

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

王效科, 欧阳志云, 苗鸿(中国科学院生态环境研究中心系统生态室, 北京 100085)

摘要: 长江三角洲是我国农业发达地区之一, 其农业生产所排放的 CH_4 和 N_2O 早已引起了研究者的重视. 本研究在分析总结现有的野外观测结果的基础上, 验证了估算区域痕量气体排放量的生物地球化学模型 DNDC, 估算出长江三角洲地区的 CH_4 和 N_2O 排放量分别为 $1.69 (1.29 \sim 2.09) \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.019 (0.014 \sim 0.024) \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$, 分别占全国农田 CH_4 和 N_2O 排放量的 16.7% 和 6.1%.

关键词: 长江三角洲; 生物地球化学模型; CH_4 ; N_2O

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)03-05-0015

Application of DNDC Model in Estimation of CH_4 and N_2O Emissions in Agricultural Ecosystems in Yangtze River Delta

Wang Xiaoke, Ouyang Zhiyun, Miao Hong(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

Abstract: It was paid attention that CH_4 and N_2O emission from agricultural soil in Yangtze River Delta where there is most advanced agricultural region in China. In this paper, a regional-scale biogeochemical model DNDC was validated on available field measurement. Then it was used to estimate CH_4 and N_2O emission in Yangtze River Delta to be $1.69 (1.29 \sim 2.09) \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ and $0.019 (0.014 \sim 0.024) \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. They are about 16.7% and 6.1% of the national total CH_4 and N_2O emissions from agricultural ecosystems, respectively.

Key words: Yangtze River Delta; biogeochemical model; methane; nitrous oxide

农田生态系统中排放出的痕量气体已经成为一种不可忽视的环境问题. 特别是 CH_4 和 N_2O 作为 2 种影响全球气候变化的温室气体, 农田排放量分别为全球所有排放源的 10% ~ 15% 和 20%^[1]. 因此, 在发展农业生产, 提高农作物产量的同时, 也应该关注由于农作物耕种而产生的温室气体排放, 评价其所产生的环境后果.

长江三角洲地区主要农田的 N_2O 和 CH_4 排放通量已经在南京、太湖附近和杭州分别进行了测定^[2~9]. 这为估计长江三角洲地区的农田 N_2O 和 CH_4 排放量和制定减排措施提供了基础数据. 本研究在分析总结现有的野外观测结果的基础上, 验证了估算区域痕量气体排放

量的生物地球化学模型 DNDC, 进一步利用 DNDC 模型估算了长江三角洲地区的 CH_4 和 N_2O 排放量, 评价了长江三角洲农业生产对全国农田痕量气体排放的贡献.

1 DNDC 模型

Li 等在研究农业土壤中碳氮地球化学循环规律的基础上, 开发了 DNDC(Decomposition and Denitrification) 模型^[10,11]. 该模型既可以对某一实验点的 N_2O 和 CH_4 排放通量进行模拟, 也

基金项目: 国家自然科学基金资助重大项目(49899270), 中国科学院知识创新项目(RCEES9903)

作者简介: 王效科(1964~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为陆地生态系统痕量气体的排放.

收稿日期: 2000-04-15

可以估算中国和美国的农业土壤 N_2O 和 CH_4 排放量。

DNDC 模型由 5 个子模型组成:土壤气候子模型利用每日气象数据(温度、降水)预测每小时的土壤温度和湿度剖面、土壤水流和植物吸水。作物子模型模拟各种作物从播种到收获的生长状况,预测籽实、秸秆和根系的生物量和氮含量。作物的生长受根区土壤氮和水分的限制。水分蒸腾是由作物生长和作物水分利用效率决定的。分解子模型有 4 个土壤碳库:枯落物、易分解及难分解腐殖质和微生物生物量等。每一碳库有一个固定的分解速率和碳氮比。分解速率受土壤质地、土壤温度和湿度以及氮素供给控制。分解过程中矿质化的氮素以 NH_4^+ 形式进入无机氮库,进一步硝化成 NO_3^- (其中部分 N 以 NO 和 N_2O 形式排放),或被植物吸收、淋溶,转化成挥发性 NH_3 和被粘粒矿物吸附。土壤中可溶性碳为硝化和反硝化作用提供能源。 NO_3^- 和可溶性 C 库的初值由分解子模型提供。对于反硝化还原顺序($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$)每一步的速率,是由可溶性碳、土壤温度、pH、氮基质的有效性和反硝化菌数量决定的。雨后土壤的干燥,每一模拟层的反硝化能力随土壤湿度减少而降低。反硝化子模型能够预测雨后土壤中 NO_3^- 的消耗和土壤排放的 NO 、 N_2O 和 N_2 。降水、淹水和气温为主要激发因子。这些激发因子都会造成土壤水分增加及土壤有效氧对反硝化反应的启动。甲烷排放子模块是模拟 CH_4 的产生、传输和排放过程。土壤中的有机质为产甲烷菌提供了食物,甲烷菌是一种厌氧微生物,土壤的厌氧环境状况以及土壤的温度和湿度影响了甲烷的产生率。 CH_4 的传输过程首先取决于土壤中的氧浓度影响。土壤中产生的 CH_4 主要是通过植物体排放,这种排放主要决定于植物对土壤溶液的提取率。DNDC 分别模拟了土壤环境条件对 CH_4 的产生、传输和排放过程的影响,可以预测出土壤的甲烷排放量。它的水平与凋落物、可溶性腐殖质和死微生物分解释放的碳有关。

2 DNDC 模型的验证

近年来, DNDC 模型已经得到了许多验证^[11, 12], 并且也已经被应用到区域 N_2O 排放量的估计上,如 Li 等^[13]对美国的 N_2O 排放量的估计。

为了保证模型应用的可靠性,首先应该对模拟结果与实测通量数据进行比较,为此,收集了目前各部门在长江三角洲所测定的 CH_4 和 N_2O 排放通量(表 1 和 2),并对影响 CH_4 和 N_2O 排放的因素进行了分析。

从已有的观测结果可以看出(表 1),长江三角洲农田生态系统 CH_4 排放量为 $3\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} \sim 113\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。不同地点的 CH_4 测定结果有较大的差异。施用化肥尿素对土壤 CH_4 排放的影响不明显。但施用硫酸铵(N)100 和 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, CH_4 的排放分别减少 40 % 和 60 %^[3]。有机肥的施用能够增加土壤的有机质,为 CH_4 的产生提供更多的基质,增加土壤的 CH_4 排放。在江宁的实验观测中,发现油菜杆的施用,对 CH_4 的排放有极大的促进作用^[4]。田间的水分管理,对土壤的 CH_4 排放有很大影响。根据当地的传统,在水稻的田间管理中,有 1 ~ 2 次的晒田,以增加根系附近的土壤的氧气含量,使根系发达,同时破坏了产甲烷菌生存的厌氧环境, CH_4 产生将大为减少,减少幅度达 40 % ~ 50 %^[7]。在实验中,如果采用半旱作方式,使部分土壤淹水,可以使 CH_4 排放量减少 38 %^[3, 4]。

从对长江三角洲农田生态系统 N_2O 排放通量的测定结果可以看出(表 2), N_2O 年排放量(N)为 $2.67\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} \sim 13.6\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。影响土壤 N_2O 排放最重要因子是土壤水分和氮肥的施用。土壤 N_2O 的排放高峰与施肥、降水和灌溉密切相关。施用化肥对 N_2O 的产生有很大促进作用。徐华等^[8]的测定得到了该地区化肥的 N_2O 排放系数为 0.19 % ~ 0.46 %, 小于 IPCC 估算 N_2O 的方法中推荐的排放系数 1.25 %。这也表明,如果采用 IPCC 推荐的排放

表 1 长江三角洲农田 CH₄ 排放量

Table 1 CH₄ emission from the agricultural fields in Yangtze River Delta

作者	地点	观察时间	施肥及施肥量(N) / kg·hm ⁻²	排放通量		平均排放量 ¹⁾ / g·m ⁻² ·a ⁻¹
				/ mg·m ⁻² ·h ⁻¹	/ g·m ⁻² ·d ⁻¹	
蔡祖聪等[3]	吴县 , 土壤有机质 3.2 %	1992 ~ 1993	不施肥	5. 31		16. 3
			硫酸铵 223	3. 20		9. 83
			硫酸铵 223 + 有机肥	5. 85		18. 0
			硫酸铵 223 + 硝化抑制剂	4. 31		13. 2
			硫酸铵 223 ,连续淹水	6. 22		19. 1
蔡祖聪等[4]	江苏省农科院 , 土壤有机质 1.85 %	1994	对照	3. 31		7. 9
			硫酸铵 100	1. 91		4. 6
			硫酸铵 300	1. 34		3. 2
			尿素 100	3. 07		7. 4
			尿素 300	2. 85		6. 8
李德波等[5]	江宁县 , 土壤有机质 2.29 %	1990 ~ 1992	廐肥 + 尿素 100	10. 83		26. 0
			廐肥	9. 48		22. 8
			硫酸铵 140	2. 63		6. 3
			油菜杆 + 尿素 100	14. 34		34. 4
			廐肥 + 尿素 100 ,半旱作	6. 62		15. 9
戴爱国等[6]	杭州 , 土壤有机质 2.5 %	1987 ~ 1988			0. 93	93
陈德章等[7]	杭州浙农大农场 , 土壤 有机质 2.5 %	1987			0. 94	94
		1988			0. 16	16
					0. 32	32
		1989			0. 26	26
					1. 13	113
熊效振等[8]	吴县 , 土 壤 有 机 质 3.5 %	1994 ~ 1996	尿素 191		0. 11	11
			碳酸氢铵 191		0. 07	7

¹⁾ 除文献[6]中估计了全年的 CH₄ 排放量外 ,其他的年排放量是根据生长期乘以排放通量 .生长期取 100d^[6] .

因子法 ,将会过高估计该地区的农田土壤 N₂O 排放量 .

对于区域模型的验证 ,应该同时考虑 2 方面 :一是模拟的方法和模型中的参数与实际情况是否符合 ,二是模型的输入数据库是否反映了当地的实际情况 .

为了将该模型应用到长江三角洲地区的农田生态系统的 CH₄ 和 N₂O 排放量估算上 ,根据 DNDC 模型的需要 ,建立了以县为单元的长江三角洲的气候(日最高、最低气温和日降水量)、土壤(容重、质地、粘粒含量、有机质和 pH)和农业耕作措施(土地利用类型、作物面积、作物播种期和收获期、无机肥和有机肥使用量)数据库 ,然后 ,计算出各县的农田土壤的 CH₄ 和 N₂O 的排放量 .

DNDC 对吴县农田 N₂O 排放的模拟结果(N)为 4.6kg·hm⁻²·a⁻¹ ~ 13.1kg·hm⁻²·a⁻¹ .徐华等^[8]和郑循华等^[9]的测定结果(N)为 4.49kg·hm⁻²·a⁻¹ ~ 13.6 kg·hm⁻²·a⁻¹ (表 2) .模拟的范围和测定的范围基本一致 ,这说明利用 DNDC

表 2 长江三角洲农田 N₂O 排放量

Table 2 N₂O emission from the agricultural fields in Yangtze River Delta

观测地点	观测时间	作物类型	施肥量(N) / kg•hm ⁻²	N ₂ O 平均排放通量(N) / μg•m ⁻² •h ⁻¹	N ₂ O 年排放总量 ¹⁾ (N) / kg•hm ⁻² •a ⁻¹
江苏吴县农科所 ^[8]	1992	水稻	0	34. 6	3. 03
			207	51. 3	4. 49
			311	56. 8	4. 97
			207 ²⁾	69	6. 04
江苏吴县长桥乡 ^[8]	1993	水稻	0	30. 5	2. 67
			207	65. 6	5. 75
			207 ²⁾	107. 3	9. 40
江苏吴县农科所 ^[9]					9. 6 ~ 13. 6

1) 根据平均排放通量值 2) 包括施用 15 t/hm² 有机肥

模型估计的区域 N₂O 排放量范围是可靠的.

DNDC 模型对于 CH₄ 排放的估计,只是到了近来才得以完成,将 DNDC 区域模型的模拟值与长江三角洲的实测值进行比较(表 3),可以看出,两者的范围基本一致,模拟估算的 N₂O 排放量的中值是实测的 74.8%~112.1%,是 4 个观测点的实测值的平均值的 94.4%.这说明 DNDC 模型估算该地农田土壤的 N₂O 的误差小于 26%,大范围平均后,其误差将更小.

表 3 CH₄ 的 DNDC 模拟结果与实测结果比较/g·m⁻²·a⁻¹

Table 3 The comparison of CH₄ DNDC simulating results and detacting results

测点	实测值 ¹⁾	模拟值 ¹⁾
南京	3.2~7.4 (5.3)	4.7~6.9 (5.3)
江宁	6.3~26.0 ²⁾ (16.2)	10.0~19.3 (14.7)
吴县	7.0~19.1 (13.1)	7.1~12.4 (9.8)
杭州	16~32 ³⁾ (24)	19.8~32.9 (26.9)

1) 括号内的数据为实测或模拟估算的范围的中值 2) 在江宁的实验观测中,油菜杆的施用,对 CH₄ 的排放有极大的促进作用,这里不考虑这种情况,没有采用此观测值 3) 去除了最大 3 个测值(93 g·m⁻²·a⁻¹, 94 g·m⁻²·a⁻¹和 113g·m⁻²·a⁻¹).

3 DNDC 估算长江三角洲农田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放量的结果

在建立的中国土壤、气候和土地利用数据

库的基础上,采用 DNDC 模型估算出长江三角洲的 1992 年的 CH₄ 和 N₂O 排放量分别是 1.69 (1.29~2.09) Tg·a⁻¹ 和 0.019(0.014~0.024) Tg·a⁻¹ (表 4),分别占全国农田 CH₄ 和 N₂O 排放量的 16.7%和 6.1%.

表 4 长江三角洲与全国农田生态系统的 CH₄ 和 N₂O 排放量比较/ Tg·a⁻¹

Table 4 The comparison of CH₄ and N₂O emission from Yangtze River Delta and the China

气体	CH ₄	N ₂ O(N)
长江三角洲	1.29~2.09 (1.69)	0.014~0.024 (0.019)
全国	8.78~11.49 (10.14) ^[14]	0.18~0.44 (0.31) ^[15]
比例/ %	16.7	6.1

在长江三角洲的区域范围内,CH₄ 和 N₂O 的排放量存在着较明显的区域差异(图 1).CH₄ 在浙江地区较高,大于 10 g·m⁻²·a⁻¹,这可能与该地区有较大面积的双季稻种植有关.N₂O 排放量(N) 在江苏的环太湖县市、江北的高邮及浙江的淳安较高,大部分大于 8 kg·hm⁻²·a⁻¹,这主要与这些地区的土壤有机质含量较高有关.

4 结论

(1) 通过与实验数据比较验证,说明 DNDC 模拟结果可以用于估算出长江三角洲的 CH₄

和 N_2O 排放量.

(2) 模拟结果表明,长江三角洲的 CH_4 和 N_2O 排放量分别为 $1.69(1.29 \sim 2.09) \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.019(0.014 \sim 0.024) \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,分别占全国农田

CH_4 和 N_2O 排放量的 16.7 %和 6.1 %.

(3) 在长江三角洲的区域范围内, CH_4 和 N_2O 的排放量存在着较明显的区域差异. CH_4 在浙江地区较高, N_2O 排放环太湖县市、江北

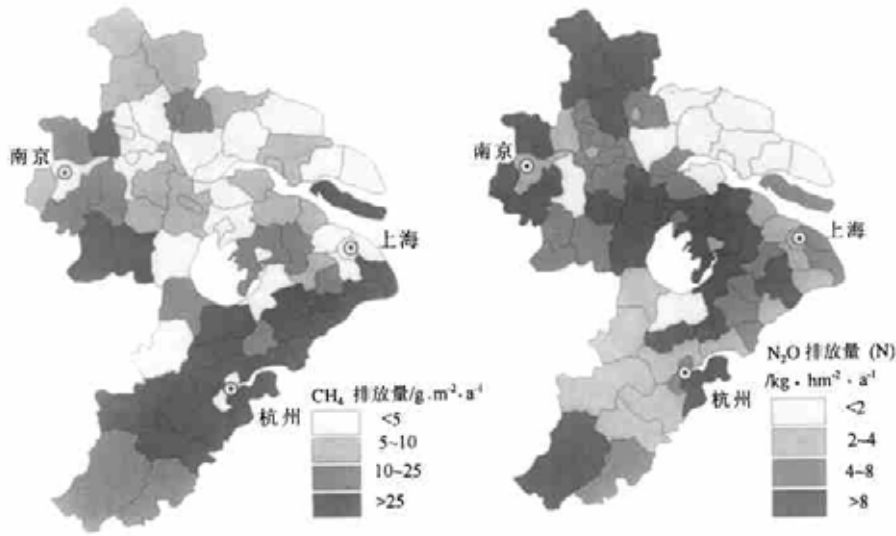


图 1 长江三角洲农田 CH_4 (a) 和 N_2O (b) 排放量分布图

Fig.1 Distribution of CH_4 and N_2O emission from the agricultural fields in Yangtze River Delta

的高邮及浙江的淳安较高.

参考文献:

1 IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Reference Manual. 1996.

2 Cai Z, Xu H, Zhang H, Jin J. Estimate of Methane Emission from Rice Paddy Fields in Taihu Region, China. *Pedosphere*. 1994, 4(4):297~306.

3 蔡祖聪,颜晓元,徐华.氮肥品种对稻田 CH_4 排放的影响. *土壤学报*,1995,32:136~143.

4 李德波,张纪伍,李维新,岳振陶,俞飞,顾建宁.不同农业措施对稻田甲烷排放通量的影响. *农村生态环境*,1993,(增刊):13~27.

5 戴爱国,王明星,沈壬兴等.我国杭州地区秋季稻田的甲烷排放. *大气科学*,1991,15(1):102~110.

6 陈德章,王明星.稻田 CH_4 排放和土壤、大气条件的关系. *地球科学进展*,1993,8(5):37~45.

7 熊效振,沈壬兴,王明星,郑循华,王跃思,李晶.太湖流域单季稻的甲烷排放研究. *大气科学*,1999,23(1):9~18.

8 徐华,邢光熹,张汉辉.太湖地区水田土壤 N_2O 排放通量及其影响因素. *土壤学报*,1995,32:144~149.

9 郑循华,王明星,王跃思,沈壬兴,上官行健.华东稻田 CH_4 和 N_2O 排放. *大气科学*,1997,21(2):231~237.

10 Li C, V Narayanan, R C Harris. Model estimates of nitrous oxide emissions from agricultural lands in the United States. *Global Biogeochem. Cycles*, 1996, 10:297~306.

11 Li C, S Frolking, T A Frolking. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events, 2. Model applications. *J Geophys. Res.*, 1992, 97:9777~9783.

12 Frolking S E, A R Mosier, D S Ojima et al. Comparison of N_2O emissions from soils at three temperate agricultural sites: Simulations of year-round measurements by four models. *Nut Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52:77~105.

13 Li C, S Frolking, T A Frolking. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events, 1. Model structure and sensitivity. *J Geophys. Res.*, 1992, 97:9759~9776.

14 张仁键,王明星,李晶,杨祈,王秀玲.中国甲烷排放现状. *气候与环境研究*,1999,4:194~202.