

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.014

# 再生水灌溉冬小麦/夏玉米土壤 N<sub>2</sub>O 排放 DNDC 模型分析\*

薛彦东 任树梅 杨培岭 牛永涛 邹其会

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 基于冬小麦/夏玉米轮作体系再生水灌溉田间试验数据对 DNDC 模型及其参数进行验证,以再生水灌溉条件下 N<sub>2</sub>O 排放量与无机氮肥 N<sub>2</sub>O 施用条件下 N<sub>2</sub>O 排放量的比为 1.14~2 之间为依据,假定再生水中氮素与土壤中氮素对 N<sub>2</sub>O 排放的贡献效应之比为 1:1、1.7:1、2:1,对模型在再生水灌溉条件下土壤 N<sub>2</sub>O 排放的适用性进行了定量评价。结果表明, DNDC 模型较好地描述再生水 ( $r=0.716$ ,  $n=29$ ,  $P<0.01$ ) 和地下水 ( $r=0.703$ ,  $n=29$ ,  $P<0.01$ ) 灌溉处理土壤表层水分、地下水灌溉处理土壤 5 cm 温度 ( $r=0.89$ ,  $n=35$ ,  $P<0.01$ ) 的动态变化。模型能够捕捉到灌溉、降雨和施肥等事件所引起的 N<sub>2</sub>O 排放峰值,但是实测值往往滞后于模拟值,说明模型还无法精确预测单个时间结点的 N<sub>2</sub>O 排放通量。当再生水中氮素有效性是无机氮肥中的 1.7 倍时,模型模拟的 N<sub>2</sub>O 累积排放量 (1.84 kg/hm<sup>2</sup>) 与实测值 (1.83 kg/hm<sup>2</sup>) 最为接近,表明再生水中具有更高的氮素有效性,模型适用于短期再生水灌溉条件下的土壤 N<sub>2</sub>O 排放总量的预测。

**关键词:** 冬小麦/夏玉米 再生水灌溉 N<sub>2</sub>O 排放 DNDC 模型

**中图分类号:** S273.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0073-06

## DNDC Model Analysis of N<sub>2</sub>O Fluxes in Winter Wheat/Summer Maize System with Reclaimed Water Irrigation

Xue Yandong Ren Shumei Yang Peiling Niu Yongtao Zou Qihui

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The validities of Denitrification – Decomposition (DNDC) model and the simulation parameters were examined by using field experiment data obtained from a wheat/maize rotation system. Based on the differences between N availabilities in reclaimed water and inorganic N fertilizer, three scenarios (1:1, 1.7:1, 2:1) were hypothesized to evaluate the feasibility about simulating nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission in soil irrigated with reclaimed water by DNDC model. The results showed that DNDC model performed well in verifying the temporal variations of soil moisture under reclaimed water ( $r=0.716$ ,  $n=29$ ,  $P<0.01$ ) and ground water irrigation ( $r=0.703$ ,  $n=29$ ,  $P<0.01$ ), and mean daily temperature ( $r=0.89$ ,  $n=35$ ,  $P<0.01$ ) at soil surface under ground water irrigation. The peaks of N<sub>2</sub>O induced by irrigation, rainfall and fertilization events were detected by DNDC model. However, the measured N<sub>2</sub>O fluxes generally lagged behind the simulated fluxes, so the performance of DNDC model were not satisfied in simulating N<sub>2</sub>O fluxes. The measured and estimated N<sub>2</sub>O production was 1.84 kg/hm<sup>2</sup> and 1.83 kg/hm<sup>2</sup> under scenario 1.7:1, indicating that N in reclaimed water had higher availability than that in fertilizer, and DNDC performed well for evaluating cumulative N<sub>2</sub>O emissions on short-term reclaimed water irrigation.

**Key words:** Winter wheat/summer maize Reclaimed water irrigation N<sub>2</sub>O emission DNDC model

收稿日期: 2012-09-12 修回日期: 2013-01-21

\* 国家自然科学基金资助项目(51279204, 50979107)

**作者简介:** 薛彦东, 博士生, 主要从事再生水灌溉对温室气体排放影响研究, E-mail: xueyandong1104@yahoo.cn

**通讯作者:** 任树梅, 教授, 博士生导师, 主要从事再生水回用对水土环境影响研究, E-mail: renshumeni@126.com

## 引言

再生水已成为干旱半干旱缺水地区尤其是大中城市的周边进行农业灌溉的重要水源保障<sup>[1-2]</sup>。然而,水质问题目前仍然是再生水利用的核心问题之一。与地下水相比,城市工业/生活污水经过二级处理后仍含有一定浓度的养分,若利用合理,则可以提高土壤肥力,减少化肥使用量,促进农作物生长。但是,再生水中除部分养分元素外还含有一定量的盐分、悬浮固体颗粒和细菌等,若利用不合理,则可能引起诸多环境风险<sup>[3]</sup>。

再生水灌溉易导致土壤硝化细菌数量的增加,使土壤中  $\text{NO}_2^-$  出现累积<sup>[4-5]</sup>。另一方面,再生水中含有的有机质能够刺激微生物活性,促进厌氧细菌的生长,进而促进反硝化作用<sup>[6-7]</sup>,造成  $\text{N}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的损失<sup>[8]</sup>。虽然再生水灌溉显著增加土壤反硝化细菌活性,但是反硝化速率与未灌溉土壤之间差异不显著<sup>[9]</sup>。总体来讲,再生水灌溉导致的土壤气态氮素损失量相对较小,主要受到水质、田间管理和土壤条件等因素的影响<sup>[10-12]</sup>。

探索了解再生水中的氮素在饱和-非饱和土壤中运动及转化的情况下,建立合理的数学物理模型,是目前再生水问题研究的发展方向。Xue 等<sup>[13]</sup>通过室内试验建立了再生水灌溉条件下土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放量与充水孔隙度的数值关系。但是,构建的经验数学模型仍然有待完善,暂时无法指导生产实践。DNDC (Denitrification - Decomposition) 模型是目前公认的模拟生物地球化学循环最为成功的模型之一<sup>[14]</sup>。然而,模型中未考虑再生水、微咸水等特殊

水源对  $\text{N}_2\text{O}$  产生过程的影响。为此,本文考虑再生水中氮素与无机肥料中氮素有效性的差异,设置不同比例,将再生水问题引入 DNDC 模型中,根据田间观测数据与模型模拟结果间的对比分析,验证模型是否适用于再生水灌溉条件的土壤  $\text{N}_2\text{O}$  模拟与预测。

## 1 模型建立

### 1.1 模型的选择

DNDC 模型由 6 个子模型构成,分别模拟土壤气候、农作物生长、土壤有机碳分解、硝化、反硝化、发酵过程。各子模块的原理及功能参照文献<sup>[14]</sup>。

### 1.2 模型的假设

DNDC 模型中没有专门针对再生水和咸水/微咸水等非常规水源的模块,因此如何将再生水这一含有一定养分的特殊水源转化成模型识别的通用输入项,是本文需要解决的问题。

从表 1 可以看出,再生水灌溉条件下,土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放系数在 0.71% ~ 3.1% 之间变化,再生水灌溉导致的  $\text{N}_2\text{O}$  排放是清水灌溉的 1.14 ~ 2 倍。因此,为了将再生水中所含养分的问题在 DNDC 模型中体现出来,本文假设再生水中的氮素与无机肥中的氮素对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的影响所发挥的效力不同,按照再生水中氮素与土壤中氮素对  $\text{N}_2\text{O}$  排放的贡献效应之比是 1:1、1.7:1、2:1 的 3 种情景将再生水中的氮素折算成无机氮肥,输入至 DNDC 的施肥子模块中。根据田间试验的灌溉制度,3 种情景每次再生水灌溉相当于为土壤分别带入了 12.1、20.57 和 24.2  $\text{kg}/\text{hm}^2$  的氮肥。

表 1 再生水和清水灌溉条件下土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放系数文献中结果

Tab. 1 Results of  $\text{N}_2\text{O}$  loss ratio in soils receiving reclaimed water and fresh water from published papers

| 施肥量  | 种类  | 作物 | 土壤质地     | 试验类型 | $\text{N}_2\text{O}$ 排放系数/% | 水源   | 来源     |
|--|---|----|----------|------|-----------------------------|------|--------|
| 180 mg/L   | 液态肥   | —  | 热带腐殖质黑粘土 | 室内   | 3.10                        | 再生水  | 文献[4]  |
|  |   |    |          |      | 2.70                        | 清水   |        |
| 110 mg/kg 的 $\text{NO}_3^-$ -N 和<br>120 mg/kg $\text{NH}_4^+$ -N | 含 $\text{KNO}_3$ 和<br>( $\text{NH}_4$ ) <sub>2</sub> $\text{SO}_4$ 肥料 | —  | 热带腐殖质黑粘土 | 室内   | 1.50                        | 再生水  | 文献[5]  |
|  |   |    |          |      | 0.70                        | 清水   |        |
| 200 $\text{kg}/\text{hm}^2$                                      | 尿素  | 水稻 | 潜育土      | 田间   | 0.71                        | 再生水  | 文献[18] |
|  |   |    |          |      | 0.52                        | 清水   |        |
| 175 $\text{kg}/\text{hm}^2$                                      | 猪粪  | 土豆 | 粘壤土      | 田间   | 2.70                        | 处理污水 | 文献[19] |
|  |   |    |          |      | 2.10                        | 清水   |        |

再生水灌溉除单纯为土壤带入一定量的养分以外,还可能通过改变土壤微生物活性进而影响  $\text{N}_2\text{O}$  的排放<sup>[15]</sup>。研究结果证实再生水灌溉对土壤微生物活性的影响主要与土壤本身的有机质含量有关<sup>[15-17]</sup>。然而, DNDC 模型中无法体现再生水灌溉对土壤微生物的影响。本文将再生水灌溉对土壤微

生物的影响简化为再生水灌溉对土壤有机质含量的影响,根据田间试验结果,分别在模型的土壤参数子模块中输入再生水灌溉处理(11.7  $\text{g}/\text{kg}$ )和地下水灌溉处理(13.5  $\text{g}/\text{kg}$ )的土壤有机质含量。

### 1.3 模型参数设置

模型验证所需的试验期间气象数据(每日最高

气温、最低气温、降水量)、土壤属性数据、农作物种类、轮作制度以及田间管理措施等初始数据均为实验站实际观测获得。

#### 1.4 试验设计及数据采集

试验地位于北京市通州区永乐店农业节水试验站(39°20'N,114°20'E)。试验区尺寸为3 m×4 m。供试冬小麦和玉米品种分别为矮抗58和蠡玉16号。研究区多年平均日照时数为2 459 h,平均气温

为11.5℃,年平均降水量为565 mm,无霜期185 d。研究区表层土壤(0~20 cm)理化性质:pH值为8.7,电导率为1.21 dS/m,总氮质量比为0.9 g/kg,有机质质量比为11.7 g/kg, $NH_4^+$ -N质量比为39.55 mg/kg, $NO_3^-$ -N质量比为53.15 mg/kg,容重为1.36 g/cm<sup>3</sup>,质地为壤土。灌溉用再生水取自高碑店污水处理厂,该厂的二级出水和灌溉地下水水质指标见表2。

表2 再生水和地下水水质参数

Tab.2 Water quality parameters of reclaimed water and groundwater

| 类型  | pH 值      | $NO_3^-$ -N 质量浓度    | $NH_4^+$ -N 质量浓度    | 总氮质量浓度              | 生化需氧量               | 化学耗氧量               |
|-----|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|     |           | /mg·L <sup>-1</sup> | /mg·L <sup>-1</sup> | /mg·L <sup>-1</sup> | /mg·L <sup>-1</sup> | /mg·L <sup>-1</sup> |
| 再生水 | 7.7±0.03  | 13.36±11.84         | 0.46±0.22           | 24.2±0.84           | 3.88±0.88           | 16.73±3.38          |
| 地下水 | 7.95±0.15 | 0.05±0.05           | 0.43±0.37           | 0.32±0.21           |                     |                     |

冬小麦/夏玉米季田间试验共设2个灌溉处理,分别为再生水灌溉(RW)和地下水灌溉(CK),每个处理3个重复。冬小麦于2010年10月15日播种,2011年6月21日收获,生育期251 d;设计灌水4次,灌水定额为500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,于抽穗期追施尿素1次,追肥方式为表层撒施,追肥定额为140 kg/hm<sup>2</sup>。灌水时间分别为越冬水(2010年11月28日)、起身拔节水(2011年4月2日)、抽穗水(2011年5月6日,同时进行追肥)、灌浆水(2011年5月23日)。夏玉米于2011年7月5日播种,10月16日收获,生育期为103 d。期间追施尿素2次,追肥方式为表层撒施,追肥定额为80 kg/hm<sup>2</sup>,分别于2011年8月15日和2011年9月22日进行。夏玉米于2011年9月22日进行灌溉,灌水定额为500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,其他生育阶段由于降雨充沛,墒情良好,根据实际情况未进行灌溉。冬小麦和夏玉米的灌水方式均为地面管灌。

所用作物-土壤系统CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O排放的测定装置由0.5 m×0.5 m的方形采样底座和高度为0.5 m的不锈钢采样箱组成,箱体顶部及四周封闭。采样底座在作物播种之前插入每个测坑正中央,然后以土密封固定,箱体内还设有2个风扇用来混匀箱内气体。采样在9:00~11:00进行,这一时段土壤温度最接近日平均温度并且操作性强。罩箱后,一般分别在0、10、20、30 min用带有三通阀的聚丙烯医用注射器抽取箱内气体40 mL注入集气瓶,采集后的样品送往实验室进行分析。气体样品分析采用HP7890A型气相色谱仪测定。通量计算参照郑循华等<sup>[20]</sup>的方法。

气象资料(包括降水量、最高温度、最低温度等)由试验站内自动气象站获取。灌溉用再生水水质统一送至PONY测试技术有限公司进行检测,测试指标包括pH值、生化需氧量、化学耗氧量、总氧

质量浓度、 $NO_3^-$ -N质量浓度、 $NH_4^+$ -N质量浓度。土壤表层(0~10 cm)含水率采用取土干燥法测得。土壤表层(0~10 cm)温度利用JM624型便携式数字温度仪测定。

## 2 模型验证

### 2.1 土壤表层充水孔隙度

冬小麦/夏玉米季模型计算的土壤表层(0~10 cm)平均充水孔隙度与田间实测的充水孔隙度季节变化趋势和数值较为接近(图1),再生水灌溉和地下水灌溉处理的Pearson双侧检验的相关性系数分别为0.716和0.703( $n=29$ ),相关性达到极显著水平( $P<0.01$ )。2个处理均反映出施肥、灌溉、降水量和降水频度变化对土壤湿度的影响。

### 2.2 土壤表层温度

由于田间试验并未对土壤温度进行分区观测,仅在地下水灌溉处理田块安放地温采集装置,因此分析数据选用地下水灌溉处理与模型模拟计算结果进行对比。结果显示,DNDC模型结果较好地模拟了冬小麦/夏玉米季土壤日平均地表(0~5 cm)温度的季节变化(图2),试验观测期土壤日平均地表温度模拟值与实测值的Pearson双侧检验的相关性系数为0.89( $n=35$ ),相关性达到极显著水平( $P<0.01$ )。由此可见,DNDC模型能够较好地反映本试验中施肥后灌水、降水量和降水频度变化对土壤水分的影响,模型预测的土壤温度较为符合实际情况。

## 3 模型分析

### 3.1 冬小麦/夏玉米季N<sub>2</sub>O排放通量模拟值与实测值对比分析

田间观测的N<sub>2</sub>O排放峰值主要与降雨、灌溉和

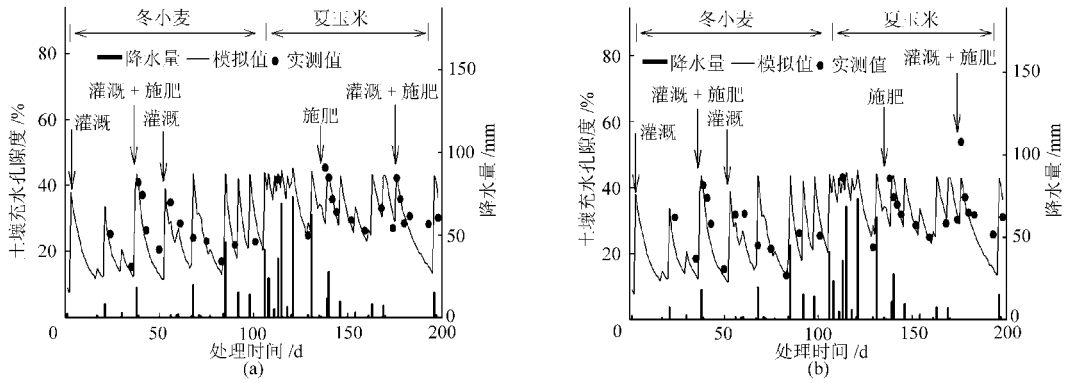


图1 土壤充水孔隙度的模拟值与田间实测值的对比

Fig.1 Comparison between the measured and observed filled soil moistures under reclaimed water and groundwater irrigation

(a) 再生水处理 (b) 地下水处理

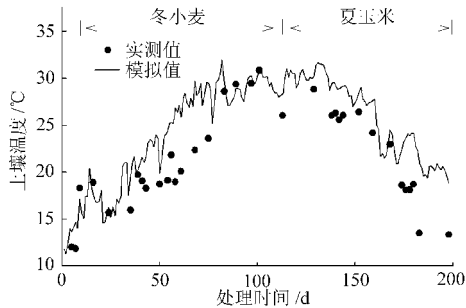


图2 地下水灌溉处理土壤温度的模拟值与田间实测值的对比

Fig.2 Comparison between the measured observed values of soil temperature under groundwater irrigation

施肥等农田管理措施密切相关。本试验模拟结果基本上捕捉到了由灌溉、施氮肥和降雨而引发的较大 $N_2O$ 排放峰值。如图3所示,对于RW处理,图3a~3c中冬小麦灌溉返青拔节水(4月2号)时,模拟峰值分别为10.98、13.45和14.52  $g/(hm^2 \cdot d)$ ,较实测值(10.17  $g/(hm^2 \cdot d)$ )分别高8.0%、32.3%和42.7%,并且模拟峰值与实测峰值均出现在灌溉后的第3天;灌抽穗水表施尿素(5月6日)时,模型响应迅速,在灌水和施肥的第2天即达到峰值,不同情景的模拟峰值是实测峰值(33.8  $g/(hm^2 \cdot d)$ )的2倍以上;灌浆水(5月23日)时,模拟峰值与实测峰值同时出现在事件发生后的第2天,且各情景之间无显著差异;夏玉米季,在8月15日施肥后,

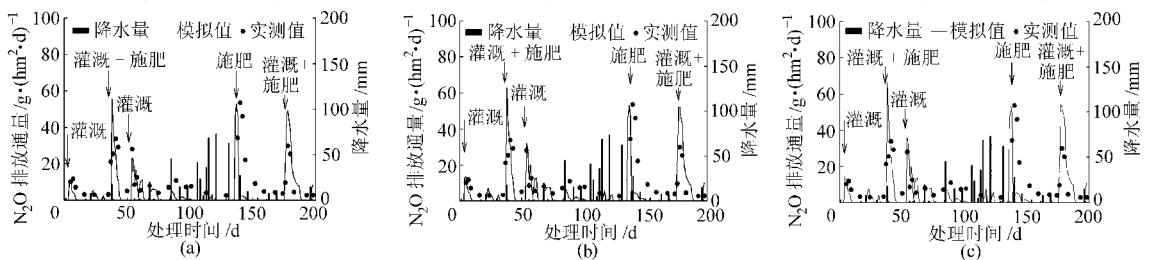


图3 再生水灌溉条件下 $N_2O$ 排放通量实测值与DNDC模拟值对比

Fig.3 Measured vs estimated  $N_2O$  fluxes from soils under reclaimed water irrigation

(a) 1:1 (b) 1:1.7 (c) 1:2

模拟峰值出现在施肥后的第2天,实测峰值则较为滞后,但是不同情景的 $N_2O$ 排放峰值与实测值之间极为接近,相差小于0.1%;9月22日灌溉施肥后,模拟峰值与实测峰值同步,但3种情景的模拟峰值均高出实测值(29.8  $g/(hm^2 \cdot d)$ )的40%以上。

如图4所示,对于CK处理,冬小麦灌溉返青拔节水(4月2号)时,实测峰值滞后且略高于模拟峰值;冬小麦灌抽穗水表施尿素(5月6日)时,实测峰值(27.2  $g/(hm^2 \cdot d)$ )较模拟峰值低24.9%,且滞后3d出现;灌浆水(5月23日)时,实测峰值出现在第2天,较模拟峰值提前1d。夏玉米季在8月15日施肥后,实测峰值和模拟峰值分别为36.2和53  $g/(hm^2 \cdot d)$ ;在9月22日施肥灌水后,实测峰值为23.7  $g/(hm^2 \cdot d)$ ,仅为模拟峰值的1/2。

从模型模拟的结果与实测值比较可以看出,在灌溉施肥同时进行,模型对于农田 $N_2O$ 排放通量峰的模拟普遍偏大(图3、4),而对于无农田措施及降雨的时期,DNDC模拟的结果则往往要比实测值小。为了进一步评估DNDC对于冬小麦/夏玉米轮作农田 $N_2O$ 排放的拟合效果,进一步对实测值与模拟值进行相关性分析,RW处理3种情景和CK处理 $N_2O$ 排放通量模拟值与实测值的相关系数分别为0.485、0.505、0.51( $n=37, P<0.01$ )和0.517( $n=$

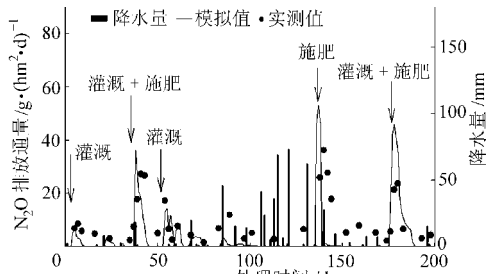


图4 试验期间地下水灌溉 $N_2O$ 排放通量实测值与DNDC模拟值对比

Fig. 4 Measured vs estimated  $N_2O$  fluxes from soils under groundwater irrigation

37,  $P < 0.01$ ), 均达到了显著相关, 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。但是, 由于模型对于灌溉、施肥事件的响应较快, 使得 $N_2O$ 排放通量在2 d之内达到峰值然后迅速下落, 在3~5 d内迅速降到较低的事件发生前的平均水平, 而实测的峰值通常会在3~5 d内达到, 并且回落速度也较缓慢, 这种不同步性导致了分析模拟值与实测值吻合性的时候出现误差, 因此模型尚不能精确预测单个时间点上的土壤 $N_2O$ 排放通量。

### 3.2 不同情景下冬小麦/夏玉米季 $N_2O$ 累积排放量对比分析

利用DNDC模型对再生水灌溉条件下不同情景的冬小麦/夏玉米季 $N_2O$ 累积排放量进行模拟, 并与田间实测值进行对比, 3种情景下模型计算的 $N_2O$ 累积排放量分别为1.4、1.84和2.0  $kg/hm^2$ , 其中当再生水中的氮素与土壤中氮素对 $N_2O$ 排放的贡献相同时(1:1)模拟值略低于实测值, 当再生水中的氮素与土壤中氮素对 $N_2O$ 排放的贡献为1.7:1情景时模拟值与实测值最为接近, 当再生水中的氮素与土壤中氮素对 $N_2O$ 排放的贡献为2:1情景时模拟值高于实测值。由此可见, 再生水中的氮素对土壤 $N_2O$ 排放的影响并不能简单等同于等量无机肥料中的氮素, 而是具有更高的有效性, 进而导致了更高的 $N_2O$ 排放量。

## 4 讨论

目前, 已有较多研究针对DNDC模型在世界各地适用性的报道。Li等<sup>[21]</sup>利用DNDC模型模拟黄淮海平原冬小麦玉米轮作系统中耕作管理实践对温室气体排放的影响。结果发现气温、起始有机质、耕作方法、加入土壤中的有机质对 $CO_2$ 和 $N_2O$ 排放量和对气候变暖有显著影响。Abdalla等<sup>[22]</sup>探讨DNDC模型应用于爱尔兰农业的可能性。结果表明, 将模型用于评估农业管理的影响是有前提的, 使

用DNDC模型不能够很好描述农田的 $N_2O$ 排放通量, 模型模拟的精度差的原因是DNDC过高估计了充水孔隙度(WFPS)和起始土壤有机碳含量。Xu等<sup>[23]</sup>研究发现每年非生长季 $N_2O$ 损失占总损失量的40%, 而且在中国半干旱草地的春秋季节对 $N_2O$ 损失起到重要作用, 并认为DNDC 7.2版模型显著低估了春秋季节的 $N_2O$ 损失, 并通过硝化作用子模块的三次修改, 使修正过的DNDC的版本更适于模拟 $N_2O$ 季节变化趋势。李虎等<sup>[24]</sup>通过研究认为DNDC模型较好地模拟了冬小麦/夏玉米轮作系统作物的产量、氮素淋失的动态变化规律。谢军飞等<sup>[25]</sup>认为模型低估了干旱期和非农业活动期农田的 $N_2O$ 排放通量, 但总的来说, 模拟和实测的总量相差不大。综上所述, 尽管模型模拟过程中存在问题, 但总体上认为应用DNDC模型模拟华北平原地区农田生态系统的氮素迁移转化以及估算温室气体排放总量是可行的。

目前并未见有关再生水灌溉对于土壤温室气体排放影响的报道, 但随着再生水利用量的逐年提高, 亟待对北方干旱半干旱地区再生水灌溉农田的温室气体排放量进行估算, 通过模型预测未来再生水灌溉地区的温室气体排放贡献率, 为合理使用再生水提供科学依据。本文通过假设再生水中氮素与无机氮肥中氮素有效性的差异, 将再生水中的氮素与土壤中氮素对 $N_2O$ 排放的贡献比设置为1:1、1.7:1、2:1, 对模型是否适用于再生水灌溉条件下土壤 $N_2O$ 排放的预测进行了定量评价。结果表明, 当再生水中的氮素与土壤中氮素对 $N_2O$ 排放的贡献比设置为1.7:1时, 模型模拟 $N_2O$ 的累积排放量精度最高。这一方面证实了再生水中的氮素具有更高的有效性。Xue等<sup>[13]</sup>在之前的室内试验中研究也发现再生水与土壤/肥料中的氮素间二者通过共同作用的方式影响土壤的 $N_2O$ 排放。另一方面, 印证了将再生水引入模型所进行假设条件的合理性, 说明通过合理地处理再生水中养分, DNDC模型能够适用于短期再生水灌溉条件下土壤 $N_2O$ 排放总量估计。

试验期间的 $N_2O$ 排放与灌溉、降水和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 $N_2O$ 排放通量的动态变化过程<sup>[26]</sup>, 但是灌溉/施肥事件发生后, 模型模拟的 $N_2O$ 排放通量峰值普遍偏高, 而无农田管理措施介入时, 模型的模拟值则普遍偏低。对于土壤 $N_2O$ 排放通量的模拟, 由于受气候、土壤特性和农业管理的影响并不是总能准确地预测排放峰的峰值和出现时间, 这与已有的其他研究结果一致<sup>[22, 27~28]</sup>。

## 5 结论

(1) DNDC 模型对于再生水灌溉、施肥等农田管理事件以及降雨等自然事件发生条件下土壤  $N_2O$  的动态变化模型均能够捕捉到,但是由于模拟值与实测值之间存在不同步性导致模型不能够很好地描述单个时间点上的  $N_2O$  排放通量。

(2) 当再生水中的氮素与土壤中氮素对  $N_2O$  排放的贡献比设置为 1.7:1 时, DNDC 模型模拟的  $N_2O$  累积排放量精度最高,说明模型能够模拟短期再生水灌溉条件下土壤  $N_2O$  排放总量,但是对于长期再生水灌溉条件下北京地区旱地农田  $N_2O$  排放通量估算上仍有待进一步验证。

## 参 考 文 献

- 1 黄冠华. 再生水农业灌溉安全的有关问题研究[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(1): 26~35.  
Huang Guanhua. The safety use of treated waste water for irrigation in agriculture[J]. Review of China Agricultural Science of Technology, 2007, 9(1): 26~35. (in Chinese)
- 2 杨林林, 杨培岭, 任树梅, 等. 再生水灌溉对土壤理化性质影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 82~85.  
Yang Linlin, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Experimental studies on effects of reclaimed water irrigation on soil physicochemical properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 82~85. (in Chinese)
- 3 Toze S. Reuse of effluent water—benefits and risks[J]. Agricultural Water Management, 2006, 80(1~3): 147~159.
- 4 Master Y, J L R, Shavit U, et al. Gaseous nitrogen emissions and mineral nitrogen transformations as affected by reclaimed effluent application[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(4): 1204~1211.
- 5 Master Y, Laughlin R J, Stevens R J, et al. Nitrite formation and nitrous oxide emissions as affected by reclaimed effluent application[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(3): 852~860.
- 6 Meli S, Porto M, Belligno A, et al. Influence of irrigation with lagooned urban wastewater on chemical and microbiological soil parameters in a citrus orchard under Mediterranean condition[J]. Science of the Total Environment, 2002, 285(1~3): 69~77.
- 7 Ramirez-Fuentes E, Lucho-Constantino C, Escamilla-Silva E, et al. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time[J]. Bioresource Technology, 2002, 85(2): 179~187.
- 8 Barton L, Schipper L A, Smith C T, et al. Denitrification enzyme activity is limited by soil aeration in a wastewater-irrigated forest soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 32(5): 385~389.
- 9 Fillery I R, Simpson J R. Biological denitrification[M] // Freney J R, Simpton J R. Gaseous loss of nitrogen from plant-soil system. Hague: Springer, 1983: 33~64.
- 10 Feigin A, Feigenbaum S, Limoni H. Utilization efficiency of nitrogen from sewage effluent and fertilizer applied to corn plants growing in a clay soil[J]. Journal of Environmental Quality, 1981, 10(3): 284~287.
- 11 Smith C J, Bond W J. Losses of nitrogen from an effluent-irrigated plantation[J]. Australian Journal of Soil Research, 1999, 37(2): 371~389.
- 12 Tozer W C, Wilkins K J, Wang H, et al. Using  $15N$  to determine a budget for effluent-derived nitrogen applied to forest[J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2005, 41(1): 13~30.
- 13 Xue Y D, Yang P L, Ren S M, et al. Characteristics and driven factors of nitrous oxide and carbon dioxide emissions in soil irrigated with treated wastewater[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 8(11): 1354~1364.
- 14 新罕布什尔大学地球海洋与空间研究所. DNDC 模型使用手册(9.3 版本)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010.
- 15 Leal R M P, Firme L P, Herpin U, et al. Carbon and nitrogen cycling in a tropical Brazilian soil cropped with sugarcane and irrigated with wastewater[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(2): 271~276.
- 16 Chen W, Wu L, Frankenberger W T, et al. Soil enzyme activities of long-term reclaimed wastewater-irrigated soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(Supp.): S36~S42.
- 17 Adrover M, Farrús E, Moyà G, et al. Chemical properties and biological activity in soils of Mallorca following twenty years of treated wastewater irrigation[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 95(Supp.): S188~S192.
- 18 Zou J W, Liu S W, Qin Y M, et al. Sewage irrigation increased methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in southeast China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009, 129(4): 516~522.
- 19 Vallejo A, García-Torres L, Díez J, et al. Comparison of N losses ( $NO_3^-$ ,  $N_2O$ , NO) from surface applied, injected or amended (DCD) pig slurry of an irrigated soil in a Mediterranean climate[J]. Plant and Soil, 2005, 272(1~2): 313~325.
- 20 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[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3): 273~279.  
Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi, et al. Impact of soil humidity on  $N_2O$  production and emission from a rice-wheat rotation ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(3): 273~279. (in Chinese)
- 21 Li H, Qiu J, Wang L, et al. Modeling 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.

大于清水对应值;当  $S > 300 \text{ kg/m}^3$  时,以相同的  $Re$  应值,以相同的单宽流量作为比较的标准,则含沙水作为比较的标准,则含沙水流阻力系数小于清水对 流阻力系数大于清水对应值。

## 参 考 文 献

- 1 罗榕婷,张光辉,曹颖. 坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J]. 地理科学进展,2009,28(4): 567~574.  
Luo Rongting, Zhang Guanghui, Cao Ying. Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow[J]. Progress in Geography, 2009, 28(4): 567~574. (in Chinese)
- 2 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1983.
- 3 Beuselinck L, Govers G, Steegen A, et al. Sediment transport by overland flow over an area of net deposition[J]. Hydrological Processes, 1999, 13(17): 2769~2782.
- 4 Guy B T, Rudra R P, Dickenson W T, et al. Empirical model for calculating sediment-transport capacity in shallow overland flows: model development[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(1): 105~115.
- 5 Guy B T, Dickinson W T, Rudra R P, et al. Hydraulics of sediment-laden sheetflow and the influence of simulated rainfall[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(2): 101~118.
- 6 Abrahams A D, Li G. Effect of saltating sediment on flow resistance and bed roughness in overland flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(10): 953~960.
- 7 Zhang G H, Luo R T, Cao Y, et al. Impacts of sediment load on Manning coefficient in supercritical shallow flow on steep slopes[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(26): 3909~3914.
- 8 Zhang G H, Shen R C, Luo R T, et al. Effects of sediment load on hydraulics of overland flow on steep slopes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(15): 1811~1819.
- 9 潘成忠,马岚,上官周平. 含沙量对草地坡面径流泥沙沉积和水力特性的影响[J]. 水科学进展,2008,19(6): 857~862.  
Pan Chengzhong, Ma Lan, Shanguan Zhouping. Influence of sediment concentration on deposition of silt and runoff hydraulics on grassland[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6): 857~862. (in Chinese)
- 10 Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. Transport capacity estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4): 1291~1297.
- 11 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京:中国工业出版社,1965.
- 12 黄才安. 水流泥沙运动基本规律[M]. 北京:海洋出版社,2004.
- 13 Rescoe R. The viscosity of suspensions of rigid spheres[J]. British Journal of Applied Physics, 1952, 3: 267~269.
- 14 清华大学水力学教研组. 水力学:下册[M]. 北京:高等教育出版社,1980.
- 15 钱宁,马惠民. 浑水的粘性及流型[J]. 泥沙研究,1958,3(3): 52~77.  
Qian Ning, Ma Huimin. Viscosity and flow pattern of muddy water[J]. Journal of Sediment Research, 1958, 3(3): 52~57. (in Chinese)
- 16 董月群,雷廷武,张晴雯,等. 集中水流冲刷条件下浅沟径流流速特征研究[J]. 农业机械学报,2013,44(5): 96~100.  
Dong Yuequn, Lei Tingwu, Zhang Qingwen, et al. Ephemeral gully flow velocity under concentrated water flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 96~100. (in Chinese)
- 17 Zhang G H, Luo R T, Cao Y, et al. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(1~2): 205~213.
- 18 张耀哲,王亚林,王文娥. 含沙量对U型渠道水流流速横向分布律的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(12): 134~139.  
Zhang Yaozhe, Wang Yalin, Wang Wen'e. Effects of sediment concentration on lateral distribution of water velocity in U-channel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12): 134~139. (in Chinese)

(上接第78页)

- 22 Abdalla M, Wattenbach M, Smith P, et al. Application of the DNDC model to predict emissions of  $\text{N}_2\text{O}$  from Irish agriculture[J]. Geoderma, 2009, 151(3~4): 327~337.
- 23 Xu R, Wang M, Wang Y. Using a modified DNDC model to estimate  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes from semi-arid grassland in China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(4): 615~620.
- 24 李虎,王立刚,邱建军. 基于DNDC模型的华北典型农田氮素损失分析及综合调控途径[J]. 中国生态农业学报,2012,20(4): 414~421.  
Li Hu, Wang Ligang, Qiu Jianjun, et al. Nitrate loss simulated with DNDC model and control technologies in typical cropland of North China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(4): 414~421. (in Chinese)
- 25 Babu Y J, Li C, Frolking S, et al. Field validation of DNDC model for methane and nitrous oxide emissions from rice-based production systems of India[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 74(2): 157~174.
- 26 谢军飞,李玉娥. DNDC模型对北京旱地农田 $\text{N}_2\text{O}$ 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  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from upland farm in Beijing[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(4): 691~695. (in Chinese)
- 27 Desjardins R L, Pattey E, Smith W N, et al. Multiscale estimates of  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from agricultural lands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(6): 817~824.