

赵 峥, 吴淑杭, 周德平, 等. 基于 DNDC 模型的稻田氮素流失及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2405-2412.

Modeling N loss from paddy fields and sensitivity analysis with DNDC Model

ZHAO Zheng, WU Shu-hang, ZHOU De-ping, et al. 题目[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(12): 2405-2412.

# 基于 DNDC 模型的稻田氮素流失及其影响因素研究

赵 峥<sup>1,2</sup>, 吴淑杭<sup>2</sup>, 周德平<sup>2</sup>, 褚长彬<sup>2</sup>, 曹林奎<sup>1\*</sup>

(1.上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240; 2.上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海 201403)

**摘 要:** 稻田氮素流失是导致农业面源污染的主要原因之一。采用测坑定位实验获得的野外观测数据对 DNDC 模型模拟稻田氮素流失的可行性进行验证, 同时重点采用模型的敏感性分析功能对影响稻田氮素流失的关键因素进行分析研究。结果表明: DNDC 模型能够准确地模拟不同施肥条件下稻田的氮素流失和水稻产量, 施肥和降雨是影响稻田氮素流失的主要因素, 与稻田氮素流失呈正比。值得注意的是, 在目前施肥水平下有机肥的施用对稻田氮素的渗漏流失无明显贡献。此外, 稻田氮素的渗漏流失还与土壤硝态氮的含量呈正比, 而与土壤有机碳含量和黏土比例呈反比。根据敏感性分析结果可知, 在我国稻田目前的施肥水平下, 降低施用量、采用节水灌溉以及增施有机肥等措施均是减少稻田氮素流失的有效手段。

**关键词:** 稻田; 氮素流失; DNDC 模型; 敏感性分析; 径流; 渗漏

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)12-2405-08 doi:10.11654/jaes.2016-0796

## Modeling N loss from paddy fields and sensitivity analysis with DNDC Model

ZHAO Zheng<sup>1,2</sup>, WU Shu-hang<sup>2</sup>, ZHOU De-ping<sup>2</sup>, CHU Chang-bin<sup>2</sup>, CAO Lin-kui<sup>1\*</sup>

(1.School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2.Eco-environmental Protection Institute of Shanghai Academy of Agricultural Science, Shanghai 201403, China)

**Abstract:** N loss from paddy fields lead to agricultural non-point source pollution. Observed data from lysimeter study was used for validation of DNDC model, and then sensitivity analysis was conducted with DNDC model to evaluate the impact factors that affect N loss from paddy fields. The results indicated that DNDC model accurately simulated rice yields and N loss from paddy fields under different fertilization methods. Fertilization and precipitation are the major factors that affect N loss from paddy field, and showed positive correlation with N loss. N loss through subsurface leaching negatively correlated with SOC content and soil clay fraction, while positively correlated with soil nitrate content. According to sensitivity analysis, decreasing of fertilization rate, application of water-saving irrigation and organic manure could effectively reduce N loss from paddy fields.

**Keywords:** paddy fields; N loss; DNDC model; sensitivity analysis; runoff; leaching

我国是水稻种植大国, 水稻单产处于世界领先水平。以 2013 年为例, 我国水稻总产量达 2.05 亿 t, 约占世界总产量的 27.5%, 而水稻种植面积仅为世界总种植面积的 18.5%<sup>[1]</sup>。我国水稻的高产主要得益于化

学肥料的大量施用, 相关调查表明, 我国江浙沪地区的稻田中平均氮肥施用量约为 300 kg N·hm<sup>-2</sup>, 而太湖流域某些高产稻田中施氮水平高达 350 kg N·hm<sup>-2</sup><sup>[2]</sup>, 如此高的施氮水平已远远超过了相关研究推荐的稻田最佳施氮量<sup>[3-4]</sup>。较高的氮肥施用量和较低的氮素利用率导致施肥投入的氮只有很少一部分能被水稻吸收利用, 而大部分将随着降雨和稻田排水等通过不同的途径流失到周边环境, 进而引起了一系列环境污染问题。稻田氮素的随水流失不仅会引起地表水体的富营养化, 同时也是导致地下水硝酸盐污染的主要原

收稿日期: 2016-06-14

基金项目: 国家星火计划重点项目(2015GA680004); 国家自然科学基金重点项目(71333010); 上海市科委科研计划项目(14391901502)

作者简介: 赵 峥(1988—), 男, 云南大理人, 博士, 研究方向为农田生态学。E-mail: zhaozheng24@qq.com

\* 通信作者: 曹林奎 E-mail: clk@sjtu.edu.cn

因,严重影响人类饮水安全<sup>[5-6]</sup>。相关研究表明,我国农田中施肥投入的氮每年约有 7% 将通过地表径流和渗漏的方式流失到周边水环境中<sup>[7]</sup>。目前,我国超过一半的淡水湖面临着水体污染问题,水质严重恶化,并且已经丧失了湖泊应当具有的基本生态功能,部分湖泊的水质等级已达国标劣五类<sup>[8-9]</sup>。因此,稻田氮素流失研究对于我国水环境的保护和农业面源污染的控制均具有十分重要的意义。

近年来,生物地球化学模型已成为研究农业生态系统元素循环的重要工具。DNDC 模型可用于模拟农业生态系统中碳和氮的迁移转化过程和主要去向,是二十一世纪最成功的农业生态系统模型之一<sup>[10]</sup>。DNDC 模型以其简单的输入参数和准确的模拟结果已被广泛地应用到全球不同的国家和生态系统中,目前可用于模拟农作物的产量、硝酸盐的淋溶、温室气体的排放以及土壤碳储量的变化等<sup>[11-12]</sup>。同时, DNDC 模型还具有敏感性分析功能,能够对影响碳氮循环过程的敏感性因素进行评价,从而确定影响主要碳氮去向的关键因素,为农业生产过程中养分的科学管理和调控提供依据。与传统的野外观测实验相比,模型的研究能够节约大量的时间、人力和物力,并提供相对可靠的结果用于指导农业生产。在前期研究中,我们对 DNDC 模型中与稻田氮素流失相关的参数进行了修正和校准,验证了 DNDC 模型模拟稻田氮素流失的功能<sup>[13]</sup>。本研究在时间尺度上进一步验证 DNDC 模型模拟不同施肥条件下稻田氮素流失的可行性,同时重点采用 DNDC 模型的敏感性分析功能对影响稻田氮素流失的关键因素进行评价,明确影响稻田氮素流失的最敏感因素,并以此为依据制定科学有效的减排措施,为稻田氮素流失的控制和农业环境的保护提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验地概况

实验地位于上海市青浦区,为黄浦江上游地区,

是上海市的水源保护地之一。该地区为典型稻作农区,种植制度以稻麦轮作为主,气候类型为亚热带潮湿型季风气候,年平均气温 16.7 °C,年平均降雨量 1 087.3 mm。实验时间为 2012—2013 年水稻生育期,两年水稻生育期的平均气温分别为 25.0、26.3 °C,降雨量分别为 408、595 mm。本研究采用测坑定位实验,测坑系统位于青浦区水务局农田水利技术推广站内。该测坑系统建于 1998 年,共 16 个测坑,坑体之间以水泥埂隔开以防止肥水的串流,每个测坑面积为 6 m<sup>2</sup> (2 m×3 m)。测坑建造时采用原状土回填,坑内土壤深度为 2.5 m。土壤中埋设有不同的管道以实现土壤不同深度剖面水、渗漏水、地表径流水的采集。径流管出水口高度模拟上海地区水稻田田埂的平均高度,设定为 10 cm;田面水高度则参照当地农民的水分管管理习惯,整个水稻生育期均维持在 7~8 cm,基于此来实现对降雨过程中稻田地表径流排水的观测。测坑系统建有地下控制室,在取样的同时自动记录排水量。测坑装置示意图如图 1 所示。测坑内土壤类型为湖沼相沉积物起源的青紫泥水稻土,耕层土壤的基础理化性质如表 1 所示。

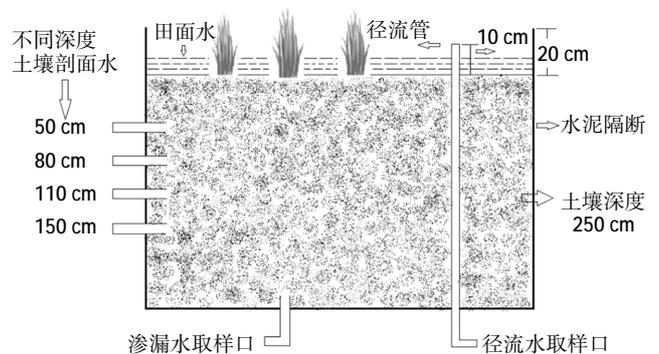


图 1 测坑装置示意图

Figure 1 The structure view of lysimeter system

### 1.2 实验设置

实验共设 4 种处理,包括不施肥的空白对照 CK 和 3 种施肥处理,每种处理 3 次重复进行随机区组实

表 1 实验地土壤基础理化性质

Table 1 Physical and chemical properties for the topsoil at the experimental site

处理方式	TN/g·kg <sup>-1</sup>	速效磷/mg·kg <sup>-1</sup>	有效钾/mg·kg <sup>-1</sup>	有机质/g·kg <sup>-1</sup>	pH	容重/g·cm <sup>-3</sup>
CK	1.20±0.03	21.36±2.87	38.57±3.55	28.07±2.33	7.06±0.08	1.34±0.03
CT	1.15±0.05	20.84±3.01	43.55±2.75	25.54±1.78	7.18±0.05	1.29±0.02
MT	1.23±0.03	25.85±2.45	51.32±4.03	23.72±1.65	7.08±0.06	1.23±0.05
OT	1.46±0.02	33.51±1.98	55.81±3.76	31.33±1.08	7.05±0.05	1.22±0.03

验,其中化肥处理 CT 施用尿素,有机肥处理 OT 施用商品有机肥,混施肥处理 MT 施用 80%尿素和 20%商品有机肥(按 N 比例)。各施肥处理总施氮量相同,参照当地常规施肥水平  $300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。所用有机肥为以鸡粪为原料发酵生产的商品有机肥,含氮量 1.66%,有机质含量 47.8%。施肥时有机肥以基肥的方式一次性施入,尿素则分为基肥和两次追肥(3:1:1),追肥时间分别为水稻拔节期和抽穗期。具体施肥方案如表 2 所示。实验所用水稻品种为“宝农 34”,种植方式为移栽,2012 年的移栽时间为 6 月 27 日,收获时间为 11 月 8 日,2013 年则为 6 月 18 日移栽,11 月 4 日收获。稻田采用的水分管理方式为传统的淹水灌溉+中期烤田,烤田期为 10 d 左右。除烤田期外,整个水稻生育期田面水高度均维持在 7~8 cm,水位低于该高度时即进行灌水,2012 年和 2013 年水稻生育期的灌水量分别为 804、824 mm。其他农事操作参照当地习惯。

表 2 不同处理施肥方案( $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ )Table 2 Fertilization scheme for different treatments ( $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

处理方式	基肥		追肥 1	追肥 2
	有机肥	尿素	尿素	尿素
CK	0	0	0	0
CT	0	180	60	60
MT	60	144	48	48
OT	300	0	0	0

注:2012 年的施肥时间分别为 6 月 26 日、7 月 20 日和 8 月 14 日;2013 年的施肥时间分别为 6 月 16 日、7 月 22 日和 8 月 14 日。

### 1.3 样品采集与分析测定

在稻田灌水后开始对渗漏水 and 地表径流水进行采集。渗漏水在每次施肥后的第 1、2、3、5、7、9、11、15、20、25、30 d 进行取样,此后,渗漏水中 N 浓度基本趋于稳定,取样频率改为每两周 1 次,直至水稻生长期结束。地表径流则在稻田产生地表径流水时进行取样,同时通过测坑地下控制室记录每次渗漏和地表径流的排水量。采集的样品立即带回实验室对水样中 TN 浓度进行分析测定,采用“Multi N/C 3000”TN/TOC 分析仪 (Analytik Jena, 德国)。通过水样中的 N 浓度及排水量即可计算稻田 N 流失负荷。

### 1.4 DNDC 模型的参数修正、校准和验证

DNDC (DeNitrification - DeComposition) 模型是一个描述农业生态系统中碳和氮生物地球化学循环过程的计算机模拟模型<sup>[14]</sup>,最初建立的目的是用于模拟

北美地区农业生态系统中温室气体的排放和土壤碳储量的变化<sup>[15-16]</sup>。在过去的 20 多年中,随着模型参数的不断优化,模型的功能也不断完善和提高<sup>[17-19]</sup>。在前期研究中(2009—2011 年),我们对 DNDC 模型中与稻田氮素流失相关的参数进行了一系列修正,使得模型准确地模拟了稻田系统的氮素流失过程<sup>[13]</sup>。修正的参数主要涉及四个方面:(1)根据上海地区水稻田的结构特点修正了 DNDC 模型中对稻田田埂高度的设置(10 cm);(2)修正了施肥后氮在田面水和土壤中的分配比;(3)根据上海地区水稻田犁底层的特性修正了渗漏水下渗速率;(4)增加了新的输入参数——灌溉水中的氮含量。这一系列修正使得 DNDC 模型准确地追踪了水稻田的排水过程和施肥后氮在田面水中的溶解与分配过程,基于此模型准确地模拟了稻田系统的氮素流失。在 DNDC 模型的校准和验证过程中,模型对 2009—2011 年不同施肥条件下稻田氮素流失模拟的相对标准偏差为 14.15%~16.82%,为 DNDC 模型研究稻田氮素流失及其影响因素奠定了良好的基础。有关模型参数修正、校准和验证的详细内容请参见 Zhao 等<sup>[13]</sup>的方法。

### 1.5 数据处理与统计分析

本实验中,稻田氮素流失负荷采用以下公式进行计算:

$$Q = \sum Q_i$$

$$Q_i = C_i \cdot q_i / 100$$

式中: $Q_i$  为氮素流失负荷,  $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $C_i$  为水样 TN 浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $q_i$  为渗漏或径流的排水量, mm;  $i$  为渗漏水或径流水的采样次数(1-n); 100 为单位换算系数。

敏感性指数 (Sensitive Index - SI) 可用来评价 DNDC 模型敏感性分析的结果,计算公式如下:

$$SI = \frac{(R_{\max} - R_{\min}) R_{\text{avg}}}{(P_{\max} - P_{\min}) P_{\text{avg}}}$$

式中: $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$  和  $P_{\text{avg}}$  为输入参数的最大值、最小值和平均值; $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$  和  $R_{\text{avg}}$  为对应的模拟结果。

SI 值越大表示模拟结果对于所选择的输入参数越敏感,其正值表示二者呈正相关关系,而负值则表示负相关。根据 SI 值的计算结果即可对影响稻田氮素流失的关键因素进行分析。

本实验中数据均以平均值加标准偏差的方式来表示。数据处理分析采用 Excel 2010 进行;显著性差异检验采用 SPSS 17.0 中的 one-way ANOVA 在  $P < 0.05$  水平进行;相关性分析与绘图采用 Origin 8.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻田水分运移特征及其影响因素

水稻田是一个特殊的生态系统,有着独特的水分管理方式,渗漏和地表径流是水稻田的两种主要排水方式,同时也是导致稻田氮素流失的主要驱动力。当稻田灌水后,田面水会在重力作用下通过土壤剖面持续下渗,从而进入地下水。由于受水稻田犁底层和土壤性质的影响,稻田渗漏速率较为稳定,在2012—2013年试验期间在每日2 mm左右波动,变化范围为0.48~3.83 mm·d<sup>-1</sup>,其中渗漏量为0的时间段为水稻烤田期。试验期间稻田渗漏排水动态特征如图2所示,2012年和2013年稻季的平均渗漏速率分别为1.64、1.85 mm·d<sup>-1</sup>。

稻田地表径流则主要受降雨的影响,在降雨过程中,当田面水的高度超过稻田田埂时就会产生地表径流。实验稻田在2012年和2013年分别产生了7次和8次径流,如图3所示。与渗漏相比,稻田地表径流排水量的波动范围较大,为6.7~228.9 mm。值得注意的是在2012年8月8日产生地表径流排水时水稻田刚进入烤田期,部分测坑的田面水还未完全落干,82.3 mm的降雨量仍然导致了30.2 mm地表径流排水的产生。由于测坑坑体为水泥结构,并未设计有人工主动排水口,烤田之前的排水一般通过田面水的自然落干来实现,各测坑之间田面水的下渗速率略有差异,田面水的落干过程也有所差别。而在2013年10月8日,稻田地表径流量远高于其他各次径流,主要原因是当时上海处于台风天气,超过250 mm的降雨量导致了大量地表径流排水的产生。不难看出降雨是导致稻田地表径流排水的主要驱动力。

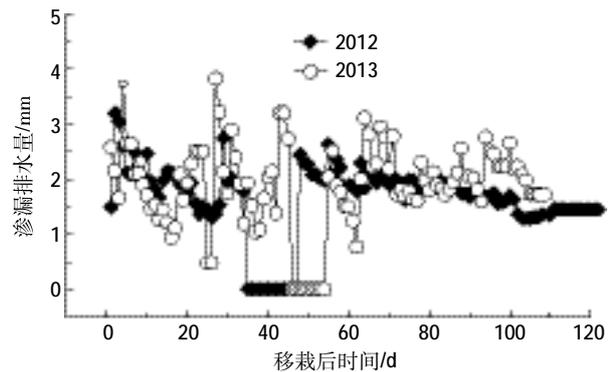


图2 稻田渗漏排水特征

Figure 2 Leaching dynamics from paddy fields

因此,我们分析了稻田地表径流排水量和降雨量之间的相关性(图4),结果表明二者之间存在显著相关性( $R^2=0.95$ ),其相互关系可用经验公式“ $Y=0.90X-11.96$ ”来表示,即当降雨量高于13.3 mm时,水稻田就有可能产生地表径流排水(图4a),可根据降雨量通过该经验公式来估算水稻田的地表径流排水量。考虑到在两年试验期间监测到的15次地表径流中,2012年8月8日和2013年10月8日的两次地表径流情况较为特殊,因此我们排除这两次径流再次分析了稻田地表径流和降雨之间的相关性,结果表明二者间的相关性有所降低, $R^2$ 仅为0.67(图4b)。分析其主要原因,可能是因为2013年10月8日产生的径流是所有地表径流中的极大值,该极大值的存在提高了分析过程中地表径流和降雨之间的相关性(图4a);另一方面,相关性不高的原因可能是由于样本数量较少(除去两次特殊时期径流后仅为13次),还不足以反映出稻田地表径流和降雨之间的一般规律。

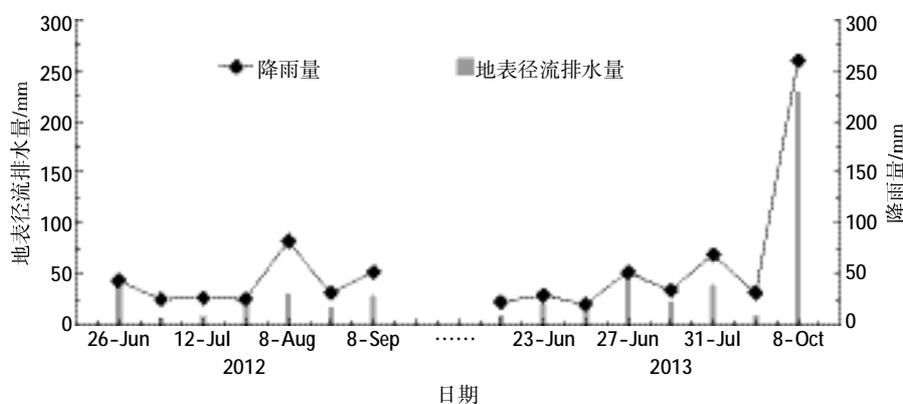


图3 稻田地表径流排水特征及其与降雨间的关系

Figure 3 Surface runoff pattern from paddy fields and the relationship with precipitation

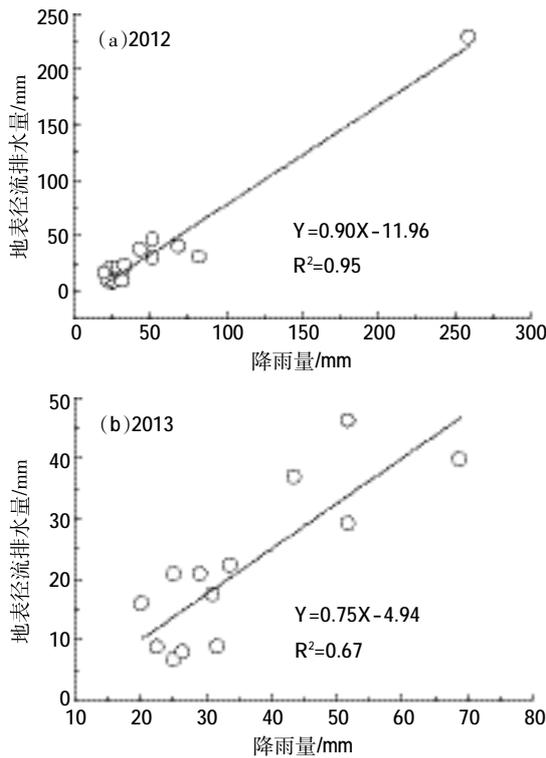


图 4 稻田地表径流量与降雨量之间的相关性分析  
Figure 4 Correlation analysis between surface runoff and precipitation

### 2.2 不同施肥方式对稻田氮素流失负荷的影响

根据测坑系统对稻田氮素流失过程的监测计算了水稻整个生长季的氮素流失负荷,结果如表 3 所示。3 种施肥处理的氮素流失负荷均显著高于不施肥的对照组 CK,表明施肥是导致稻田氮素流失的主要因素。在 2012 年水稻季,CT 处理的氮素径流流失负荷最高,显著高于 OT 处理,但与 MT 处理无显著差异,3 种施肥处理之间氮素的渗漏流失负荷并无显著差异;在 2013 年水稻季,CT 处理的氮素径流流失负荷也为最高,且显著高于 MT 和 OT 处理,而 MT 和 OT 处理之间并无显著差异,3 种施肥处理之间氮素

表 3 不同施肥方式下稻田氮素流失负荷(kg N·hm<sup>-2</sup>)

Table 3 N loading from paddy fields under different fertilization methods(kg N·hm<sup>-2</sup>)

处理 方式	2012		2013		年均流失 负荷
	径流	渗漏	径流	渗漏	
CK	1.79±0.12a	1.04±0.08a	3.05±0.17a	1.57±0.13a	3.73±0.23a
CT	13.74±0.61c	2.98±0.33b	14.73±0.43c	6.13±0.35d	18.79±0.95c
MT	11.79±1.25bc	2.43±0.27b	10.20±0.56b	4.95±0.21c	14.69±1.27b
OT	10.69±0.48b	2.51±0.24b	9.82±0.81b	3.14±0.18b	13.08±0.86b

注:同一列不同字母表示在 P<0.05 水平具有显著性差异。

的渗漏流失负荷则差异显著。与渗漏相比,地表径流是稻田氮素流失的主要途径。从稻田氮素的年均流失负荷来看,CT 处理显著高于 MT 和 OT 处理,表明稻田施用尿素会导致较高的氮素流失负荷,而施用有机肥能在一定程度上减少稻田的氮素流失。在 2012—2013 年试验期间,3 种施肥处理的稻田所产生的氮素流失负荷在施氮量中所占比例为 3.12%—5.02%。

### 2.3 DNDC 模型对稻田氮素流失负荷的模拟

当输入实验地实际的气象条件、土壤理化性质和农田管理措施数据后,运行 DNDC 模型对不同施肥方式下稻田系统的氮素流失进行模拟,结果如图 5 所示。模拟结果表明, DNDC 模型基本准确地模拟了不同施肥方式下稻田系统的氮素流失负荷,模拟的平均标准偏差为 6.15%(0.46%—14.33%),在可接受范围内<sup>[20-21]</sup>。与施肥处理相比,对照组 CK 并没有肥料的投入,其氮素流失主要来自灌溉水本身含有的氮以及灌水之后土壤氮在田面水中的溶解。DNDC 模型通过对灌溉水中氮含量的定义以及对土壤氮在田面水中溶解的模拟,准确地追踪了稻田不施肥条件下的氮素流失。通过对 2012—2013 年试验期间稻田氮素流失的模拟,进一步验证了 DNDC 模型模拟不施肥及

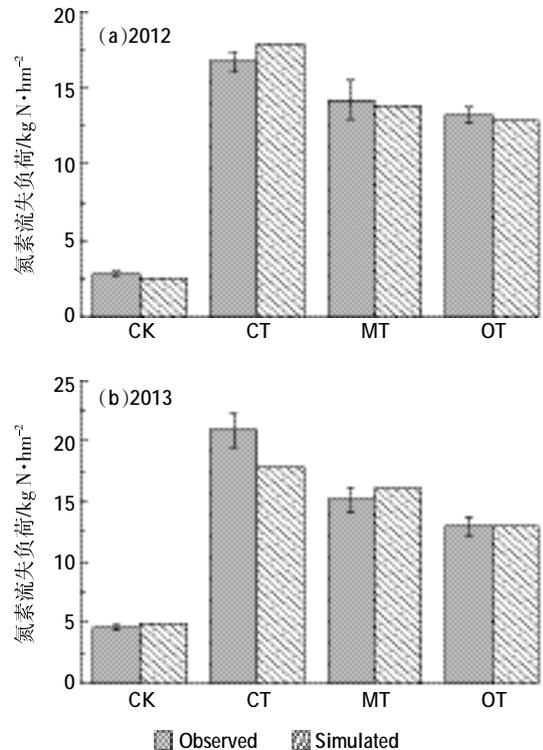


图 5 DNDC 模型对不同施肥方式下稻田氮素流失负荷的模拟  
Figure 5 Simulated N loading with DNDC model under different fertilization methods

多种施肥条件下稻田氮素流失的可行性,以此为基础即可对影响稻田氮素流失的敏感性因素进行分析。

#### 2.4 DNDC 模型对水稻产量的模拟

DNDC 模型不仅准确地模拟了稻田系统的氮素流失,同时也准确地模拟了水稻的生长过程。模型对 2012—2013 年试验期间不同施肥条件下水稻产量的模拟情况如图 6 所示,结果表明 DNDC 模型基本准确地捕捉到了不同施肥条件对水稻产量的影响,各处理水稻产量实测值与模拟值之间的相对标准偏差为 0.55%~25.76%,平均相对标准偏差为 8.14%,在模拟水稻产量时模型总体表现良好。模拟偏差较大的情况出现在 2013 年的 CK 和 OT 处理中,可能与年际间气候条件的差异和病虫害的发生有关。准确地模拟作物的生长以及碳氮元素在农业生态系统中的迁移转化过程是模型进行敏感性因素分析的前提,只有正确地把握影响稻田碳氮循环的关键因素,才能为稻田氮素流失的控制制定科学有效的减排措施。

#### 2.5 稻田氮素流失敏感性因素分析

敏感性分析是 DNDC 模型特有的功能,通过分析模拟结果对某个输入参数变化的响应从而评价输入参数对模拟结果的影响。敏感性分析以 2012 年的

模拟条件作为基础情景,选择降雨量、施肥量及土壤理化性质等 8 个输入参数进行分析,评价其对稻田氮素流失的影响。敏感性分析为单因素模拟试验,即每个输入参数独立地在其基值的 $\pm 20\%$ 范围内随机波动来产生模拟情景(其他参数固定为基值不变),每个参数的模拟次数为 500 次,从而根据氮素流失的模拟结果对于输入参数变化的响应来计算敏感性指数 SI,结果如表 4 所示。敏感性分析结果表明,稻田氮素径流流失主要与降雨量和施肥量有关,且呈正相关关系,其中降雨量是稻田氮素径流流失的最大影响因素。而稻田氮素的渗漏流失仅与降雨量和尿素施用量呈正相关关系,而与有机肥施用量无明显关系,主要原因可能是有机肥中氮的形态以有机态大分子为主,易被土壤胶体吸附,不容易通过土壤剖面渗入地下。此外,稻田氮素的渗漏流失还与土壤理化性质有关,即与土壤硝态氮含量呈正相关关系,而与土壤有机碳含量和黏土比例则呈负相关关系。土壤有机碳和黏土含量是决定土壤质地的重要指标,土壤质地的差异可能通过影响渗透水的下渗速率进而影响稻田氮素的渗漏流失过程。

### 3 讨论

DNDC 模型是一个模拟农业生态系统中碳氮元素循环的生物地球化学模型,近年来已在不同的农业生态系统中得到了验证和应用,然而,目前有关 DNDC 模型模拟氮素流失方面的研究主要集中于旱作作物,如小麦和玉米等<sup>[7]</sup>。本研究首次将 DNDC 模型应用于水稻田氮素流失的模拟,并采用模型的敏感性分析功能对影响稻田氮素流失的主要因素进行了分析,以期为我国稻田氮素流失的控制提供依据。

在本研究中, DNDC 模型准确地模拟了不同施肥

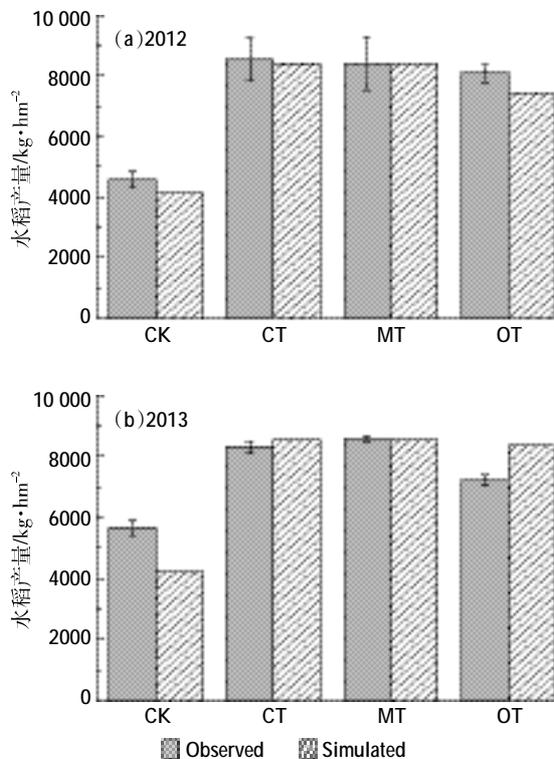


图 6 DNDC 模型对不同施肥方式下水稻产量的模拟

Figure 6 Simulated rice yields with DNDC model under different fertilization methods

表 4 基于 DNDC 模型的稻田氮素流失敏感性因素分析

Table 4 Sensitivity analysis with DNDC model

输入参数	基值	变化范围	敏感性指数(SI)	
			N 径流	N 渗漏
降雨量/mm	1 103.6	882.9-1 324.3	0.93	0.28
施氮量-尿素/kg N·hm <sup>-2</sup>	300	240-360	0.77	0.74
施氮量-有机肥/kg N·hm <sup>-2</sup>	300	240-360	0.87	0.00
土壤硝态氮含量/mg N·kg <sup>-1</sup>	5.00	4.00-6.00	0.00	0.23
土壤铵态氮含量/mg N·kg <sup>-1</sup>	7.25	5.80-8.70	0.01	0.04
土壤有机碳含量/kg C·kg <sup>-1</sup>	0.015	0.012-0.018	0.08	-0.87
土壤黏土比例	0.43	0.34-0.52	0.01	-0.37
土壤 pH	7.66	6.13-9.19	-0.01	-0.03

条件下稻田系统的氮素流失,模拟结果与野外观测结果基本一致,均表明降雨、施肥和土壤性质是影响稻田氮素流失的主要因素。因此,根据不同的情形选择合适的管理措施是控制稻田氮素流失的关键。首先,我国目前水稻田的施肥水平普遍处于过量状态,因而在保证水稻产量的前提下降低施肥量是减少稻田氮素流失最直接和有效的手段;其次,降雨是影响稻田氮素径流流失的最敏感因素,因而稻田施肥应尽可能地避开降雨高峰期,这对稻田氮素径流流失的控制尤为关键;再次,与渗漏相比地表径流是稻田氮素流失的主要方式,因而减少稻田氮素的地表径流流失是稻田氮素流失减排的关键。这也与赵旭等在太湖流域所获得的研究结论一致<sup>[22]</sup>。此外,田面水高度也是影响稻田氮素地表径流流失的重要因素。在本研究中,稻田采用的水分管理方式为传统的淹水灌溉,田面水水位较高,在降雨过程中极易产生地表径流。因此,选择合适的灌溉方式以降低田面水高度也能够有效地减少稻田氮素的地表径流流失。诸多研究也表明采用湿润灌溉和间歇灌溉等节水灌溉方式能够显著降低稻田氮素的地表径流流失<sup>[23-24]</sup>。

虽然地表径流是稻田氮素流失的主要方式,但氮素的渗漏流失会引起地下水的硝酸盐污染,直接影响人类的饮水安全,因此稻田氮素的渗漏流失也应该引起重视。敏感性分析结果表明,稻田氮素的渗漏流失与降雨、尿素施用量和土壤硝态氮含量呈正比,而与土壤有机碳含量和土壤黏土比例呈反比。值得注意的是,在目前施肥水平下有机肥的施用对稻田氮素的渗漏流失没有明显贡献。根据敏感性分析结果可知,稻田若施用有机肥替代化肥则能够有效地减少稻田氮素的渗漏流失。这也与我们测坑实验观测到的结论一致。有机肥的施用通常能够提高土壤有机碳的含量,改善土壤质地,在一定施用量前提下能够有效降低稻田氮素的渗漏流失。此外,秸秆还田等农业措施也是提高土壤有机碳含量的常用手段,这也可能对稻田氮素渗漏流失的控制做出贡献。土壤性状的改良不仅有助于稻田氮素流失的控制,同时也是农业可持续发展的重要保障。

DNDC 模型是研究农业生态系统碳氮元素循环的重要工具,是对传统野外观测实验的拓展和延伸。模型模拟和野外观测的结合不仅能够节省大量的时间和资源,同时也能获得较为可靠的结果对农业生产过程进行指导。上文中所提及的诸多减排措施可采用 DNDC 模型的情景模拟功能来进行验证,这也是我们

下一步研究的主要内容。综上所述,以野外观测实验为基础的模型研究是未来农业生态系统研究的重要发展方向。

#### 4 结论

测坑定位实验表明,施用尿素(CT)的稻田产生的氮素流失负荷最高,为  $18.79 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;施用有机肥能够显著降低稻田系统的氮素流失,与 CT 处理相比,施用有机肥的 MT 和 OT 处理能够分别减少 21.8% 和 30.4% 的稻田氮素流失。DNDC 模型能够准确地模拟不同施肥条件下稻田系统的氮素流失和水稻产量,是研究稻田碳氮循环和筛选最佳农田管理措施的重要工具。基于 DNDC 模型的敏感性分析结果表明,稻田氮素流失主要受施肥、降雨及土壤理化性质的影响,其中稻田氮素流失与施肥、降雨及土壤硝态氮含量呈正比,而与土壤有机碳含量和黏土比例呈反比。基于目前我国稻田中普遍存在的施肥过量现象,降低施肥量、采用节水灌溉以减少地表径流的频率以及施用有机肥来提高土壤有机碳含量等措施均是控制稻田氮素流失的有效手段。

#### 参考文献:

- [1] FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO-STAT. <http://faostat3.fao.org>.
- [2] 崔玉亭,程 序,韩纯儒,等. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 659-662.  
CUI Yu-ting, CHENG Xu, HAN Chun-ru, et al. The economic and ecological satisfactory amount of nitrogen fertilizer using on rice in Tai Lake Watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(4): 659-662.
- [3] Lin D X, Fan X H, Hu F, et al. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu Lake region, China[J]. Pedosphere, 2007, 17(5): 639-645.
- [4] Chen J, Huang Y, Tang Y H. Quantifying economically and ecologically optimum nitrogen rates for rice production in south-eastern China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2011, 142(3/4): 195-204.
- [5] Peng S Z, Yang S H, Xu J Z, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements [J]. Paddy and Water Environment, 2011, 9(3): 333-342.
- [6] Yoshinaga I, Miura A, Hitomi T, et al. Runoff nitrogen from a large sized paddy field during a crop period[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(2): 217-222.
- [7] 朱兆良,孙 波. 中国农业面源污染控制对策研究[J]. 环境保护, 2008, 394(8): 4-6.  
ZHU Zhao-liang, SUN Bo. Study on the controlling policies of agricultural non-point source pollution in China[J]. Environmental Protection, 2008, 394(8): 4-6.
- [8] Jin X C, Xu Q J, Huang C Z. Current status and future tendency of lake

- eutrophication in China[J]. *Science in China Series C-Life Sciences*, 2005, 48(1): 948-954.
- [9] Le C, Zha Y, Li Y et al. Eutrophication of lake waters in China: Cost, causes, and control[J]. *Environmental Management*, 2010, 45(4): 662-668.
- [10] Gilhespy S L, Anthony S, Cardenas L, et al. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 292(11): 51-62.
- [11] 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]. *植物营养与肥科学报*, 2012, 18(1): 77-88.  
XIA Wen-jian, ZHOU Wei, LIANG Guo-qing, 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.
- [12] 黄秀梅, 申广荣, 周培. 基于模型的上海郊区地下水氮素非点源污染特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(7): 1378-1384.  
HUANG Xiu-mei, SHEN Guang-rong, ZHOU Pei. Modeling impacts of cropland non-point source nitrogen pollution on groundwater in a suburban area of Shanghai, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1378-1384.
- [13] Zhao Z, Zhang H, Li C, et al. Quantifying nitrogen loading from a paddy field in Shanghai, China with modified DNDC model[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 197(12): 212-221.
- [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[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010.  
Institute for the Study of Earth, Oceans, and Space, University of New Hampshire. DNDC Model user manual[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2010.
- [15] Giltrap D L, Li C, Saggart S. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 136(3/4): 292-300.
- [16] Li C, Frolking S, Crocker G J, et al. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model[J]. *Geoderma*, 1997, 81(1/2): 45-60.
- [17] Li H, Wang L, Qiu J, et al. Calibration of DNDC model for nitrate leaching from an intensively cultivated region of Northern China[J]. *Geoderma*, 2014, 223/224/225(1): 108-118.
- [18] 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 Yi-long, SUN Lai-xiang, 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.
- [19] 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): 1-11.
- [20] Loague K, Green R E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1991, 7(1/2): 51-73.
- [21] Gao M, Qiu J, Li C, et al. Modeling nitrogen loading from a watershed consisting of cropland and livestock farms in China using Manure-DNDC[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 185(3): 88-98.
- [22] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 156(6): 1-11.
- [23] 姜萍, 袁永坤, 朱日恒, 等. 节水灌溉条件下稻田氮素径流与渗漏流失特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(8): 1592-1596.  
JIANG Ping, YUAN Yong-kun, ZHU Ri-heng, et al. Study on the nitrogen loss from paddy fields on different water management[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1592-1596.
- [24] 叶玉适, 梁新强, 金熠, 等. 节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 105-112, 118.  
YE Yu-shi, LIANG Xin-qiang, JIN Yi, et al. Dynamic variation and runoff loss of nitrogen in surface water of paddy field as affected by water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5): 105-112, 118.