

水稻控制灌溉下华东稻麦轮作农田 N_2O 排放模拟

侯会静¹ Shalamu Abudu² 陈慧¹ 杨士红³

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 德克萨斯农工大学埃尔帕索农业科学研究中心, 德克萨斯 79927; 3. 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 基于田间小区试验, 利用 DNDC 模型模拟了水稻控制灌溉下的华东稻麦轮作农田 N_2O 排放情况, 分析了 DNDC 模型在该地区以及水稻控制灌溉条件下的适用性。结果表明, DNDC 模型能较好地模拟控制灌溉稻田 N_2O 排放规律, 模拟值与实测值的相关系数为 0.79 ($n=39, p<0.001$); 同时能较好地模拟控制灌溉稻田 N_2O 排放通量与土壤水分调控及施肥的关系。但模型对土壤脱水程度的响应不够敏感, 导致部分峰值出现时间稍有滞后。后茬麦田 N_2O 排放通量的模拟值多低于实测, 模拟主峰值较实测值增大了 14.96% ($p<0.05$), 模拟次峰值比实测值减小了 18.10% ($p<0.05$)。稻季、麦季及稻麦轮作期的 N_2O 排放总量的模拟值与实测值的相对误差分别为 5.86%、-20.17% ($p<0.05$) 和 -4.97%, 可见, DNDC 模型能较好地模拟控制灌溉稻田 N_2O 排放总量, 但明显低估了后茬冬小麦田的 N_2O 排放总量, 稻麦轮作农田 N_2O 排放总量的模拟值和实测值总量相差不大。因此, DNDC 模型可以用来模拟华东地区控制灌溉稻田 N_2O 排放, 但不能准确地模拟后茬冬小麦田的 N_2O 排放。

关键词: 控制灌溉; N_2O 排放; DNDC 模型; 稻麦轮作

中图分类号: S274.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0185-07

Simulation of N_2O Emission from Rice – Wheat Rotation Field under Controlled Irrigation of Rice in Southeast China

Hou Huijing¹ Shalamu Abudu² Chen Hui¹ Yang Shihong³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Texas A&M AgriLife Research Center at El Paso, Texas 79927, USA

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the field plot experiments in Southeast China, N_2O emissions from the rice – wheat rotation field under controlled irrigation of rice were simulated by using the DNDC model, and the applicability of this model in the region was analyzed. The results showed that N_2O fluxes from controlled irrigation rice fields were generally higher than those from the following wheat fields, and the average flux was 3.0 times of that in the following wheat fields. DNDC model successfully simulated the rules of N_2O emissions from controlled irrigation rice fields, and the correlation coefficient between the simulated and measured values was 0.79 ($n=39, p<0.001$). It could also simulate the relationship between the N_2O fluxes and soil moisture regulation and fertilization. But the response of the model to the extent of soil dehydration was not sensitive enough, resulting in the slight lag of some N_2O peaks. Simulated N_2O fluxes from the following wheat fields were usually lower than the measured values. Compared with the measured values, the simulated value of the highest peak was increased by 14.96% ($p<0.05$), and the simulated value of the smaller peak was decreased by 18.10% ($p<0.05$). The relative errors between the simulated and measured values of the cumulative N_2O emission during the rice season, wheat season and rice – wheat rotation period were 5.86%, -20.17% ($p<0.05$) and -4.97%, respectively.

收稿日期: 2016-07-08 修回日期: 2016-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309192, 51179049, 51579070)

作者简介: 侯会静(1984—), 女, 讲师, 博士, 主要从事节水灌溉理论与农田环境效应研究, E-mail: hjhou@nwsuaf.edu.cn

These results indicated that the DNDC model can well simulate the cumulative N_2O emission from the rice fields under controlled irrigation, but the N_2O emissions from the following wheat fields were significantly underestimated. The difference between the simulated and measured values of total N_2O emission from rice – wheat rotation field was small. Thus, the DNDC model can be used to simulate the N_2O emissions from controlled irrigation rice fields in Southeast China, but it can not accurately simulate the N_2O emissions from the following wheat fields.

Key words: controlled irrigation; N_2O emission; DNDC model; rice – wheat rotation

引言

N_2O 是大气中最重要的温室气体之一,具有高增温效应对臭氧层的间接破坏作用,在 100 a 尺度上的全球增温潜势是 CO_2 的 298 倍^[1]。农田生态系统是 N_2O 的主要排放源之一^[2]。模型估算目前被认为是较为可靠的估算农田温室气体排放的方法^[3]。根据模型建立方法的不同,可将温室气体排放模型分为过程机理模型和经验、半经验统计模型^[4]。目前较为常用的估算 N_2O 和 CH_4 的机理模型有 CENTURY^[5]、DAYCENT^[6-8]、Ecosys^[9-10]、WNMM (Water and nitrogen management model)^[11-12]、NGAS 模型^[13]和 DNDC 模型^[14-17]等。DNDC 模型是目前在农业温室气体排放上应用最为广泛的模型,是一座架在基本生态驱动因子和碳氮生物地球化学循环之间的桥梁。该模型适用的环境范围很广^[18](包括旱地、水田、森林、草地等多种土壤环境),输入参数相对于其他一些机理模型(如 Ecosys 等)比较容易获得。模型的不足之处在于:在低施氮量或不施氮的情况下,模拟效果不佳^[19-20]。在过去的 10 多年中,该模型已在包括中国在内的 20 多个国家得到应用和检验^[21]。

水稻控制灌溉的特点是从水稻分蘖期开始,稻田处于无水层或脱水状态,干湿交替加剧,土壤水分状况的变化引起土壤理化性质与土壤环境的变化,势必导致稻田 N_2O 排放发生变化^[22]。已有研究表明,水稻控制灌溉加剧了稻田 N_2O 排放^[22-23]。然而,农田 N_2O 的产生及排放不仅与当时所处的水分条件有关,而且还受到此前水分状况(土壤水分历史)的强烈影响。水稻节水灌溉导致的土壤水分状况的改变不仅引起稻田 N_2O 排放发生变化,并且对后茬冬小麦田的 N_2O 排放产生了后续影响^[22,24]。水稻控制灌溉较常规淹水灌溉没有增加稻麦轮作农田的 N_2O 排放^[22]。虽然, DNDC 模型已被广泛用于模拟稻田 N_2O 排放^[25-27],但是,该模型在控制灌溉调控下的稻麦轮作农田中的适用性仍有待研究。水稻节水灌溉模式下稻麦轮作农田生态系统 N_2O 排

放及动态模拟研究对客观评价中国的稻麦轮作农田温室气体排放及全球温室气体排放估算等具有重要的科学意义。本文采用 DNDC(9.4 版)模型对稻季采用控制灌溉的稻麦轮作农田 N_2O 排放过程及排放量进行模拟,并将模拟结果与实测值进行对比,以了解该模型在该地区及水稻控制灌溉条件下的适用性。

1 试验材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室昆山试验研究基地,地处太湖流域水网地区低洼平原,属于亚热带南部季风气候区,土壤类型为潴育型黄泥土,耕层土壤为粘土,根据美国土壤质地分类法,粘粒、粉粒和砂粒含量分别为 75.0%、16.2%和 8.8%,0~18 cm 土层土壤有机质含量为 21.9 g/kg,全氮含量为 1.03 g/kg,全磷含量为 1.35 g/kg,全钾含量为 20.86 g/kg,pH 值为 7.4。

1.2 试验设计

试验于 2010—2011 年进行,分稻季试验和冬小麦季试验,其中稻季试验采用控制灌溉,设置 3 个重复,后茬冬小麦生长季不设水分试验处理。试验安排在地中排水式蒸渗仪内进行,蒸渗仪小区面积为 5 m^2 ($2\text{ m} \times 2.5\text{ m}$)。水稻返青期,控制灌溉稻田持有 5~25 mm 薄水层,水稻进入分蘖期以后,以根层土壤含水率作为灌水的调控指标,除施肥、打药、除草外不建立灌溉水层,以根层土壤含水率作为灌水的调控指标,确定灌水时间和灌水定额^[28]。稻季试验期间小区遮盖雨棚,麦季观测期间小区没有遮盖雨棚。

供试水稻品种为南粳 46,供试小麦品种为扬麦 16,施肥量与农民习惯施肥处理相同^[22],详见表 1。采用静态箱原位采集气样^[28],小区中央离田埂 0.5 m 处预埋方形硬塑料底座(尺寸 50 cm × 50 cm),底座嵌入土壤 5 cm 深,用于放置人工采样静态箱^[22]。从水稻插秧后第 2 天开始采样,每隔 3~4 d 采样 1 次,施肥后加测,每 2 d 测 1 次,9 月份以后取样间隔为 7 d 左右;冬小麦季每隔 7 d 取样一次,进入越

冬期后取样间隔为 14 d, 春节期间中断一次, 取样时间均为 10:00—11:00。N₂O 浓度采用安捷伦气相

色谱分析仪测定 (Agilent 7890A - 0468), 参照文献[29]方法计算 N₂O 排放通量和排放量。

表 1 氮肥施用量及施用时间

Tab.1 Application amount and time of nitrogen fertilizer

时期	项目	基肥	返青肥	分蘖肥	穗肥	合计
稻季	施用时间	2010-06-26	2010-07-01	2010-07-17	2010-08-13	
	施用量	48.0(CF)	64.1(AB)	121.3(U)	69.3(U)	302.7
麦季	施用时间	2010-11-15	2011-02-24		2011-04-15	
	施用量	51.0(CF)	104.4(U)		69.6(U)	225.0

注: CF 为复合肥料 (含氮质量分数为 16%), AB 为碳酸氢铵 (含氮质量分数为 17.1%), U 为尿素 (含氮质量分数为 46.4%)。

1.3 模型参数输入

将 DNDC 所需的气象信息、土壤和田间管理等参数输入, 驱动模型运转, 比较模型模拟的稻麦轮作

农田 N₂O 排放通量及排放总量与田间实测数据的拟合度。模型所需气象数据、土壤参数如表 2 所示, 灌水时间及灌水量见表 3。

表 2 DNDC 模型验证所需气象、土壤数据

Tab.2 Soil and meteorological parameters used to validate DNDC model

项目	输入参数
地理状况	江苏昆山试验站: 34°63'21"N, 121°05'22"E; 土地利用类型: 水稻田
气象	2010—2011 年气象数据 (逐日最高、最低气温、降水量), 降水中的氮质量浓度为 3.70 mg/L
土壤	质地: 粘土; 容重: 1.32 g/cm ³ ; 粘土百分比: 75.0% (粒径小于 0.002 mm); pH 值: 7.4; 初始耕层土壤有机质含量: 21.9 g/kg; 初始耕层土壤硝态氮含量: 4.74 mg/kg; 初始耕层土壤铵态氮含量: 6.70 mg/kg

表 3 DNDC 模型验证所需灌溉数据

Tab.3 Irrigation amount and time used to validate DNDC model

灌水日期	灌水量/mm	灌水日期	灌水量/mm
2010-07-01	22.5	2010-08-10	76.6
2010-07-02	11.5	2010-08-12	55.1
2010-07-03	20.9	2010-08-15	16.6
2010-07-05	18.4	2010-08-23	41.7
2010-07-07	20.2	2010-08-28	45.2
2010-07-17	86.0	2010-09-03	59.1
2010-07-28	80.3	2010-09-06	56.4
2010-08-03	29.2	2010-09-24	93.0

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 和 DPS 数据处理软件^[30] 对试验数据进行统计分析, 显著性分析采用最小显著性差异 (LSD) 法, 置信水平为 95% 或 99.9%。

2 结果与分析

2.1 控制灌溉稻田 N₂O 排放动态模拟

控制灌溉稻田的 N₂O 排放呈现明显的季节变化规律 (图 1), 且主要集中在水稻生育前期, 出现 3 个较大的排放峰值, 主峰值 (1 999.25 μg/(m²·h)) 出现在水稻分蘖中期移栽后 27 d, 次峰值 (957.71 μg/(m²·h)) 出现在水稻分蘖中期移栽后 31 d, 在分蘖前期移栽后 21 d 也有一个较大的峰值 (555.71 μg/(m²·h)); 稻季 N₂O 平均排放通量为

163.51 μg/(m²·h)。此外, 控制灌溉稻田 N₂O 排放通量的峰值一般出现在施肥后 7~14 d 且土壤脱水后 3~6 d 左右 (图 1)。

比较控制灌溉稻田 N₂O 排放通量模拟值与实测值 (图 1) 可以看出, DNDC 模型能够较好地模拟控制灌溉条件下稻田的 N₂O 季节排放过程, 模拟结果捕捉到了 N₂O 的剧烈释放过程, N₂O 排放通量峰值的模拟值及实测值均出现在水稻分蘖期和拔节孕穗前期, 且峰值的模拟结果与田间实测值比较接近, 部分峰值出现时间稍有滞后。控制灌溉稻田 N₂O 排放通量的模拟主峰值为 1 890.02 μg/(m²·h), 较对应的实测主峰值减小了 5.5%, 均出现在水稻分蘖中期 (移栽后 27 d); 模拟次峰值的出现时间 (移栽后 33 d) 较实测次峰值滞后 2 d。

对比控制灌溉稻田 N₂O 排放通量的模拟值和实测值与土壤水分及施肥的关系可以发现 (图 1), DNDC 模型能够较好地模拟控制灌溉稻田 N₂O 排放通量与土壤水分的调控关系, 同时也能较好地捕捉到施肥对 N₂O 排放通量的影响。控制灌溉稻田 N₂O 排放通量的峰值一般出现在施肥后 7~14 d 且土壤脱水后 3~6 d 左右, 模拟结果基本与之吻合; 如图 2 所示, 控制灌溉稻田 N₂O 排放通量的模拟主峰值及实测主峰值均出现在分蘖肥后第 7 天且土壤脱水后第 3 天。此外, 模拟结果能较好地反映土壤脱水-复水对 N₂O 排放通量的影响, 即土壤脱水促

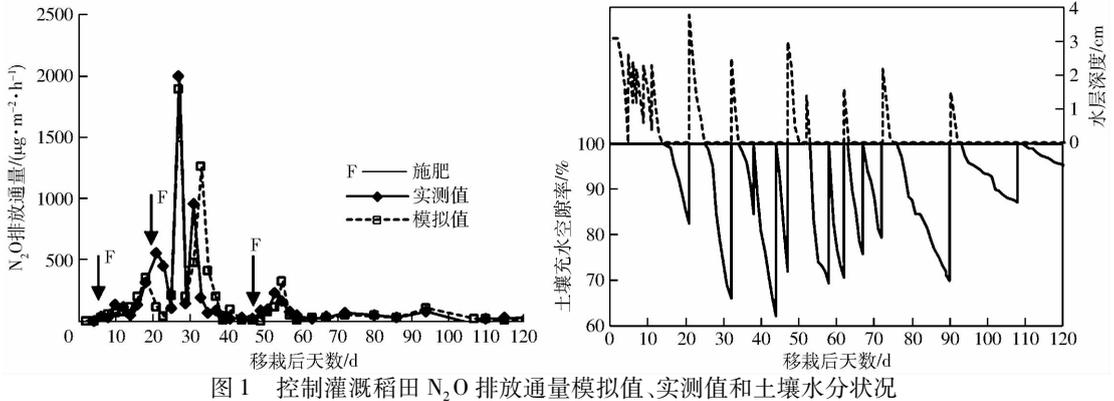


图1 控制灌溉稻田 N_2O 排放通量模拟值、实测值和土壤水分状况

Fig. 1 Simulated and measured N_2O fluxes and soil moisture in rice fields under controlled irrigation

进了稻田 N_2O 排放,复水则导致 N_2O 排放通量迅速减小。但是,模拟值对土壤脱水程度响应的敏感性仍不够,导致部分峰值出现时间稍有滞后。可能的原因是模型本身对水田条件及强烈干湿交替过程的处理有些简单,这种简化处理使模型难以反映真实情况,无法很好地实现控制灌溉对稻田土壤水分的持续调控过程。例如,控制灌溉稻田 N_2O 排放通量的模拟次峰值出现在分蘖肥后第 10 天且土壤脱水后第 7 天,对应的实测次峰值出现在分蘖肥后第 8 天且土壤脱水后第 5 天。

为进一步验证模型拟合效果,对控制灌溉条件下稻田的 N_2O 排放通量的实测值与模拟值进行相关性分析,结果表明,控制灌溉条件下稻田的 N_2O 排放通量的模拟值与实测值的相关系数为 0.79 ($n=39$),相关性达到极显著水平 ($p<0.001$),表明 DNDC 9.4 模型能够较好地模拟控制灌溉条件下稻田 N_2O 排放通量的季节变化规律。

2.2 水稻控制灌溉条件下后茬冬小麦田 N_2O 排放动态模拟

水稻控制灌溉条件下后茬冬小麦田的 N_2O 排放主要集中在返青肥施加(小麦播种后 120 d)以后的小麦生长中后期,返青肥施加以前 N_2O 排放通量数值较小,出现 2 个较大 N_2O 排放通量峰值,其中,主峰值($258.25 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)出现在小麦播种后 145 d;次峰值($225.96 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)出现在小麦播种后 184 d,麦季 N_2O 平均排放通量 $54.32 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。就整个稻麦轮作周期来看,控制灌溉稻田 N_2O 排放通量普遍高于后茬冬小麦田 N_2O 排放通量(图 1 和图 2),平均排放通量是后茬冬小麦田的 3.0 倍,主峰值是后茬冬小麦田的 7.74 倍。

DNDC 在模拟稻季采用控制灌溉的后茬冬小麦田(简称稻季控灌的麦田)的 N_2O 排放时的模拟值通常低于实测值,但能较好地模拟 N_2O 排放对施肥和降水的响应,峰值的模拟结果与田间实测值在出

现时间上均比较接近,数值上存在较大差异(图 2)。例如,小麦播种后第 142 ~ 145 天期间降水量为 34.2 mm,加之返青肥的施加,在小麦播种后第 145 天,稻季控灌的麦田 N_2O 排放通量出现了峰值 $258.25 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,模型模拟结果捕捉到了该排放峰值,该模拟峰值($303.69 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)出现在小麦播种后第 150 天,较实测主峰值增大了 14.96% ($p<0.05$)。 N_2O 排放通量的次峰模拟值比实测值减小了 18.10% ($p<0.05$)。

稻季控灌的麦田 N_2O 排放通量的实测值与模拟值的相关性分析结果表明,稻季控灌的麦田的 N_2O 排放通量的模拟值与实测值的相关系数为 0.48 ($n=19$),相关性达到了显著水平 ($p<0.05$)。就整个稻麦轮作系统而言,稻麦轮作农田的 N_2O 排放通量的模拟值与实测值的相关系数为 0.79 ($n=58$),相关性达到了极显著水平 ($p<0.001$),表明 DNDC 模型能够较好地模拟中国东南部地区稻季控灌的稻麦轮作农田 N_2O 排放通量的季节变化规律。

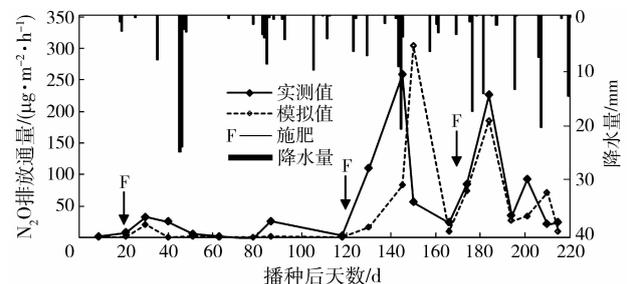


图2 后茬麦田 N_2O 排放通量模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured N_2O fluxes in following wheat fields

2.3 水稻控制灌溉条件下稻麦轮作农田 N_2O 排放量估算

对比 DNDC 模型对稻季控灌的稻麦轮作农田 N_2O 排放总量的模拟值与实测值可以发现(表 4),稻季 N_2O 排放总量的模拟值略大于实测值,但差异不显著 ($p>0.05$);冬小麦季 N_2O 排放总量的模拟

值显著小于实测值 ($p < 0.05$), 稻麦轮作农田的 N₂O 排放总量的模拟值略小于实测值 ($p > 0.05$)。稻季、麦季及稻麦轮作期的 N₂O 排放总量的模拟值与实测值的相对误差分别为 5.86%、-20.17% 和 -4.97%。可见, DNDC 模型能较好地模拟控制灌溉稻田 N₂O 排放总量, 模拟效果比较理想, 但明显低估了后茬冬小麦田的 N₂O 排放总量。但稻季控灌的稻麦轮作农田 N₂O 排放总量的模拟值和实测值总量相差不大。

表 4 稻麦轮作农田 N₂O 排放总量的模拟值与实测值对比

Tab. 4 Comparison of simulated and measured cumulative

N₂O emissions in rice - winter wheat croplands

参数	稻季	麦季	稻麦轮作期
模拟值/(kg·hm ⁻²)	374.45 ^a	201.37 ^b	575.82 ^a
实测值/(kg·hm ⁻²)	353.71 ^a	252.25 ^a	605.95 ^a
相对误差/%	5.86	-20.17	-4.97

注: 同列数值后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

已有对稻田 N₂O 排放模拟的研究主要集中在不同耕作制度、管理措施和施肥措施条件下的稻田 N₂O 排放模拟上^[31-33], 也有学者模拟了气候变化等对稻田 N₂O 排放的影响^[21], 但有关水稻节水灌溉调控下稻田 N₂O 排放模拟的研究尚未见报道。例如, 夏文建等^[32]采用 DNDC 模型模拟氮肥施用对长江中下游稻麦轮作体系 N₂O 排放影响时发现, DNDC 模型能较好地模拟稻田 N₂O 排放通量的季节变化规律, 模型模拟值与实测值相关系数为 0.528, 达到极显著水平。已有对冬小麦田 N₂O 排放模拟的研究较多^[32, 34-36], 但对于前茬水稻季采用节水灌溉的冬小麦田 N₂O 排放模拟的研究尚未见报道。例如, 薛静等^[36]指出 DNDC 模型能较好的模拟麦田 N₂O 的排放通量, 模拟主峰值稍低于实测值。薛彦东等^[35]发现 DNDC 模型能捕捉到灌溉、降水和施肥所引起的冬小麦田 N₂O 排放峰值, 但实测值滞后于模拟值, 模型还无法精确预测单个时间点的 N₂O 排放通量。

DNDC 模型最初是针对美国旱作土壤 N₂O 排放而开发出来的, 较多地经受了旱地 N₂O 排放田间测量结果的检验^[19-20, 37-40], 但是对传统淹水灌溉稻田及中期烤田的淹水稻田 N₂O 排放的拟合结果不理想^[40-42]。从水稻分蘖期开始, 控制灌溉稻田实行无水层管理, 水稻生育期 60%~80% 的时间内, 控制灌溉稻田的土壤处于非饱和状态, 田间的土壤水分状况与传统的淹水灌溉有很大的不同, 与旱稻田相

似^[43-44]。因此, DNDC 模型能较好地模拟控制灌溉稻田 N₂O 季节排放规律和排放量。然而, DNDC 9.4 模型中对稻田水分管理的处理仍较为简单, 在输入 DNDC 模型运行参数时, “农田管理”中选择灌溉模式时只有“旱作灌溉”和“淹灌”可以选择, 而水稻控制灌溉既不等同于旱作灌溉更不是传统淹水灌溉。DNDC 模型内部没有设置水稻节水灌溉模式, 因此, 在模型中定义控制灌溉模式时, 只能是淹水阶段选择“淹灌”选项, 无水层阶段选择“旱作灌溉”选项。这可能会导致模型无法很好地实现控制灌溉对稻田土壤水分的持续调控过程, 模型在这方面仍有改进的余地。假如模型允许使用者直接输入实测的土壤含水率, 那么模型的模拟结果应该更接近实测值。

DNDC 模型低估了 20.17% 的冬小麦田 N₂O 排放量, 以往也有研究得出类似的结论。徐文彬等^[37]利用 DNDC 模型模拟贵州省玉米-油菜轮作田和大豆-冬小麦轮作田的 N₂O 释放通量时发现对亚热带旱作土壤, 模型计算出的试验阶段 N₂O 释放量均低于田间观测结果约 25%; 而 LI 等^[45]对佛罗里达州试验田的模拟结果显示该误差为 28%。这与模型低估了干旱期和非农业活动期土壤的 N₂O “背景排放通量”有关。DNDC 模型认为农田排放 N₂O 在时间上是不连续的, 其排放过程受施肥、灌溉等农业活动及降水的驱动, 表现为一系列 N₂O 脉冲排放峰^[16]。因此, 模型能较好地捕捉亚热带地区农业活动和降雨引发的农田 N₂O 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 N₂O 排放反应灵敏度不够^[20]。

4 结论

(1) 控制灌溉稻田的 N₂O 排放呈现明显的季节变化规律, 且主要集中在水稻生育前期, 而后茬冬小麦田的 N₂O 排放主要集中在返青肥施加 (小麦播种后 120 d) 以后的小麦生长中后期。控制灌溉稻田 N₂O 排放通量普遍高于后茬冬小麦田 N₂O 排放通量, 平均排放通量是后茬冬小麦田的 3.0 倍。

(2) DNDC 模型能较好地模拟控制灌溉稻田 N₂O 排放规律, 模拟通量与实测值极显著相关 ($p < 0.001$), 也能较好地模拟后茬冬小麦田 N₂O 排放对施肥和降水的响应, 但模拟值通常低于实测值, 峰值的模拟结果与实测值在出现时间上均比较接近, 数值上存在显著差异 ($p < 0.05$)。

(3) DNDC 模型能较好地模拟控制灌溉稻田 N₂O 排放总量, 但明显低估了后茬冬小麦田 N₂O 排放总量, 稻季和麦季的 N₂O 排放总量的模拟值与实

测值的相对误差分别为 5.86% 和 -20.17% ($p < 0.05$)。可见, DNDC 模型可以用来模拟华东地区控制灌溉稻田 N_2O 排放,但不能准确地模拟后茬冬小麦田的 N_2O 排放。

参 考 文 献

- 1 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2013: the physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- 2 SMITH P, MARTINO D, CAI Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2008, 363(1492): 789-813.
- 3 GILHESPY S L, ANTHONY S, CARDENAS L, et al. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): model evolution [J]. Ecological Modelling, 2014, 292: 51-62.
- 4 廖千家骅, 颜晓元. 农业土壤氧化亚氮排放模型研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 817-825.
LIAO Qianjiahua, YAN Xiaoyuan. Models of N_2O emission from agricultural fields: a review [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(5): 817-825. (in Chinese)
- 5 PARTON W J, SCHIMEL D, COLE C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(5): 1173-1179.
- 6 GROSSO S J D, PARTON W J, MOSIER A R, et al. General model for N_2O and N_2 gas emissions from soils due to denitrification [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(4): 1045-1060.
- 7 PARTON W J, HARTMAN M, OJIMA D, et al. DAYCENT and its land surface submodel: description and testing [J]. Global and Planet Change, 1998, 19(1-4): 35-48.
- 8 PARTON W J, OJIMA D, SCHIMEL D, et al. A general model for soil organic matter dynamics: sensitivity to litter chemistry, texture and management [J]. SSSA Special Publication, 1994, 39: 147-167.
- 9 GRANT R F, PATTEY E. Mathematical modeling of nitrous oxide emissions from an agricultural field during spring thaw [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1999, 13(2): 679-694.
- 10 LI T, GRANT R F, FLANAGAN L B. Climate impact on net ecosystem productivity of a semi-arid natural grassland: modeling and measurement [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 126(1-2): 99-116.
- 11 LI Y, CHEN D L, ZHANG Y M, et al. Comparison of three modeling approaches for simulating denitrification and nitrous oxide emissions from loam-textured arable soils [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(3): GB3002.
- 12 李晓鹏, 张佳宝, 朱安宁, 等. 基于 WNMM 模型的潮土地区农田水氮优化管理[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(1): 62-68.
LI Xiaopeng, ZHANG Jiabao, ZHU Anning, et al. WNMM-model-based optimization of soil water and nitrogen management in fluvo-aquic soil [J]. Journal of Ecology and Rural Environmen, 2009, 25(1): 62-68. (in Chinese)
- 13 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 Biogeochemical Cycles, 1996, 10(3): 401-412.
- 14 LI C S, MOSIER A, WASSMANN R, et al. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: sensitivity and upscaling [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18(1): GB1043.
- 15 LI C S, FROLKING S, FROLKING T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rain fall events: 2. model applications [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D9): 9777-9783.
- 16 LI C S, CUI J B, SUN G, et al. Modeling impacts of management on carbon sequestration and trace gas emissions in forested wetland ecosystems [J]. Environmental Management, 2004, 33(Sup. 1): S176-S186.
- 17 李长生, 肖向明, Frolking S, 等. 中国农田的温室气体排放 [J]. 第四纪研究, 2003, 23(5): 493-503.
LI Changsheng, XIAO Xiangming, FROLKING S, et al. Greenhouse gas emissions from croplands of China [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(5): 493-503. (in Chinese)
- 18 GILTRAP D L, LI C S, SAGGAR S. DNDC: a process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 136(3-4): 292-300.
- 19 ABDALLA M, WATTENBACH M, SMITH P, et al. Application of the DNDC model to predict emissions of N_2O from Irish agriculture [J]. Geoderma, 2009, 151(3-4): 327-337.
- 20 谢军飞, 李玉娥. DNDC 模型对北京旱地 N_2O 排放的模拟对比分析 [J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 691-695.
XIE Junfei, LI Yu'e. Comparative analysis on measured and DNDC (denitrification-decomposition) modeled N_2O emissions from upland farm in Beijing [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(4): 691-695. (in Chinese)
- 21 田展, 牛逸龙, 孙来祥, 等. 基于 DNDC 模型模拟气候变化影响下的中国水稻田温室气体排放 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 793-799.
TIAN Zhan, NIU Yilong, SUN Laixiang, et al. China's rice field greenhouse gas emission under climate change based on DNDC model simulation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 793-799. (in Chinese)
- 22 侯会静, 陈慧, 杨士红, 等. 水稻控制灌溉对稻麦轮作农田 N_2O 排放的调控效应 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 125-131.
HOU Huijing, CHEN Hui, YANG Shihong, et al. Effects of controlled irrigation of paddy fields on N_2O emissions from rice-winter wheat rotation systems [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 125-131. (in Chinese)
- 23 彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 稻田 CH_4 和 N_2O 综合排放对控制灌溉的响应 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 121-126.

- PENG Shizhang, HOU Huijing, XU Junzeng, et al. CH₄ and N₂O emissions response to controlled irrigation of paddy fields[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 121–126. (in Chinese)
- 24 LIU S W, QIN Y M, ZOU J W, et al. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N₂O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(4): 906–913.
- 25 KRAUS D, WELLER S, KLATT S, et al. A new landscape DNDC biogeochemical module to predict CH₄ and N₂O emissions from lowland rice and upland cropping systems[J]. Plant and Soil, 2015, 386(1–2): 125–149.
- 26 WU X R, ZHANG A. Comparison of three models for simulating N₂O emissions from paddy fields under water-saving irrigation [J]. Atmospheric Environment, 2014, 98: 500–509.
- 27 ZHANG L M, YU D S, SHI X Z, et al. Simulation of global warming potential (GWP) from rice fields in the Tai-Lake region, China by coupling 1:50,000 soil database with DNDC model[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(17): 2737–2746.
- 28 彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 节水灌溉对稻田 N₂O 季节排放特征的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 14–18.
- PENG Shizhang, HOU Huijing, XU Junzeng, et al. Effects of water-saving irrigation on seasonal characteristics of N₂O emission from paddy fields[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 14–18. (in Chinese)
- 29 ZHENG X, WANG M, WANG Y, et al. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands: a case study on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China[J]. Chemosphere-Global Change Science, 2000, 2(2): 207–224.
- 30 唐启义, 冯明光. DPS 数据处理系统——实验设计、统计分析及模型优化[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- 31 孙园园, 孙永健, 王锐婷, 等. DNDC 模型对川中丘陵区稻田 CH₄、N₂O 排放的模拟对比分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(6–7): 1003–1010.
- SUN Yuanyuan, SUN Yongjian, WANG Ruiting, et al. Research of tillage-cropping systems on CH₄ and N₂O emission from permanently flooded rice fields in a central Sichuan hilly area of southwest China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(6–7): 1003–1010. (in Chinese)
- 32 夏文建, 周卫, 梁国庆, 等. 稻麦轮作农田氮素循环的 DNDC 模型分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 77–88.
- XIA Wenjian, ZHOU Wei, LIANG Guoqing, et al. Evaluating the validity and sensitivity of the DNDC model to estimate nitrogen cycling in rice-wheat rotation system [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(1): 77–88. (in Chinese)
- 33 张啸林, 潘晓健, 熊正琴, 等. 应用 DNDC 模型分析管理措施对稻麦轮作系统 CH₄ 和 N₂O 综合温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 690–696.
- ZHANG Xiaojian, PAN Xiaojian, XIONG Zhengqin, et al. Effects of farming managements on the global warming potentials of CH₄ and N₂O from a rice-wheat rotation system based on the analysis of DNDC modeling [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 690–696. (in Chinese)
- 34 CUI F, ZHENG X, LIU C, et al. Assessing biogeochemical effects and best management practice for a wheat-maize cropping system using the DNDC model[J]. Biogeosciences, 2014, 11(1): 91–107.
- 35 薛彦东, 任树梅, 杨培岭, 等. 再生水灌溉冬小麦/夏玉米土壤 N₂O 排放 DNDC 模型分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 73–78, 85.
- XUE Yandong, REN Shumei, YANG Peiling, et al. DNDC model analysis of N₂O fluxes in winter wheat/summer maize system with reclaimed water irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 73–78, 85. (in Chinese)
- 36 薛静, 毛萌, 任理. DNDC 模型在曲周试验站的参数灵敏度分析及率定[J]. 中国农业科学, 2013, 46(13): 2695–2708.
- XUE Jing, MAO Meng, REN Li. The parameter sensitivity analysis and calibration of DNDC model in Quzhou agricultural experiment station [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(13): 2695–2708. (in Chinese)
- 37 徐文彬, 刘广深, 洪业汤, 等. DNDC 模型对我国旱地 N₂O 释放的拟合对比分析[J]. 矿物学报, 2002, 22(3): 222–228.
- 38 ZHANG F, QI J, LI F M, et al. Quantifying nitrous oxide emissions from Chinese grasslands with a process-based model[J]. Biogeosciences, 2010, 7(6): 2039–2050.
- 39 LI H, QIU J J, WANG L G, et al. Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat-maize rotation system in China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 135(1–2): 24–33.
- 40 CAI Z C, SAWAMOTO T, LI C S, et al. Field validation of the DNDC model for greenhouse gas emissions in East Asian cropping systems[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(4): 1107–1117.
- 41 勾继, 郑循华, 王明星. 华东地区稻麦轮作农田生态系统 N₂O 排放的模拟研究[J]. 大气科学, 2000, 24(6): 835–842.
- GOU Ji, ZHENG Xunhua, WANG Mingxing. A simulating study of N₂O emission from a rice-wheat rotation ecosystem in Southeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 24(6): 835–842. (in Chinese)
- 42 任万辉. 广州地区稻田甲烷和氧化亚氮排放及模拟研究[D]. 南京: 南京气象学院, 2004.
- 43 HOU H J, PENG S Z, XU J Z, et al. Seasonal variations of CH₄ and N₂O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China[J]. Chemosphere, 2012, 89(7): 884–892.
- 44 PENG S Z, HOU H J, XU J Z, et al. Nitrous oxide emissions from paddy fields under different water managements in southeast China[J]. Paddy and Water Environment, 2011, 9(4): 403–411.
- 45 LI C, FROLKING S E, HARRISS R C, et al. Modeling nitrous oxide emissions from agriculture: a Florida case study[J]. Chemosphere, 1994, 28(7): 1401–1415.