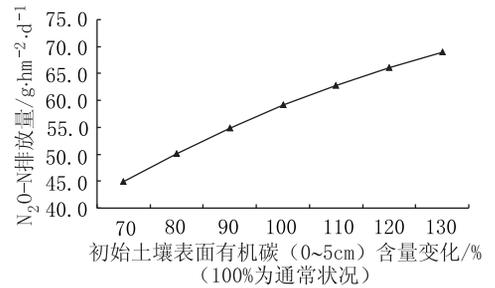


图 4 N<sub>2</sub>O - N 排放模拟值对土壤有机碳含量变化的敏感性分析

Figure 4 The analysis on sensitivity of the simulated emission flux of N<sub>2</sub>O - N against variation of organic carbon

从而促进了反硝化作用, 增加了 N<sub>2</sub>O 的排放, 见图 5。徐文彬等也有类似的结果。

### 3 结论

(1) 分析表明, DNDC 模型很好地模拟了田间实测到的大豆生长期旱地农田 N<sub>2</sub>O 排放通量、气温和土壤地表温度的变化, 模拟值与实测值也较为接近。虽然模型还存在一些问题, 但在将来北京地区旱地农田 N<sub>2</sub>O 排放量估算上有很强的应用价值。

(2) DNDC 模型敏感性试验分析得出, 在其他条件不变的情况下, 随着气温的升高, N<sub>2</sub>O - N 排放模拟值也随着增加, 模拟值的变化与实际情况相符; 相对于降雨量的变化, N<sub>2</sub>O - N 排放模拟值对土壤初始表面有机碳含量的变化更为敏感, 今后的相关研究应注意这一情况。

#### 参考文献:

- [1] Firstone M K and Davidson E A. Microbiological basis of NO and N<sub>2</sub>O

- production and consumption in soil, In: Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere, Dahlem Workshop Rep. 47, Andreae M O and Schimel D S (Eds. ), John Wiley, New York, 1989.
- [2] IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. p. : 40 ~ 45. Cambridge University Press, 2001.
- [3] Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall event: I. Model structure and sensitivity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992a, 97(D9) : 9759 - 9776.
- [4] Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall event: II. Model application[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992b, 97(D9): 9777 - 9783.
- [5] Li CS, Modeling trace gas emission from agricultural ecosystems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58: 259 - 276.
- [6] Parton W J, Mosier A R, Ojima D S, et al. Generalized model for  $N_2$  and  $N_2O$  production from nitrification and denitrification[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1996, 10: 401 - 412.
- [7] Potter C S, Davidson E A, Verchot L V. Estimation of global biogeochemical controls and seasonality in soil methane consumption[J]. *Chemosphere*, 1996, 32(11): 2219 - 2246.
- [8] 勾 继, 郑循华, 王明星, 等. 华东地区稻麦轮作农田生态系统  $N_2O$  排放的模拟研究[J]. *大气科学*, 2000, 24(6): 835 - 842.
- [9] 王效科, 欧阳志云, 苗鸿. DNDC 模型在长江三角洲农田生态系统的  $CH_4$  和  $N_2O$  排放量估算中的应用[J]. *环境科学*, 2001, 22(3): 15 - 19.
- [10] 徐文彬, 刘广深, 洪业汤, 等. DNDC 模型对我国旱地  $N_2O$  释放的拟合对比分析[J]. *矿物学报*, 2002, 22(3): 222 - 228.