

DNDC 模型模拟农田温室气体排放研究进展

吕晓东, 王 婷

(甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 在简要介绍 DNDC 模型(脱氮分解模型)及其在中国的应用与改进基础上, 综述了中国学者利用该模型模拟与估算农田温室气体排放和减排调控方面的研究进展, 提出未来模型在中国的发展应针对中国农业种植体系的特点, 增加模型模块, 修正模型参数, 建立跨尺度农田生态系统综合评估模型, 加强大尺度和长时间序列的温室气体排放模拟与预测研究。同时, 加强遥感和地理信息系统技术与模型的结合, 以提高区域尺度模拟和预测精度, 降低模拟结果的不确定性。

关键词: DNDC; 温室气体排放; 模拟; 研究进展

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1463(2018)11-0091-06

doi: 10.3969/j.issn.1001-1463.2018.11.026

Research Progress of DNDC Model Simulating Greenhouse Gas Emission from Farmland

LÜ Xiaodong, WANG Ting

(Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: On the basis of a brief introduction of the DNDC model (denitrification decomposition model) and its application and improvement in China, this paper reviews the research progress of Chinese scholars in simulating and estimating greenhouse gas emissions and emission reduction and regulation in farmland by using this model, and proposes that the future model development in China should be based on the characteristics of China's agricultural planting system, add the model module, modify the model parameters, establish a cross-scale farmland ecosystem comprehensive assessment model, and strengthen the large-scale and long-term time series of greenhouse gas emissions simulation and prediction research. At the same time, the combination of remote sensing and GIS technology and models should be strengthened to improve the accuracy of regional scale simulation and prediction and reduce the uncertainty of simulation results.

Key words: DNDC; Greenhouse gas emissions; Simulation; Research progress

农业生态系统中温室气体的产生是一个复杂的生物地球化学过程, 气候、植被、土壤及农田管理等驱动因素的任何微小变化, 都会改变温室气体 CO_2 、 CH_4 或 N_2O 的产生及排放。大量科学实验表明, 全球各地农田温室气体排放具有空间异质性和时间变异性特征, 用有限的点位尺度观测资料来简单地推算区域乃至全球尺度的温室气体排放量是不可靠的, 其结果具有不确定性。温室气体排放传统经验统计模型尽管适用于区域范围模拟, 但点位模拟结果不确定性差^[1], 且无法从过程上解释温室气体排放的变异性。因此, 发展生物地球化学过程模型来模拟控制温室气体产生的复杂生态系统是当前有关陆地生态系统碳、氮循环

与全球变化的地球表层过程研究的重要领域。全球目前有 30 多种不同的生物地球化学过程模型^[2], 用于研究温室气体排放较为成熟的过程模型有 CENTURY、CANDY、NC SOIL、Roth-C、DAISY、DNDC 等, DNDC (Denitrification-Decomposition) 模型已被国际生态学界用于研究农业生态系统碳氮循环, 是公认的模型之一^[3-4], 广泛应用于农田、草地、森林、湿地等多种类型的生态系统, 模拟 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 等温室气体排放^[5-7], 在我国也经大量验证并且广泛应用^[8-11]。我们针对中国应用 DNDC 模型开展农业生态系统温室气体排放模拟的研究进行综述, 旨在推动模型更广泛和有效的应用, 为我国碳氮循环研究提供新的理念和方法参

收稿日期: 2018-08-27

基金项目: 甘肃省科技厅国际合作项目“固定道保护性耕作应对气候变化的固碳减排技术研究”(1604WKCA005)。

作者简介: 吕晓东(1979—), 男, 甘肃瓜州人, 副研究员, 主要从事温室气体减排研究工作。联系电话: (0)13893636173。

考。

1 DNDC 模型简介及其在中国的应用与改进

1.1 DNDC 模型简介

DNDC 模型是基于与碳、氮循环有关的生物地球化学因素和过程而发展起来的计算机模拟模型，于 1992 年由美国 New Hampshire 大学 Li 等^[12]创建并推广在全球应用，经过 26 a 的发展，目前已更新到 V9.5 版本。DNDC 模型由 2 个部分组成，其模型结构见图 1^[13]。

第一部分包含土壤气候、植物生长和有机质分解 3 个子模型，其作用是根据输入的气象、土壤、植被、土地利用和农田耕作管理数据预测植物-土壤系统中诸环境因子的动态变化；第二部分包含硝化、反硝化和发酵 3 个子模型，这部分的作用是由土壤环境因子来预测上述 3 个微生物参与的化学反应的速率。6 个子模型的函数方程式由物理学、化学或生物学的基本理论以及实验室模拟实验的结果构建，以日或小时为时间步长，来模拟真实世界中环境条件-植物生长-土壤化学变化间的相互作用。

1.2 DNDC 模型在中国的应用与改进

DNDC 模型已在包括中国在内的 20 多个国家得到应用和检验^[10]，针对农田生态系统、草地生态系统、森林生态系统开展了温室气体排放模拟及其减排措施优化^[14-17]、氮素运移与流失^[18-20]、不同立地条件下土壤碳动态及固存模拟及作物产量评估等方面的研究^[21-24]。

DNDC 模型采用数百个简单方程式交互以再现生态系统中复杂的非线性过程，过程所采用的参数主要基于北美观测数据建立，因此不完全适用于世界其他地区，尤其对于中国而言，DNDC 模型缺乏一些中国特有而复杂的农业耕作特征。随着 DNDC 模型在中国的广泛应用，研究者逐步对模型进行了改进，使 DNDC 模型更适用于中国农业生态系统。模型改进部分主要包括增加了适合中国水稻种植的作物参数和物候学日期^[25]。针对水肥一体化滴灌施肥，引入土壤温度参数对 NO_3^- 和 NH_4^+ 库转化为 N_2O 的比例系数进行校正，提高了模型对土壤 N_2O 排放、土壤 NO_3^- 和 NH_4^+ 库模拟的准确性^[19]；通过修改土壤水氮运移过程的缺省参

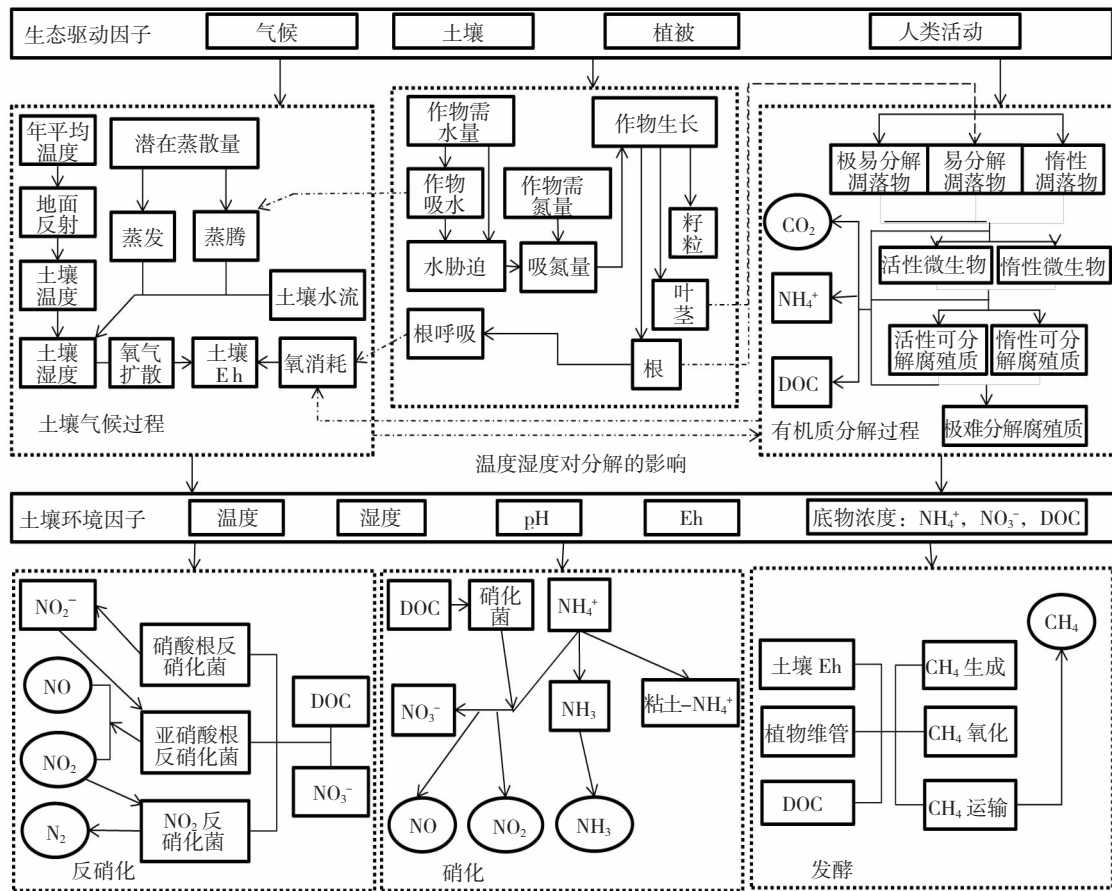


图 1 DNDC 模型结构

数,引入了地表径流曲线和修正的通用土壤流失方程来控制模拟地表径流^[26],加入了覆膜管理模式的参数化模块^[27];通过与遥感(RS)和地理信息系统(ArcGIS)技术结合,进行更为精确的区域温室气体排放模拟研究^[28-30]。与CGE经济模型结合,在作物投入产出上进行链接,评估肥料管理、农药减量以及农机节能等低碳减排措施的效果^[31]。高春雨等^[32]基于DNDC模型构建了测土配方施肥减排GHG的碳交易计量方法,实现了县域或更大区域实施测土配方施肥减排碳交易量核算。

2 DNDC模型在模拟与估算农田温室气体排放中的应用

2.1 模型验证

模型验证是判定DNDC模型模拟效果的先决条件,包括对模型缺省参数的修改、校正和模型缺失模块的补充。研究表明,DNDC模型对点位尺度上温室气体排放田间观测数据模拟精度较高,模拟值与实测值具有较高的拟合度^[8]。如邹凤亮等^[28]对江汉平原稻田中稻-小麦、中稻-油菜、中稻-冬闲3种植模式下温室气体CH₄和N₂O周年排放模拟验证的结果表明,CH₄排放的田间观测值与模拟值决定系数R²为0.92~0.93,N₂O排放R²为0.85~0.98。陈粲等^[33]对吴江水稻生长季农田N₂O排放田间观测值与模拟值的相关系数为0.86。也有报道指出,模拟值与实测值拟合度低。候会静等^[34]对华东水稻控制灌溉下稻麦轮作田温室气体排放的模拟中认为,模型对后茬麦田N₂O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18.1%($p < 0.05$)。张萍等^[35]的研究也得出相同结论。薛彦东等^[36]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,尽管模型能够捕捉到灌溉、降水和施肥等事件所引起的N₂O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N₂O排放通量。谢军飞等^[37]对北京地区大豆农田N₂O排放模拟后认为,对于干旱期和非农业活动期农田N₂O排放反应灵敏度不够,模型低估了N₂O排放通量。受不同地区农田土壤环境、气候、栽培模式和种植管理制度的影响,导致了模型的输出结果与实测值之间存在偏差,因此进行模型校正是保证模拟结果准确性的必要步骤。

2.2 点位和区域尺度模拟

基于点位尺度的温室气体模拟其主要作用是判断模拟值与实测值的拟合度,对模型进行验证,率定模型参数。如瞿振^[38]以燕山东麓旱地春玉米为研究对象,设置减氮、增施有机物料、有机无机肥料配施等处理,对春玉米农田N₂O和CO₂排放通量进行了周年监测。模拟结果表明,模型基本上捕获了由施肥和降水等事件造成的N₂O排放峰,由秸秆还田、施用有机肥、翻耕、播种等管理措施产生的CO₂排放峰,模型能够很好的反映华北旱作春玉米农田N₂O和CO₂通量变化规律,模拟结果可靠。高小叶等^[39]研究了苜蓿绿肥对水稻产量和稻田温室气体排放的影响,在对DNDC模型进行本地化修正的基础上,建立了适宜我国长江中下游地区绿肥-水稻轮作生态系统的DNDC模型。王莺^[40]以甘肃河西地区黑河中游绿洲夏玉米农田为对象,利用模型模拟了该试验点长时间序列下的温室气体通量。

DNDC在点位尺度上将生态驱动因素与环境营力联系起来,并进一步计算各种生物地球化学反应的方向和速率,从而达到预测碳、氮这组生物地球化学元素的量和流。当把DNDC的预测由点位扩展到区域时,实际上是将此区域划分为许多小单元,并认为每个小单元内部各种条件都是均匀的,使DNDC对所有单元进行逐一模拟,从而实现更大尺度上的模拟^[41]。李长生等^[10]对中国农田1990年温室气体排放进行了估算,结果表明中国农业生态系统的CO₂净排放量约9500万t C/a、CH₄约920万t C/a、N₂O约130万t N/a。根据全球增温潜势(GWP)计算,中国农田释放的N₂O对全球增温的影响高于CO₂和CH₄。王效科等^[42]对中国农田土壤N₂O排放通量分布格局进行模拟,发现我国农田土壤N₂O排放西北地区较低,东南地区较高。徐文彬等^[43-44]采用DNDC模型估算了以县为空间分辨尺度的贵州省农业土壤1995年N₂O释放通量和释放量,定量评估了施肥和耕作农业活动对该地区N₂O释放量的贡献。张黎明等^[45]以整个太湖地区37个县234万hm²水稻土为例,分析了3种不同土壤数据单元法对CH₄排放模拟的影响,结果表明以“县”作为最小模拟单元,并用排放量范围来表达区域CH₄气体排放较为合理。姜雨林等^[46]选择华北地区麦-玉(冬小麦-夏玉米)、春玉米连作、麦-豆(冬小麦-夏大豆)、

麦-玉-春玉米和麦-玉-大豆等 5 种代表性轮作模式,模拟与预测分析了不同种植模式下该地区农田土壤温室气体排放的 50 a 长期(2003—2052)变化情况。张凡等^[47]通过 DNDC 模型估算了我国西北地区旱作农田土壤 N₂O 排放的时空变化特征。田展等^[14]利用 DNDC 模型模拟了中国过去 40 a (1971—2010)气候变化对水稻田温室气体排放的影响。孙圆圆等^[48-49]对川中丘陵区典型稻田生态系统 CH₄、N₂O、CO₂ 通量进行了不同轮作制度下不同时空尺度的交换特征及量化研究,进而阐明稻田在特定自然、农业生产条件下排放的温室气体通量及其空间分布特征。李虎等^[50]对 2003 年黄淮海平原河北省范围内的农田土壤温室气体排放进行估算,结果表明,河北省 111 个县(市)的农业土壤 CO₂ 排放量约 3.758×10^6 t C, N₂O 排放量为 40.345×10^6 kg N, 全省释放的 CO₂ 和 N₂O 中有 40% 左右来自冬小麦/夏玉米地。从上述文献中我们可以看到, DNDC 模型已经在中国针对不同时空尺度、不同地域和不同种植体系开展了大量研究。

2.3 敏感性分析

为了减少模型参数的不确定性以提高模拟结果的精度,敏感性分析作为评价和建立模型的必要步骤通常是必须的。例如,陈黎等^[33]对 2013 年吴江水稻田模拟结果认为,年平均温度、土壤 pH、土壤有机碳含量、施肥量和秸秆还田量对不同秸秆还田填埋深度下 N₂O 气体排放非常敏感。谢军飞等^[37]对北京地区大豆农田 N₂O 排放模拟敏感性的分析结果表明,在一定范围内,在其他条件不变的情况下, N₂O-N 排放模拟值对土壤初始表面有机碳含量的变化较为敏感,随着土壤初始表面有机碳含量的增加, N₂O-N 排放模拟值也随着线性增加;另外, N₂O-N 排放模拟值对降水中 N 素的含量变化也较为敏感,随着降水中 N 素的含量的升高 N₂O-N 排放模拟值也随着非线性增加。张啸林等^[51]对南京地区稻麦轮作体系 DNDC 模型灵敏度的检验结果表明,年均温度、土壤容重、土壤有机碳、土壤质地、土壤 pH 等环境因子对 GWP 的影响显著,施用氮肥、秸秆还田量和烤田期长短等管理因子对 GWP 的影响明显。王秀斌等^[52]利用典型潮土 N₂O 排放的田间试验数据对 DNDC 及其参数进行验证,结果表明,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 N₂O 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。因此,进行敏感性分析可以确定影响模拟结果的关键模型参数,从而控制模拟结果。

3 DNDC 模型在农田温室气体减排调控中的应用

DNDC 模型不仅能够模拟和预测温室气体排放量,而且能够评估不同管理方式的减排效果,还可以通过模拟土壤生物化学过程的交互作用,定量评估某种温室气体的减排措施对其他温室气体排放量的影响,并且验证该措施是否具有其他的不利影响^[53]。如徐文彬等^[54]以贵州省玉米-油菜轮作田和大豆-冬小麦轮作田为 N₂O 释放通量测量对象,采用 DNDC 模型定量探讨了上述作物生长季节有机肥施用量、N 肥施用量及施肥日期、N 肥类型和施肥深度、翻耕深度和翻耕日期等变化对亚热带旱田生态系统 N₂O 释放的潜在影响。瞿振^[38]对华北旱作春玉米农田 N₂O 减排的模拟分析表明,有机无机肥料配施和农民习惯处理相比净温室效应降幅达 33.5%。农民习惯施肥+有机肥净温室效应下降 53.9%,农民习惯施肥+秸秆还田净温室效应降幅达 87.4%;农民习惯施肥+减氮 40%+秸秆还田的净温室效应为 0.047 t CO₂-eq/(hm²·a),远小于农民习惯施肥下的 2.3 t CO₂-eq/(hm²·a)。赵峥等^[55]采用 DNDC 模型对减量化施肥和秸秆还田措施下稻麦轮作系统的模拟结果表明,化肥减量 25%+秸秆还田在获得最佳水稻产量的同时有效减少 51.85% 的 N₂O 排放量,但同时会增加 110.03% 的 CH₄ 排放量。徐丹^[56]指出,稻田在减排操作中应尽量控制秸秆还田比例或选择合理的秸秆还田方式,以减少 CH₄ 排放。杨黎等^[57]对东北地区春玉米农田不同施氮和秸秆还田措施下的模拟结果表明,与当地农民习惯施肥相比,优化施氮措施不会明显影响作物产量,能减少 N₂O 排放,可降低温室气体净排放 8%~13%。优化施氮+秸秆还田能在保障供试农田春玉米产量的同时大幅度减少春玉米种植系统温室气体净排放。

4 展望

综上所述,经过 20 多年的探索, DNDC 模型针对中国的农业生态系统进行了大量改进和校准,在我国大多数地区得到了验证和应用,在作物估产、环境评价、农田管理、决策制定和长期预测等方面取得了丰硕成果。然而, DNDC 模型反映了生物地球化学以追踪化学元素迁移变化来探索生

命与环境间的复杂关系,因此它仍然需要不断创新来更加适宜模拟自然界的规律。未来模型在中国的发展需要注重以下几个方面的研究。一是针对中国农业种植体系的特点,增加模型模块,修正模型参数,提高模拟精度;二是采用遥感、地理信息系统技术提高区域尺度模拟和预测的精度,降低模拟结果的不确定性^[58-59];三是建立跨尺度农田生态系统综合评估模型,加强大尺度和长时间序列的温室气体排放模拟与预测研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] M K CAO, F IAN WOODWARD. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change[J]. Nature, 1998, 393: 249-252.
- [3] P SMITH, J U SMITH, D S POWLSON, *et al.* A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments [J]. Geoderma, 1997, 81(9): 153-225.
- [4] S E FROLKING, A R MOSIER, D S OJIMA. Comparison of N₂O emissions from soils at three temperate agricultural sites: Simulations of year-round measurements by four models[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 52: 77-105.
- [5] 巴特尔·巴克, 彭镇华, 张旭东, 等. 生物地球化学循环模型 DNDC 及其应用[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1208-1212.
- [6] 李长生. 陆地生态系统的模型模拟[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 49-57.
- [7] 张钊, 辛晓平. 生物地球化学模型 DNDC 的研究进展与碳动态模拟应用[J]. 草地学报, 2017, 25(3): 445-452.
- [8] 谢海宽, 江雨倩, 李虎, 等. DNDC 模型在中国的改进及其应用进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2760-2770.
- [9] 邢长平, 沈承德. N₂O、CO₂ 温室气体与土壤 DNDC 模型[J]. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(1): 58-63.
- [10] 李长生, 肖向明, S.FROLKING B.MOORE III, 等. 中国农田的温室气体排放[J]. 第四纪研究, 2003, 23(5): 493-503.
- [11] 李虎, 王立刚, 邱建军. DNDC 模型在农田氮素渗漏淋失估算中的应用[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1591-1596.
- [12] C S LI, S FROLKING, T A FROLKING. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 9759-9776.
- [13] C S LI. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 58: 259-276.
- [14] 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.
- [15] 张峰. 中国草原碳库储量及温室气体排放量估算[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [16] 王小国, 朱波, 高美荣, 等. 四川桉柏混交林土壤 N₂O 排放的实测与模拟[J]. 中国环境科学, 2009, 29(3): 242-247.
- [17] 张守都, 栗岩峰, 李久生. 基于 DNDC 模型的东北半湿润区膜下滴灌玉米施肥制度优化[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(2): 113-121.
- [18] 韩宁, 陈维梁, 高扬, 等. 基于 SWAT 与 DNDC 模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2317-2325.
- [19] 陈静. 华北小麦-玉米滴灌施肥下水氮运移和 N₂O 排放研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [20] 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.
- [21] 张琳, 邵景安. 未来 30 年川东平行岭谷区县域农田 SOC 动态模拟[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1848-1857.
- [22] 王德营, 姚艳敏, 司海青, 等. 黑土有机碳变化的 DNDC 模拟预测[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(3): 277-283.
- [23] W ZHANG, F ZHANG, J QI, *et al.* Modeling impacts of climate change and grazing effects on plant biomass and soil organic carbon in the Qinghai Tibetan grasslands[J]. Biogeosciences, 2017, 14(23): 5455-5470.
- [24] 贺美, 王迎春, 王立刚, 等. 应用 DNDC 模型分析东北黑土有机碳演变规律及其与作物产量之间的协同关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 9-19.
- [25] H LI, L G WANG, J Z LI, *et al.* The development of China-DNDC and review of its applications for sustaining Chinese agriculture[J]. Ecological Modelling, 2017, 348: 1-13.
- [26] J DENG, B ZHU, Z X ZHOU, *et al.* Modeling nitrogen loadings from agricultural soils in southwest China with modified DNDC [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116: 2999-3009.
- [27] J HAN, Z K JIA, W WU, *et al.* Modeling impacts of

- film mulching on rainfed crop yield in Northern China with DNDC [J]. *Field Crops Research*, 2014, 155: 202-212.
- [28] 邹凤亮, 曹凑贵, 马建勇, 等. 基于 DNDC 模型模拟江汉平原稻田不同种植模式条件下温室气体排放[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(9): 1291-1301.
- [29] 张远, 李颖, 王毅勇, 等. 三江平原稻田甲烷排放的模拟与估算[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 293-298.
- [30] 张远, 齐家国, 殷鸣放, 等. 辽东湾沿海水稻田温室气体排放的时空动态模拟[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(10): 2250-2258.
- [31] 赵子健, 李广瑜, 顾海英. 低碳农业发展的途径、潜力和间接减排效应[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2018, 36(1): 68-75, 80.
- [32] 高春雨, 高懋芳. 旱地测土配方施肥温室气体减排碳交易量核算[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 212-219.
- [33] 陈粲, 包云轩, 吕青, 等. 基于 DNDC 模型的不同秸秆还田填埋深度下农田 N_2O 气体排放模拟[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(14): 64-67; 74.
- [34] 侯会静, ABUDU SHALAMU, 陈慧, 等. 水稻控制灌溉下华东稻麦轮作农田 N_2O 排放模拟[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 185-191.
- [35] 张萍. 土壤管理对农田温室气体排放的效应研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
- [36] 薛彦东, 任树梅, 杨培岭, 等. 再生水灌溉冬小麦/夏玉米土壤 N_2O 排放 DNDC 模型分析[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(9): 73-78; 85.
- [37] 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.
- [38] 翟振. 北方春玉米农田 N_2O 排放规律及减排措施研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [39] 高小叶, 袁世力, 吕爱敏, 等. DNDC 模型评估苜蓿绿肥对水稻产量和温室气体排放的影响[J]. *草业学报*, 2016, 25(12): 14-26.
- [40] 王莺. 黑河中游绿洲农业管理措施对农田土壤温室气体排放的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [41] 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.
- [42] 王效科, 庄亚辉, 李长生. 中国农田土壤 N_2O 排放通量分布格局研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(8): 1225-1232.
- [43] 徐文彬, 洪业汤, 陈旭晖, 等. 应用 DNDC 模型估算区域农业土壤 N_2O 释放通量和释放量—以贵州省为例[J]. *环境科学*, 2000, 21(2): 11-15.
- [44] 徐文彬, 刘广深, 洪业汤, 等. DNDC 模型对我国旱地 N_2O 释放的拟合对比分析[J]. *矿物学报*, 2002, 22(3): 222-228.
- [45] 张黎明, 于东升, 史学正, 等. 基于不同土壤数据单元法的 DNDC 模型对太湖地区水稻土 CH_4 排放模拟研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(8): 2185-2192.
- [46] 姜雨林, 陈中督, 遆晋松, 等. 华北平原不同轮作模式固碳减排模拟研究[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(1): 19-26.
- [47] 张凡, 王政, 李旭祥. 西北旱区农田土壤 N_2O 排放空间变化特征及影响因素探讨[J]. *地球环境学报*, 2016, 7(3): 301-307.
- [48] 孙园园, 孙永健, 王锐婷, 等. DNDC 模型对川中丘陵区稻田 CH_4 、 N_2O 排放的模拟对比分析[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(Z1): 1003-1010.
- [49] 孙园园, 孙永健, 王锐婷, 等. 基于 DNDC 模型的川中丘陵区不同轮作制度下稻田 CO_2 排放研究[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(4): 530-537.
- [50] 李虎, 王立刚, 邱建军. 黄淮海平原河北省范围内农田土壤二氧化碳和氧化亚氮排放量的估算[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(9): 1994-2000.
- [51] 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 CH_4 和 N_2O 综合温室效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 690-696.
- [52] 王秀斌, 周卫, 梁国庆, 等. 典型潮土 N_2O 排放的 DNDC 模型田间验证研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 925-933.
- [53] 郭佳伟, 邹元春, 霍莉莉, 等. 生物地球化学过程模型 DNDC 的研究进展及其应用[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 571-580.
- [54] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 应用 DNDC 模型分析施肥和翻耕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.
- [55] 赵峥, 周德平, 褚长彬, 等. 不同施肥和秸秆还田措施对稻麦轮作系统碳氮流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 36-41.
- [56] 徐丹. 寒地黑土稻田水肥管理与温室气体排放关系研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [57] 杨黎, 王立刚, 李虎, 等. 基于 DNDC 模型的东北地区春玉米农田固碳减排措施研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 75-86.
- [58] 陈治荣, 蒋刚, 袁杰, 等. 基于 RS 与 GIS 的广东省龙川县农村土地经营权确权探究[J]. *甘肃农业科技*, 2018(1): 77-80.
- [59] 宋立明, 方爱玲, 董青松. 基于 3S 技术的古浪县耕地后备资源调查与评价[J]. *甘肃农业科技*, 2017(4): 32-37.

(本文责编: 陈伟)