植物营养与肥料学报 2011,17(4):925-933
Plant Nutrition and Fertilizer Science

典型潮土 N_2O 排放的 DNDC 模型田间验证研究

王秀斌,周 卫*,梁国庆,孙静文,夏文建,刘东海
(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,农业部作物营养与施肥重点实验室,北京 100081)

摘要:利用典型潮土 N_2O 排放的田间试验数据对脱氮-分解模型(DNDC)及其参数进行验证。结果表明,DNDC 模型能较好地模拟田间实测到的冬小麦、夏玉米季土壤湿度和土壤日平均地表温度的动态变化。小麦和玉米季土壤 N_2O 排放通量与土壤水分(WFPS)呈显著正相关,与土壤温度相关性不大。田间实测到的 N_2O 排放高峰主要受降水和施肥的影响,在 N_2O 排放峰的峰值和出现时间上模拟值与实测值较接近,但准确地捕捉 N_2O 季节性的排放通量仍需对模型进行修正。通过比较施肥、土壤和田间管理等输入参数的改变对 DNDC 模型进行灵敏性分析,氮肥用量、施肥次数、土壤初始无机氮含量和土壤质地的改变对土壤 N_2O 排放量均很敏感,其中氮肥用量和施肥次数的改变最为敏感。基于当地土壤特性和田间管理的校正,DNDC 模型为评价农田生态系统 N_2O 的排放提供了强有力的工具。

关键词:氧化亚氮排放;DNDC 模型;冬小麦;夏玉米
中图分类号:S181　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-05X(2011)04-0925-09

Field validation of DNDC model for nitrous oxide emission from typical fluvo-aquic soils

WANG Xiu-bin, ZHOU Wei*, LIANG Guo-qing, SUN Jing-wen, XIA Wen-jian, LIU Dong-hai
(*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Beijing 100081, China*)

Abstract: The validities of DeNitrification-DeComposition (DNDC) model and the simulation parameters were examined by using field experiment data obtained from typical fluvo-aquic soils at Hengshui experiment station, Hebei Province. The results show that the DNDC model could be well used for simulating the temporal variations of soil moisture and mean daily temperature at soil surface during winter wheat/summer corn growing seasons. There is significantly positive correlation between soil N_2O flux and soil moisture (water filled pore space), while the correlation between soil N_2O flux and soil temperature is not significant during winter wheat/summer corn growing seasons. The peaks of N_2O emission are mainly affected by rainfall and nitrogen application, and the simulated values are relatively close to the measured ones for peaks of N_2O emission and its appearance time. It is necessary to modify some parameters of the DNDC model for capturing seasonal N_2O emission fluxes precisely. According to sensitivity test on the DNDC model, soil N_2O emission is found to be sensitive to the changes of the amount and time of nitrogen application, soil initial inorganic nitrogen content and soil texture, among which the amount and time of nitrogen application are the most sensitive factors. By modifying some parameters based on the local soil properties and management, the DNDC model could become a powerful tool for estimating N_2O emission from agro-ecosystem.

Key words: nitrous oxide emission; DNDC model; winter wheat; summer corn

收稿日期:2010-11-25　　**接受日期**:2011-02-22
基金项目:国家重点基础研究发展计划课题(2007CB109307);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2010-1)资助。
作者简介:王秀斌(1974—),男,山西人,博士研究生,主要从事养分循环研究。E-mail:wangxb@caas.ac.cn
* 通讯作者 E-mail:wzhou@caas.ac.cn

温室气体引起的全球变暖和臭氧层破坏是当今两大全球环境问题[1]，其中 N_2O 被认为是最重要的温室气体之一。N_2O 的增温效应显著，100 年尺度上单位质量 N_2O 的增温潜势是 CO_2 的 298 倍[2]。土壤特别是农田土壤是全球最主要的 N_2O 排放源，农业土壤 N_2O-N 年排放量占全球总排放的 10%～27%[2]。目前农田尺度下的 N_2O 排放通量是基于静态箱法或 N_2O 连续观测系统的通量监测，主要集中在小麦、玉米、水稻、大豆及蔬菜作物上[3-5]。然而，由于受气候、土壤类型和农业活动的影响[6]，N_2O 排放存在高度的时空变异，仅根据少量的田间点位观测远不能全面和准确地反映出土壤和田间管理等变量的改变对农业土壤 N_2O 释放的影响，非常有必要建立和运用模型加以研究。

DNDC（Denitrification-Decomposition，脱氮-分解模型）模型适用于点位和区域尺度的任何气候带的农业生态系统，是目前国际上较为成功的生物地球化学模型之一[7-10]。DNDC 模型验证是用真实的驱动参数来运转模型，以检验模拟值与实测值的拟合程度。目前该模型在美国、欧洲、日本等国家通过大量田间观测值进行验证，多数模拟结果表明，该模型能够捕捉到农田土壤温室气体排放量和土壤有机碳动态变化的一般规律[11-15]。在我国也有一些研究验证了 DNDC 模型模拟预测生态系统变化的影响[16-21]。本研究以河北省农林科学院衡水试验站的冬小麦/夏玉米轮作区为对象，利用作物整个生长期土壤 N_2O 排放通量、土壤日平均地表温度和土壤湿度等实测数据对 DNDC 系统进行验证和校正；借助于校正后的 DNDC 模型，全面评估施肥、土壤和田间管理等变量的改变对土壤 N_2O 释放的潜在影响，为在区域水平研究氮排放和制定科学合理的减排措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 选用的模型

试验所选用的 DNDC 模型是美国新罕布什尔大学李长生教授基于施肥量、气候条件、土壤特性和农田管理等要素而建立的一种农田生态系统碳、氮循环模型[22]。模型由 6 个子模型构成，以日或小时为时间步长分别模拟土壤气候、农作物生长、有机质分解、硝化、反硝化和发酵过程。土壤气候子模型是由一系列土壤物理函数组成，其功能是由每日气象数据及土壤-植被条件来计算土壤剖面各层的温度、湿度和 Eh；植物生长子模型是根据植物种类、日辐射、气温、土壤水分、土壤氮量和田间管理（如施肥、浇水、犁地和收割等）来预测植物的生长和发育；有机质分解子模型追踪农作物收割后留在农田里的植物残体的命运，分解的有机碳部分转化为 CO_2 进入大气、部分转化为溶解有机碳（DOC），分解的有机氮转化为铵态氮（NH_4^+）；硝化反应子模型根据分解来的 DOC 和 NH_4^+ 模拟硝化细菌的生长和死亡，计算 NH_4^+ 转化为硝态氮（NO_3^-）的生成量及硝化作用的 N_2O 生成量；反硝化作用子模型模拟以每小时为时间步长的反硝化过程，并计算 N_2O 的释放通量。发酵子模型是在土壤淹水条件下模拟甲烷的产生、氧化及传输。

DNDC 模型由点位模型和区域模型两部分组成。在点位模型中，当模拟任一点位上的生物地球化学过程时，需要该点位的气象、土壤和农田管理等输入参数来支持，这些参数代表着驱动此点生态系统运动的基本要素。DNDC 最后输出结果是每日的作物吸 N 量、无机氮库、N_2O、NO 和 N_2 等气体通量以及 50 cm 淋溶损失的氮量。有关模型的结构、方程以及输入和输出参数详见文献[22]。

1.2 试验设计与数据分析

N_2O 排放通量原位观测于 2007 年 10 月至 2008 年 10 月在河北省农林科学院衡水试验站（38.01°N，115.32°E）进行。该区属北温带季风半湿润气候，年平均气温 12.6℃，无霜期 188 d，全年降水多集中在 6～9 月份，2007 和 2008 年降水量分别为 393.4 和 459.7 mm，降水中无机氮浓度为 N 4.45 mg/L。主要种植方式为冬小麦/夏玉米轮作。小麦、玉米灌水次数分别为 4 和 2 次，每次灌水量为 60 mm。供试土壤为潮土，播前 0—20 cm 土壤有机质含量 11.7 g/kg，硝态氮和铵态氮含量分别为 12.14 和 0.76 mg/kg，速效磷 5.8 mg/kg，速效钾 103 mg/kg，pH 8.0，土壤容重 1.40 g/cm^3。

田间试验设 4 个处理：1）习惯施氮，冬小麦和夏玉米氮肥用量分别为 N 300 和 240 kg/hm^2（用 N 300/2 和 N 240/2 表示）；2）氮肥减量，冬小麦和夏玉米氮肥用量分别为 N 210 和 168 kg/hm^2（用 N210/2 和 N168/2 表示）；3）优化施氮，基于作物阶段氮素吸收增加追肥比例和施肥次数，氮肥用量同处理 2（用 N210/3 和 N168/3 表示）；4）对照，不施氮肥（用 N0 表示）。习惯施氮和氮肥减量处理小麦季基肥和拔节肥各占 1/2，玉米季基肥 1/3，大喇叭口肥 2/3。优化施氮处理小麦季基肥，拔节肥和孕穗肥各占 1/3；玉米季基肥占 1/5，大喇叭口肥占 3/5，吐丝肥占 1/5。磷、钾肥均基施。小麦生育期

为 2007 年 10 月 22 日至 2008 年 6 月 12 日,玉米生育期为 2008 年 6 月 19 日至 2008 年 9 月 24 日。

基于原位监测土壤 N_2O 排放通量评估整个生育期内 N_2O 生成排放总量,试验期间每隔 14 d 采集 N_2O 排放通量,且施肥后于第 3、7 和 14 d 加密采集。N_2O 气样采集方法采用原状土柱培育法[23-24]。用内径为 3.2 cm、长 17 cm 管壁带孔的 PVC 管插入土中取 15 cm 原状土柱,研究土柱 N_2O 的生成与排放情况。每个试验小区随机取 6 个土柱,置入 2500 mL 培养罐中,培养罐埋入土壤 15 cm 深以模拟田间土温的昼夜变化。盖上胶塞,密封,培养 24 h,用 50 mL 注射器通过三通将罐内气体充分混匀,然后取气体约 20 mL 放入气样瓶,用 704 胶封口,用 HP6890 型气相色谱仪测定 N_2O 浓度。详细的土壤 N_2O 排放通量、生成排放总量的测定方法和计算公式见文献[25]。在测定土壤 N_2O 排放通量的同时,用培养过后的土壤测定 0—15 cm 内的孔隙含水量。田间土壤温度数据是在每个培养罐附近的土壤 10 cm 土层深度安装土壤温度计获得。日气温、日降雨量通过附近的微型气象监测仪(TRM-ZS1)观测获得。

引进 9.3 版 DNDC(De-Nitrification & De-Composition)模型研究典型潮土 N_2O 排放,利用作物整个生长期土壤湿度、土壤日平均地表温度和土壤 N_2O 排放通量的田间实测数据对 DNDC 系统进行验证和校正。设定小麦和玉米最佳生物量分别为 C 5000 和 7500 kg/hm^2,适当调整 DNDC 模型中的部分参数,使 DNDC 模型的模拟值与田间实测值拟合程度达到最佳。借助于校正后的 DNDC 模型,检测不同参数对 DNDC 模型预测 N_2O 排放量的影响。基础情景(本底值)是根据氮肥减量处理建立的,而替代性情景(测试值)的输入参数是在基础情景其他参数不变的情况下,分别改变其中一个变量,记录土壤 N_2O 排放量的模拟结果(表 1)。其中,氮肥施用次数变为 1 次,小麦季和玉米季均基施; 氮肥施用次数变为 3 次,小麦季是基肥、拔节肥和孕穗肥各 1/3,玉米季是基肥1/5、大喇叭口肥 3/5 和吐丝肥 1/5。

表 1　模型敏感性分析的本底值和替代值

Table 1　The baseline and alternative scenarios for sensitivity tests

参数 Parameters	本底值 Baseline	替代值 Alternative
土壤 pH Soil pH	8.0	7.5, 8.5
灌溉水次数 Times of irrigation	小麦季 Wheat season 4 玉米季 Corn season 2	小麦季 Wheat season: 3,5 玉米季 Corn season: 1,3
土壤质地 Soil texture	粘质壤土 Clay loam	砂土 Sandy loam,壤土 Loam
容重 Bulk density (g/cm^3)	1.4	1.3,1.5
氮肥品种 Nitrogen fertilizer type	尿素 Urea	碳酸氢铵 Ammonia biocarbonate 硝酸铵 Ammonium nitrate
土壤初始无机氮 Soil initial mineral nitrogen content (mg/kg)	小麦季 Wheat season 12 玉米季 Corn season 20	小麦季 Wheat season: 6,24 玉米季 Corn season: 10,40
土壤初始有机碳含量 Soil initial organic carbon content (C kg/kg)	0.006	0.003,0.012
氮肥用量 Amount of nitrogen fertilizer(N kg/hm^2)	小麦季 Wheat season 210 玉米季 Corn season 168	小麦季 Wheat season: 147,300 玉米季 Corn season: 117.6,240
施肥次数 Times of fertilization	2	1,3

2　结果与分析

2.1　土壤湿度和土壤温度的模拟值与田间实测值的对比分析

DNDC 模型是采用土壤孔隙含水率(WFPS)表示土壤湿度,能有效反映出土壤湿度变化对土壤气相和液相扩散速率的影响[26]。典型潮土区冬小麦和夏玉米季模型计算的 0—15 cm 土层平均 WFPS 与田间实测的 WFPS 季节变化趋势和数值十分接近,两者均反映出施肥后灌水、降水量和降水频度变化对土壤湿度的影响(图 1)。但由于模型假设未考虑作物叶片对降水的截留作用[27],忽略了此过程对降水的损失,导致模型高估了土壤湿度。

同样,DNDC 模型模拟了冬小麦和夏玉米季土壤日平均地表温度(10 cm 处)的季节变化,其模拟值和对应的田间实测结果十分接近(图 2),其中冬小麦和夏玉米季土壤日平均地表温度模拟值与

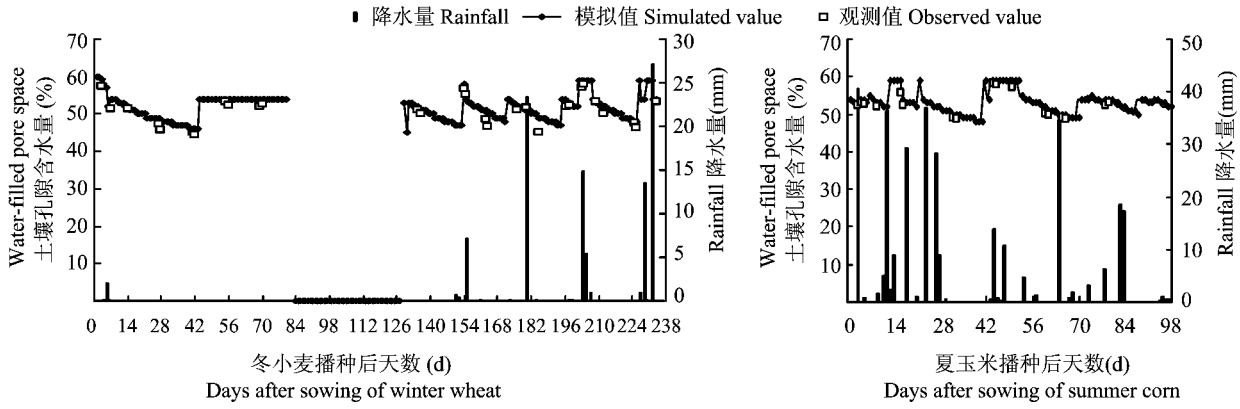

图1 土壤湿度的模拟值与田间实测值的对比分析

Fig. 1 Comparison between the simulated and observed soil moistures

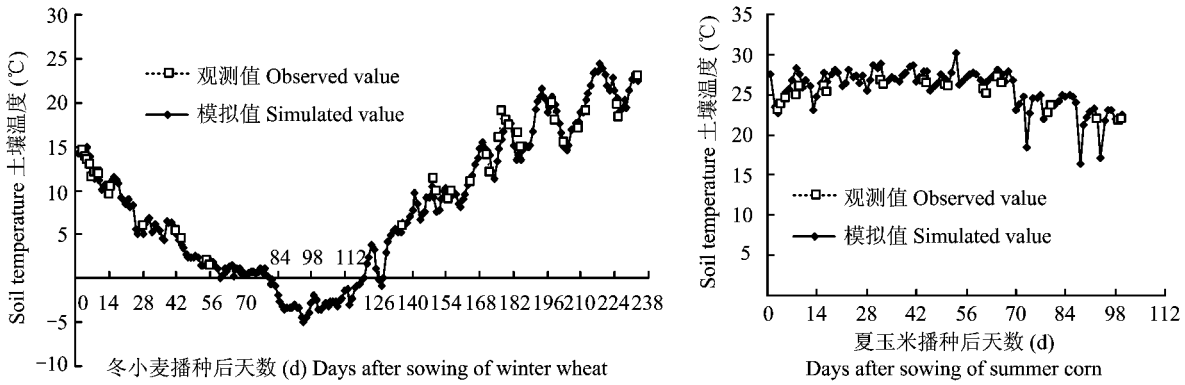

图2 土壤日平均地表温度的模拟值与田间实测值的对比分析

Fig. 2 Comparison between the simulated and observed mean daily temperature at soil surface

实测值的皮尔逊相关系数分别为0.982($n=38$)、0.979($n=22$),相关性均达显著水平($P<0.05$)。

2.2 冬小麦季 N_2O 排放通量的模拟值与田间实测值的对比分析

利用DNDC模型对典型潮土区冬小麦季 N_2O 的排放通量进行了模拟,并与同期实测值进行对比(图3)。田间实测到的 N_2O 排放高峰主要受降雨和施肥的影响。在主要 N_2O 排放峰的峰值和出现时间上模拟值与实测值较接近,其模拟结果基本上捕捉到田间实测到的施氮肥和强降雨后引发的较大 N_2O 排放峰。模型较好地拟合了田间 N_2O 排放通量的季节变化。

为进一步说明模型的拟合效果,对习惯施肥(N300/2)、氮肥减量(N210/2)和优化施氮处理(N210/3)的模拟值与实测值进行相关性分析,模型计算与田间测量在 N_2O 排放通量季节变化上的相关系数分别达0.70,0.83和0.75($n=22$),相关性均达显著水平($P<0.05$),表明田间观测值与模型模拟值具有相似的土壤 N_2O 排放通量季节变化趋势。计算整个冬小麦季实测的日均 N_2O 排放通量,习惯施肥、氮肥减量和优化施氮处理其值分别为N 0.013、0.01和0.008 kg/(hm^2·d),对应的模拟值分别为N 0.014、0.013和0.011 kg/(hm^2·d),两者较接近。其中,优化施氮处理日均 N_2O 排放通量的模拟值与实测值均最低。可见,DNDC模型能较好地捕捉典型潮土区冬小麦季降雨和施肥引发的农田 N_2O 排放峰的峰值和位置,排放峰值比对应的实测值普遍偏高。

2.3 夏玉米季 N_2O 排放通量的模拟值与田间实测值的对比分析

利用DNDC模型对典型潮土区夏玉米季 N_2O 的排放通量进行了模拟,并与同期实测值进行了对比(图4)。田间实测到的 N_2O 排放高峰主要受降水和施肥的影响。在主要 N_2O 排放峰的峰值和出现时间上模拟值与实测值较接近,其模拟结果基本上捕捉到田间实测到的施氮肥和强降雨后引发的较大 N_2O 排放峰。该模型较好地拟合了田间 N_2O 排放通量的生长期变化。

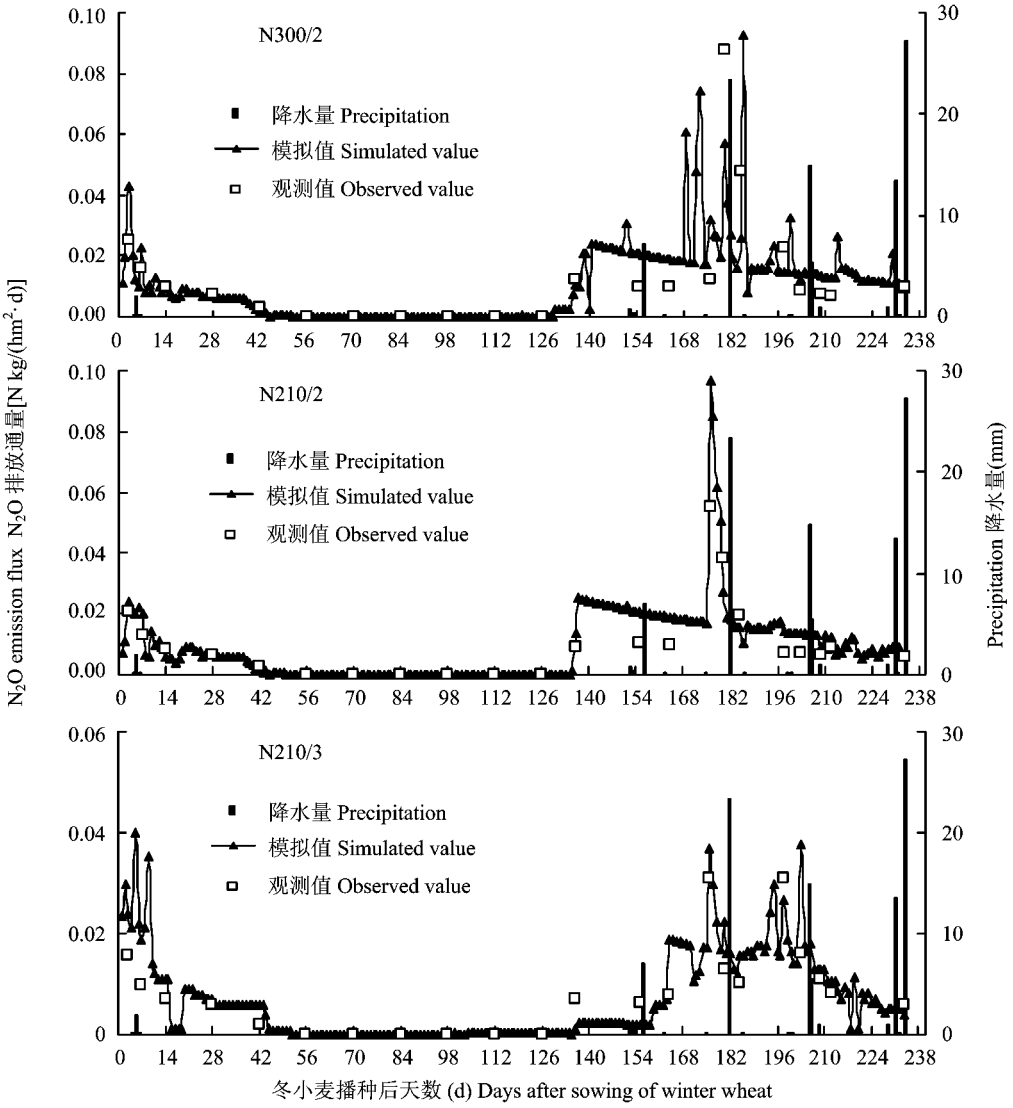

图 3　冬小麦季 N_2O 排放通量模拟值与实测值对比

Fig. 3　Comparison of the simulated and observed values for N_2O emission flux during the winter wheat growing season

为进一步检验模型的拟合效果,对习惯施肥(N240/2)、氮肥减量(N168/2)和优化施氮处理(N168/3)的模拟值与实测值进行相关性分析,模型计算与田间测量在 N_2O 排放通量季节变化上的相关系数分别达 0.79、0.83 和 0.88(n =10),相关性均达显著水平(P < 0.05),表明模型模拟结果与田间观测值具有相似的土壤 N_2O 排放通量季节变化趋势。计算整个夏玉米季实测的日均 N_2O 排放通量,习惯施肥、氮肥减量和优化施氮处理其值分别为 N 0.052、0.041 和 0.039 kg/(hm^2 · d),对应的模拟计算结果分别为 N 0.061、0.055 和 0.044 kg/(hm^2 · d),两者较接近。其中,优化施氮处理日均 N_2O 排放通量的模拟值与实测值均最低。与冬小麦季相比,夏玉米季日均 N_2O 排放通量显著提高。可见,DNDC 模型能较好地捕捉典型潮土区夏玉米季降雨和施肥引发的农田 N_2O 排放峰的峰值和位置,其模拟值具有可行性。

2.4　驱动因子对土壤 N_2O 排放量的影响

在对冬小麦季 N_2O 排放量的模拟中,除了容重与 pH 值两个因子外,其余因子的改变对 N_2O 排放量均很敏感(图 5)。这些分析结果与以往管理因子对土壤氮素损失的灵敏性分析结果相一致[28]。氮肥用量和施肥次数的增加比改变氮肥品种对 N_2O 排放量更为敏感。N_2O 排放量随土壤初始无机氮和灌溉水次数的增加明显增加,土壤初始有机碳含量的增减均能够引起 N_2O 排放量的增减,但是 N_2O 对其增加或降低的幅度并不敏感。土壤质地的改变对 N_2O 排放量也比较敏感,表现为粘壤土 > 壤土 > 砂土。

对夏玉米季 N_2O 排放量的模拟中,氮肥用量、施氮次数、氮肥品种和土壤质地都很敏感(图 5)。

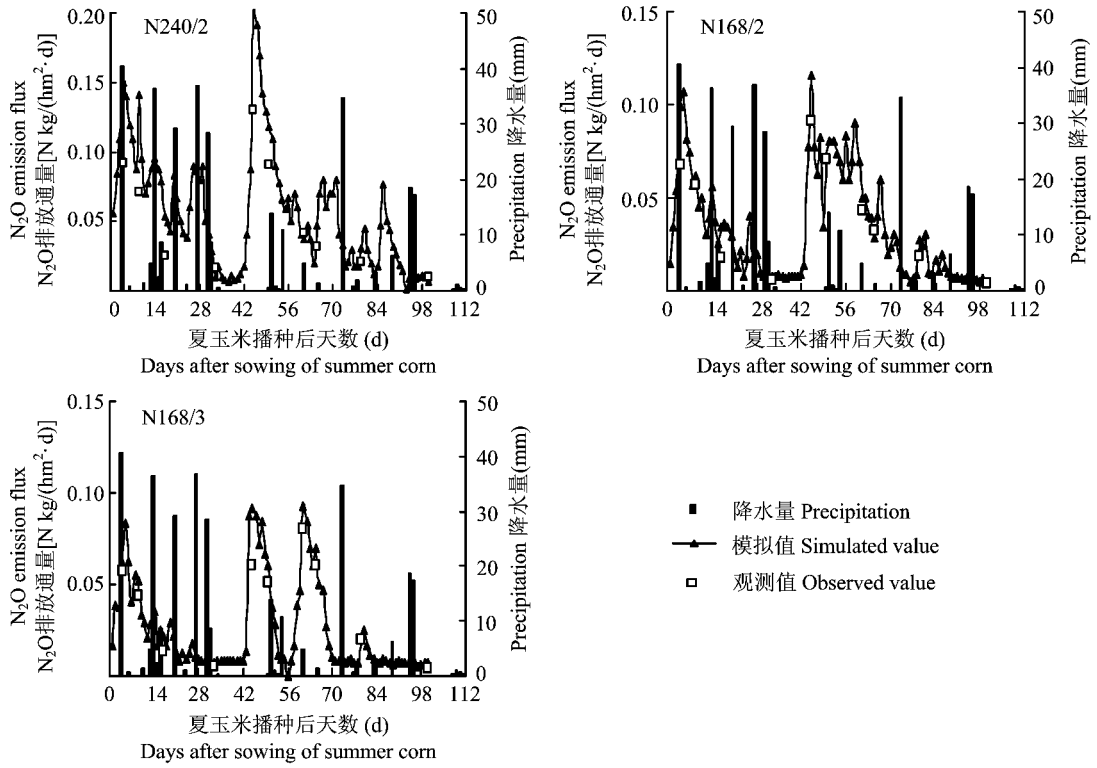

图4 夏玉米季 N_2O 排放通量模拟值与实测值对比

Fig. 4 Comparison of the simulated and observed values for N_2O emission flux during the summer corn growing season

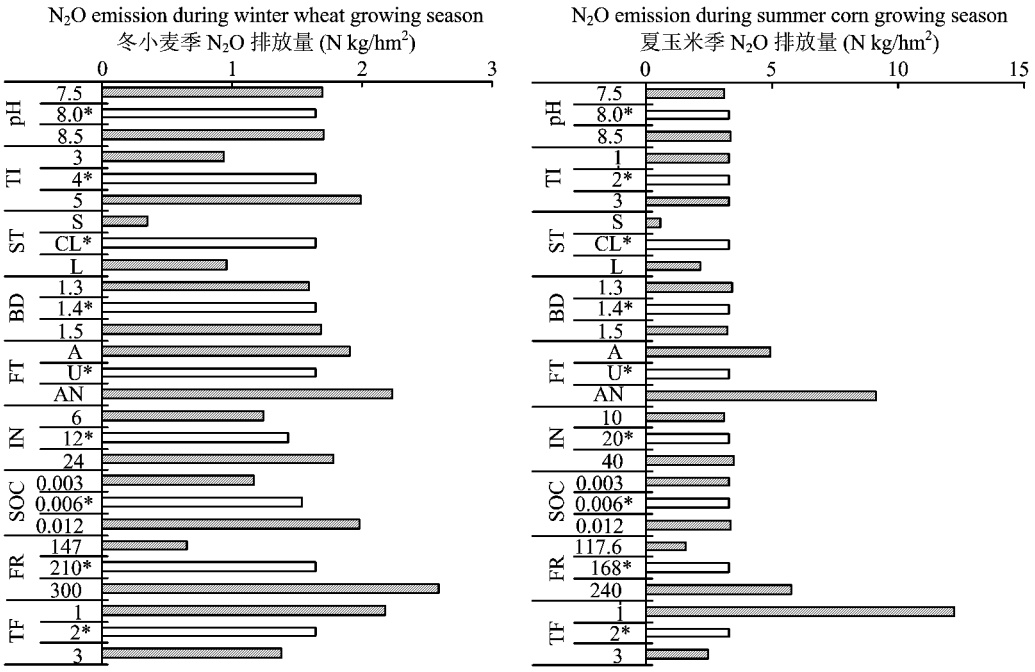

图5 改变施肥、管理、土壤等因素中任一变量对 N_2O 排放量的灵敏性分析

Fig. 5 Results from sensitivity tests to N_2O emission by varying a single fertilizer, management or soil factor in its range commonly observed

[注(Note): TI—灌水次数 Times of irrigation; ST—土壤质地为砂土(S)、壤土(L)和粘质壤土(CL) Soil texture as sandy(S), loam(L) and clay loam(CL); FT—肥料品种为尿素(U)、碳酸氢铵(A)和硝酸铵(AN) Fertilizer type as urea(U), ammonia bicarbonate(A) and ammonium nitrate(AN); BD—土壤容重 Bulk density; IN—土壤初始无机氮 Soil initial mineral N content; SOC—土壤初始有机碳 Initial SOC content; FR—氮肥用量 Fertilizer rate; TF—施肥次数 Times of fertilization; *—本底值 Baseline conditions]

模拟的 N_2O 排放量随氮肥用量的增加明显增加,随施氮次数的增加而降低。氮肥品种改变的模拟结果表现为硝酸铵 > 碳酸氢铵 > 尿素,这与丁洪等[29]研究玉米-潮土系统中不同氮肥品种的 N_2O 排放量结果一致。土壤质地的改变对 N_2O 排放量也比较敏感,表现为粘壤土 > 壤土 > 砂土。N_2O 排放量随土壤初始无机氮、土壤初始有机碳含量的增减均能够引起 N_2O 排放量的增减,但是 N_2O 对其增加或降低的幅度并不敏感。灌溉水次数、容重与 pH 值的改变对 N_2O 排放量不敏感。

3　讨论

模型模拟结果的可信度,需与实测数据相比较才能确定。大量研究表明,DNDC 模型能够较好地评估农业土壤 N_2O 排放总量,但其排放通量由于受气候、土壤特性和农业管理的影响并不总能准确地预测土壤 N_2O 排放峰的峰值和出现时间[14,17,30]。土壤 N_2O 排放峰与降水、施肥之间存在明显的驱动-响应关系,在季节变化上能较好地反映 N_2O 释放通量的动态变化过程[15,21]。本研究发现,小麦季、玉米季土壤 N_2O 排放通量与土壤水分(WFPS)呈显著正相关,与土壤温度相关性不大(表 2)。利用校正后的 DNDC 模型对华北地区冬小麦和夏玉米季 N_2O 的排放通量进行了模拟,结果基本上捕捉到田间实测到的强降雨和施氮肥后引发的 N_2O 排放峰,两者在主要土壤 N_2O 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_2O 排放通量的动态变化。需要指出的是,虽然能够比较准确地模拟该地区土壤 N_2O 排放情况,但模型还存在一些偏差,对土壤 N_2O 排放量模拟普遍偏高。可能原因是,土壤 N_2O 排放通量具有广泛的时空变化和田间观测的复杂性,目前还无法对 DNDC 模型进行绝对验证。

表 2　小麦玉米轮作体系下土壤湿度、土壤温度与 N_2O 排放通量的相关性

Table 2　Correlations between soil moisture, soil temperature and N_2O flux in wheat-corn rotation system

作物 Crops	项目 Items	N_2O 排放通量 N_2O flux			
冬小麦($n=17$)	土壤湿度 Soil moisture	0.53*	0.58*	0.51*	0.56*
	土壤温度 Soil temperature	0.03	0.24	0.11	0.18
夏玉米($n=10$)	土壤湿度 Soil moisture	0.58*	0.75**	0.65*	0.61*
	土壤温度 Soil temperature	0.11	-0.26	-0.34	-0.47

注(Note): * — $P<0.05$; ** — $P<0.01$

模型的灵敏性分析,是检验所有变量中某一变量对模拟结果的影响,而影响最大的某一变量在区域模拟时需仔细考虑。张宇[28]在检验 Crop-DNDC 模型时得出,气候条件和多变的农田管理措施对作物产量和痕量气体排放很敏感。施肥、温度、降水、有机碳、粘粒含量和 pH 值对反硝化速率和 N_2O 排放有显著影响[17,20-21,27]。据报道,化肥用量、化肥类型和施肥时间等都影响着土壤 N_2O 的排放[31-32]。农业土壤 N_2O 排放在不同时间尺度上变化较大,短时间内受农田管理措施和气候变化的影响; 而长期的变异则受土壤本身尤其是土壤有机组成的影响[27,33]。氮肥用量、氮肥品种、灌水量与土壤初始无机氮含量都影响着无机氮的运移; 而硝酸盐的下移会引起对地下水的潜在污染,这在调查与试验中都有相关报道[34-36]。根据本研究目的和当地条件,我们考虑了施肥、土壤和农业管理等变量,这些变量中所有变量因子的制定,则是根据当地土壤的实地调查结果,或是在实际调查的结果上进行调整(比如减量施氮)等综合考虑。结果表明,在冬小麦和夏玉米季氮肥用量、施氮肥次数、氮肥品种、土壤初始无机氮、土壤初始有机碳和土壤质地的改变对土壤 N_2O 排放均很敏感,其中氮肥用量和施肥次数的改变最为敏感; 而灌水次数的改变对冬小麦季土壤 N_2O 排放量敏感,对夏玉米季 N_2O 排放量不敏感,这可能与玉米季降雨频繁、降雨量大有关(图 3 和图 4)。因此,利用 DNDC 模型,明确了典型潮土区冬小麦/夏玉米轮作体系氮肥用量和施肥次数是最为敏感的驱动因子,揭示了农田尺度下减少习惯施氮量 30% 及追加施肥次数(1 次)的优化氮肥管理措施,为实现更大区域氮肥优化管理和环境效应评价提供了依据。

参 考 文 献:

[1] Phillips R L, Podrebarac F. Net fluxes of CO_2, but not N_2O or CH_4, are affected following agronomic-scale additions of urea to prairie and arable soils[J]. Soil Biol. Biochem., 2009, 41: 2011-2013.

[2] IPCC. Climate change 2007: Couplings between change in the climate system and biogeochemistry [R/OL]. http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Ch07.pdf.

[3] Zou J W, Huang Y, Zheng X H *et al*. Quantifying direct N_2O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: Dependence on water regime [J]. Atmos. Environ., 2007, 41: 8030-8042.

[4] Dambreville C, Morvan T, Germon J C. N_2O emission in maize-crops fertilized with pig slurry, matured pig manure or ammonium nitrate in Brittany [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2008, 123: 201-210.

[5] Cao B, He F Y, Xu Q M *et al*. Denitrification losses and N_2O emissions from nitrogen fertilizer applied to a vegetable field [J]. Pedosphere, 2006, 16(3): 390-397.

[6] Liu X J, Mosier A R, Halvorson A D *et al*. Dinitrogen and N_2O emissions in arable soils: Effect of tillage, N source and soil moisture[J]. Soil Biol. Biochem., 2007, 39: 2362-2370.

[7] Li C S, Farahbakhshazad N J, Dan B *et al*. Modeling nitrate leaching with a biogeochemical model modified based on observations in a row-crop field in town[J]. Ecol. Model., 2006, 196: 116-130.

[8] Farahbakhshazad N, Dinnes D L, Li C S *et al*. Modeling biogeochemical impacts of alternative management practices for a row-crop field in Iowa [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2008, 123: 30-48.

[9] Giltrap D L, Li C S, Saggar S. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2010, 136: 292-300.

[10] Smith W N, Grant B B, Desjardins R L *et al*. A tool to link agricultural activity data with the DNDC model to estimate GHG emission factors in Canada [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2010, 136: 301-309.

[11] Pathak H, Li C, Wassmann R. Greenhouse gas emissions from Indian rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model [J]. Biogeosci., 2005, 1: 1-11.

[12] Tonitto C, David M B, Li C S *et al*. Application of the DNDC model to tile-drained Illinois agroecosystems: model comparison of conventional and diversified rotations [J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2007, 78: 65-81.

[13] Beheydt D, Boeckx P, Sleutel S *et al*. Validation of DNDC for 22 long-term N_2O field emissions measurements [J]. Atmos. Environ., 2007, 41: 6196-6211.

[14] Nakagawa Y, Chin Y, Shiono T *et al*. Evaluating the validity and sensitivity of the DNDC model for Shimajiri dark red soil [J]. Jpn. Agric. Res. Q., 2008, 42: 163-172.

[15] Babu Y J, Li C, Frolking S *et al*. Field validation of DNDC model for methane and nitrous oxide emission from rice-based production systems of India [J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2006, 74: 157-174.

[16] 徐文彬,刘维屏,刘广深. 应用DNDC模型分析施肥和耕翻方式变化对旱地土壤 N_2O 释放的潜在影响[J]. 应用生态学报,2001,12(6): 917-922.
Xu W B, Liu W P, Liu G S. Potential effect of fertilizing and tilling on N_2O emission from upland soils analyzed by DNDC model [J]. Chin. J. Appl. Eco., 2001, 12(6): 917-922.

[17] 谢军飞,李玉娥. DNDC模型对北京旱地农田 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 J F, Li Y E. Comparative analysis on measured and DNDC (DeNitrification-DeComposition) modeled N_2O emissions from upland farm in Beijing [J]. J. Agro-Environ. Sci., 2004, 23(4): 691-695.

[18] 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 Biogeochem.. Cycl., 2003, 17(4): 1-10.

[19] Tang H J, Qiu J J, van Ranst E *et al*. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC Model [J]. Geoderma, 2006, 134: 200-206.

[20] Wang L G, Qiu J J, Tang H J *et al*. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China [J]. Geoderma, 2008, 147: 47-55.

[21] Li H, Qiu J J, Wang L G *et al*. Modeling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat-maize rotation system in China [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2010, 135: 24-33.

[22] 李长生. 生物地球化学的概念与方法—DNDC模型的发展[J]. 第四纪研究,2001,21(2): 89-99.
Li C S. Biogeochemical concepts and methodologies: development of the DNDC model [J]. Quat. Sci., 2001, 21(2): 89-99.

[23] Mahmood T, Tahir G R, Malik K A. Denitrification losses from an irrigated sand-clay loam under a wheat-maize cropping system receiving different fertilizer treatments [J]. Biol. Fert. Soils, 1998, 26: 35-42.

[24] Mosier A R, Guenzi W D, Schweizer E E. Soil losses of dinitrogen and nitrous oxide from irrigated crop in northeastern Colorado [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1986, 50: 344-348.

[25] 王秀斌,梁国庆,周卫,等. 优化施肥下华北冬小麦/夏玉米轮作体系农田反硝化损失与 N_2O 排放特征[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(1): 41-48.
Wang X B, Liang G Q, Zhou W *et al*. Effect of optimized nitrogen application on denitrification losses and N_2O emissions from soil in wheat/summer corn rotation system in North China [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(1): 41-48.

[26] Williams E J, Hutchinson G L, Fehsenfeld F C. NOx and N_2O emissions from soil [J]. Glob. Biogeochem. Cycl., 1992, 6: 351-388.

[27] Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I. Model structure and sensitivity [J]. J. Geophys. Res., 1992, 97 (D9): 9759-9776.

[28] Zhang Y, Li C S, Zhou X J *et al*. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture [J]. Ecol. Model., 2002, 151: 75-108.

[29] 丁洪,王跃思,李卫华. 玉米-潮土系统中不同氮肥品种的反硝化损失与 N_2O 排放量[J]. 中国农业科学,2004,37(12): 1886-1891.
Ding H, Wang Y S, Li W H. Denitrification losses and N_2O emission from different nitrogen fertilizers applied to maize-fluvo-aquic soil system [J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(12): 1886-1891.

[30] Desjardins R L, Pattey E, Smith W N *et al*. Multiscale estimates of N_2O emissions from agricultural lands[J]. Agric. For. Meteorol., 2010, 150: 817-824.

[31] 勾继,郑循华,王明星,李长生. 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.
Gou J, Zheng X H, Wang M X, Li C S. A simulating study of N_2O emission from a rice-wheat rotation ecosystem in Southeast China [J]. Chin. J. Atmos. Sci., 2000, 24(6): 835-842.

[32] Grant B, Smith W N, Desjardins R *et al*. Estimated N_2O and CO_2 emissions as influenced by agricultural practices in Canada [J]. Clim. Change, 2004, 65: 315-332.

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

[34] Liu G D, Wu W L, Zhang J. Regional differentiation of non-point source pollution of agriculture-derived nitrate nitrogen in groundwater in northern China [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2005, 107: 211-220.

[35] Zhao R F, Chen X P, Zhang F S *et al*. Fertilization and nitrogen balance in a wheat-maize rotation system in North China [J]. Agron. J., 2006, 98: 938-945.

[36] Ju X T, Xing G X, Chen X P *et al*. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 2009, 106: 3041-3046.