应用生态学报 2017年8月 第28卷 第8期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Aug. 2017, **28**(8): 2760-2770 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201708.033

DNDC模型在中国的改进及其应用进展

谢海宽 江雨倩 李 虎* 张 婧 常乃杰 王立刚

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部面源污染控制重点实验室/中国农业科学院-美国新罕布什尔大学可持续农业生态系统研究联合实验室, 北京 100081)

摘 要 DNDC模型是目前国际上最成功的生物地球化学模型之一,可以被发展为适合一个特定国家或地区环境条件的模型.我国科学家经过不断的改进和扩充,发展了适用于中国特有的农业生态系统的版本.通过修改土壤水氮运移过程的缺省参数,引入了地表径流曲线和修正的通用土壤流失方程来控制和模拟地表径流,加入了薄膜覆盖管理模式的参数化模块,补充了种养结合的子模型.这些改动不仅增加了模型模拟土壤水氮运移、氮素淋失、地表径流的能力,而且提高了模型在不同生产管理模式下的应用范围.改进后的模型针对土壤有机碳变化、温室气体排放、氮素平衡等方面进行了大量验证,并在点位和区域尺度上进行了广泛应用;此外,对DNDC模型存在的问题,如模拟结果不准确、模型参数矫正困难、模型模块不足等进行了讨论;最后,明确了模型在中国农业生产中的贡献,以期为模型的研究和应用提供参考,更好地服务于中国农业生产.

关键词 DNDC;中国;农业;改进;应用

Modification and application of the DNDC model in China. XIE Hai-kuan, JIANG Yu-qian, LI Hu*, ZHANG Jing, CHANG Nai-jie, WANG Li-gang (*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agricultural Non-point Source Pollution Control/China Joint Research Laboratory for Sustainable Agro-ecosystem Research between Chinese Academy of Agricultural Sciences and University of New Hampshire (CAAS-UNH), Beijing* 100081, *China*).

Abstract: The DNDC model is one of the most successful biogeochemical models, which can be applied to a specific country or regional environment condition. Through continuous improvement and modification, scientists in China have developed a unique version of the model adapting to agricultural ecosystem of China, such as modifying the default parameters of soil water and nitrogen transport processes, introducing the soil conservation service curve and modifying universal soil loss equation to control and simulate the surface runoff, establishing the parameterized module of the film mulching management practice, and adding the manure management sub-model into the original version. These changes could not only increase the capability of the model to simulate the soil water and nitrogen migration, nitrogen leaching and surface runoff, but also expand the application range in different agricultural ecosystems within various management modes. The improved model had been tested against a large number of observations on soil organic carbon, greenhouse gas emissions and nitrogen balance in typical agricultural ecosystems, and then applied on both site and regional scales in China. Furthermore, this paper discussed some problems of the DNDC model, such as inaccuracy of the simulation results, difficulties in the model parameter correction, and inadequate model module. Finally, the developing direction of the model was proposed, so as to enhance the applicability of the model, and more importantly, to serve agricultural policy making in China.

Key words: DNDC; China; agriculture; modification; application.

本文由国家自然科学基金项目(41671303)、北京市自然科学基金项目(6162024)、农业部"948"项目(2015-Z14)、国家重点研发计划项目(2016YFE0101100, 2016YFD0201204)和中国农业科学院创新工程项目资助 This work was supported by the Natural Science Foundation of China (41671303), the Beijing Municipal Natural Science Foundation (6162024), the "948" Project of the Ministry of Agriculture (2015-Z14), the National Key Research and Development Plan of China (2016YFE0101100, 2016YFD0201204) and the Funds for Science and Technology Innovation Project from the Chinese Academy of Agricultural Sciences.

2017-03-17 Received, 2017-05-22 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lihu0728@sina.com

中国作为农业大国，“十二五”以来，其农业发展取得了前所未有的好成绩，粮食综合生产能力显著提高，然而，农业生产中不合理的施肥、灌溉等管理措施已经造成了越来越突出的环境问题，如 CO_2、CH_4、N_2O 等温室气体排放量增大、土壤肥力下降、氮磷损失造成的面源污染等问题，已经引起科学家和政府各部门的高度重视.根据《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》[1]，中国农业活动产生的 CH_4 和 N_2O 分别占全国总排放量的 56.6% 和 73.8%，农业源占全国温室气体排放总量的 11.0%，我国政府在气候变化外交谈判中正面临着来自各方的巨大压力.此外，中国农田氮素淋失的环境风险也不容忽视，据初步估计，我国当前化学氮肥的实际作物利用效率仅在 30.0% 左右[2]，农田每年氮素流失量为 4×10^6 t 左右，约占化学氮肥用量的 19.0%[3]，非点源氮污染已成为造成农区水体污染的主要原因[4].因此，正确评估农业生产的碳氮循环过程是摆在科学家面前的一大课题.

然而，农业生态系统碳氮循环的源、库、流及其反馈机制非常复杂，尤其在人为干扰下会更加复杂，大多数因果关系都是非线性的，简单的经验性模型无法应用于此类复杂系统，为了描述、预测这一复杂的系统过程，应用过程模型（又称机理模型）不可避免地成为一种重要而被广泛接受的研究方法.迄今为止，国际上已开发出许多功能各异、能描述碳氮循环的复杂的生物地球化学过程模型，如比较著名的 CENTURY、DAYCENT、ROTHC、WNMM 和 DNDC 模型等.其中，生物地球化学模型（DeNitrification-DeComposition，DNDC）模型与这些模型相比，最大的特点就是除能同时模拟 CO_2、CH_4 和 N_2O 排放过程外，还能定量评价对作物产量、氮素淋失等的综合调控机制，已成为各国科学家研究农业生态系统碳氮循环重点关注的模型之一.DNDC 模型还被发展为适合特定国家或地区环境条件的模型.如 Brown 等[5]发展了 UK-DNDC 模型，尤其适用于英国的气候和土壤环境，并用该模型估算了英国农业土壤 N_2O 排放量；Saggar 等[6]建立了专门用于新西兰生态系统的 NZ-DNDC 模型，并模拟了新西兰牧草地 N_2O 排放量；随着各项研究工作的深入，我国科学家经过不断的改进和扩充，也发展了适用于中国特有的农业生态系统的 DNDC 模型，不仅模型本身对中国农业生产中碳氮循环过程或机理的描述越来越精细，而且在评估和预测气候变化或管理措施的改变对作物产量、土壤碳的固定、温室气体排放以及面源污染的综合影响取得了较好的应用效果.

为了模型更广泛和有效的应用，本文旨对 DNDC 模型在我国的应用进行全面系统的总结，并提出模型应用需要注意的问题，指出模型本身存在的缺陷和未来的发展方向，明确模型在中国农业生产中的贡献，不仅可以为我国碳氮循环研究提供方法参考，而且可更好地服务于中国农业生产，为综合环境管理提供科学依据和政策建议.

1　DNDC 模型在中国的改进

DNDC 模型由美国 New Hampshire 大学 Li 等[7]于 1992 年建立，最初是以反硝化作用和分解作用为主要模拟过程，用于美国农业土壤中 N_2O、CO_2 等温室气体的排放.随着科学技术的发展，农田管理措施也有了很大改进，模型之前所拥有的模块已经不能满足当前的实际情况，在模型中加入新的模块已经成为模型发展的一项重要任务，比如引入了一个虚拟水库来控制排水流，并采用 Langmuir 方程模拟土壤中铵根离子的吸附与解吸过程，从而提高了模型模拟土壤水氮运动的能力[8].然而，针对中国特有而复杂的农业生态系统，如气候时空差异大、多作物轮作、地块小差异大、农田管理新技术新材料不断出现等，DNDC 模型仍缺乏合适的参数和功能模块，因此，中国的研究者根据不同需求对模型进行了不断的改进和扩充，不仅模型本身对过程或机理的描述越来越精细，也使 DNDC 模型可以更适应我国农业生产的具体情况.

1.1　氮的淋溶流失

氮的淋溶所引起的环境问题越来越受到广泛关注.淋溶不仅受地理条件或水文过程控制，而且受植物、土壤环境制约.李虎等[9]利用 DNDC 模型对山东省典型作物种植模式冬小麦地的水分和氮素淋失量进行估算，并用田间实测到的土壤淋溶水量和硝态氮的垂直运移规律来验证，发现模型对土壤中水分和氮素运移模拟的准确性还存在一定偏差，尤其是对氮素淋失量的模拟，其主要原因是模型在一个地方设定的默认参数值，应用到另外一个地方时，可能需要修改和验证内部参数，这就需要大量的田间实测数据.因此，Li 等[10]进一步利用中国北方地区 4 种典型种植模式（包括冬小麦/夏玉米轮作、冬小麦/大葱间作、春玉米和设施蔬菜）不同处理的观测数据，采用逐步测试方法对模型中控制水、氮运移的 3 个缺省参数进行测试和修改，校正后的模型不仅提高了模型模拟土壤中水、氮迁移转化过程，同时可

以在不影响其他子模块的条件下准确模拟作物的产量和温室气体的排放,进一步扩大了模型的应用范围,也为研究农田土壤氮素淋失机理及其环境效应提供了重要工具.

1.2 氮的径流流失

DNDC 模型是根据一维垂向土壤水分的基本方程来动态模拟土壤中水分的运动过程,如:降雨、蒸发、蒸腾、渗透等,其最大的缺点是不能模拟土壤中水分的侧向和水平流动,因此不能够估算泥沙沉淀量以及营养元素与地表径流间的相互关系.而要全面预测氮素的运移过程及其环境效应,土壤水分水平流的信息是必需的.Deng 等[11]为了使模型可以在日尺度上同步模拟水流量和氮的生物地球化学循环,将可以表示地表径流曲线(SCS 曲线)和修正的通用土壤流失方程(MUSLE 方程)并入 DNDC 模型中.这些改动同时提高了模型对氮素通过地表径流流失和地下排水流失的模拟能力.在四川盐亭县的验证结果表明,修改后的 DNDC 模型在地表径流量、地表径流的氮损失方面的模拟值与实测值的 R^2 分别为 0.99、0.98,作物产量的平均误差为 7.7%.Zhao 等[12]为了使 DNDC 模型可以准确模拟稻田氮的径流流失,对 DNDC 模型进行了一些修改,包括:加入一个田地边缘高度因子;对氮肥在土壤和水中重新定义了分区;允许尿素溶解进水中;校准了 DNDC 模型中的土壤淋溶率.修改后的模型提高了水稻产量、地表径流的 N 损失、地表淋溶的 N 损失等方面的模拟精度.

1.3 覆膜节水

水资源缺乏和分布不均等问题,严重制约着我国农业和区域经济的发展.覆膜节水栽培技术已在我国北方地区,尤其是西北地区等得到了大力推广.Han 等[13]为了使 DNDC 模型可以应用于干旱节水覆膜农业,在原有的 DNDC 模型中加入了覆膜范围和覆膜持续时间 2 个新参数,用户通过定义这两个参数可以模拟薄膜覆盖的影响.由于在原来的 DNDC 模型中,当地表处于裸露状态时,土壤表层温度等于来自气象数据的每日平均空气温度和该日最高空气温度的平均值[14].而在覆膜条件下,土壤与空气的热交换会受到阻碍,因此修改了覆膜条件下的 2 个参数:降低土壤蒸发,提高土壤温度.并且设定了新的土壤温度(0~50 cm)计算方式.土壤温度、水的投入、风速等的影响都可以在模型中通过 Penman-Monteith 方程及其相关的方程计算,使修改后的模型可以定量化计算出土壤蓄水量以满足作物每日的生长需水.经过改进后的 DNDC 模型可以较好地模拟土壤温度和土壤水分,在薄膜覆盖条件下,R^2 分别达到 0.86 和 0.72;对照区 R^2 也分别达到0.80和0.79.值得一提的是,不管是对照区还是薄膜覆盖区改进后的模型对于作物产量的模拟都偏高,这表明模型仍有进一步改进的空间.

1.4 种养系统结合

种养系统结合作为一种典型的生态农业循环模式,对减少农业面源污染、节约肥水资源、优化资源配置具有重要作用,是促进现代农业可持续发展的重要途径之一.Gao 等[15]模拟了山东小青河流域畜禽养殖系统和农田生态系统的碳氮循环,在最初的 DNDC 模型中加入了畜禽养殖模块,以追踪种养结合系统的碳氮循环,并可以量化来自养殖场和农田中通过大气和水损失的氮,形成了 Manure-DNDC 模型.改进后的模型能够完全模拟种养结合生态系统的碳、氮和水的循环,通过计算每日来自养殖场和农田的 N_2O、NO、NH_3、N_2 流量,可以计算出通过大气损失的氮;模型中加入了可以表示地表径流的 SCS 曲线和可以表示土壤流失的 MUSLE 方程,用来模拟氮的地表径流和地下淋溶,并且可以模拟田间和流域的土壤水文状况.经过大量观测数据验证表明,Manure-DNDC 模型在作物系统方面可以很好模拟冬小麦和夏玉米的生长曲线;在家禽养殖系统方面可以很好地模拟氮的相关数据,但是排泄物中的碳数据低于实测值.总的来说,改进后的模型可以用于种养结合系统氮素循环的模拟研究,在碳循环研究方面还需进一步改进.

2 DNDC 模型在中国的验证和校正

模型验证是利用实测数据和模型预测结果进行对比分析,以确定模型是否符合实际.目前,对比分析的指标主要是均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)[16].RMSE 为 0 时,表示模拟效果最好;决定系数(R^2)越接近 1,表明模拟值与实测值的拟合度越好.表 1 总结了 DNDC 模型在我国不同区域使用时,模拟值与实测值拟合程度的相关性情况.如徐文斌等[17]以贵州田间测得的 N_2O 通量验证了该模型,结果表明模型能有效反映气候、农业活动及土壤性状对 N_2O 释放的影响;李虎等[9]在山东济南对 DNDC 模型对于氮素淋失的估算进行验证,模型较好地模拟了土壤中 NH_4^+ 和 NO_3^- 随灌溉和施肥条件不同的动态变化.大多数的研究都表明,模拟值与实测值之间有较好的相关性.如王立刚等[18]在河北曲

周试验站的土壤有机碳(SOC)含量模拟值和实测值的 R^2 达到 0.97；Yu 等[19]在新疆模拟棉花田 CO_2 排放 R^2 为 0.81；靳帅等[20]在山东省泰安市模拟的农田 N_2O 排放 R^2 为 0.82～0.87.由于农田土壤环境受多种因素的影响，并且不同地区气候、土壤类型差异较大，导致模型的输出结果与实测值之间存在偏差，这就需要对模型进行校正.模型的校正包括对模型缺省参数的修改和模型缺失模块的补充.由于模型的代码是不公开的，增加模型的模拟模块存在一定难度，因此，DNDC 模型的校正主要集中在对模型缺省参数的修改上.如靳帅等[20]在山东省泰安市大汶口镇试验点采用试错法对 DNDC 模型中与土壤性质有关的参数(如初始硝态氮、铵态氮、土壤孔隙度、田间持水量等)进行校正，校正后的模型可以更准确地模拟该地的土壤性质，同时可以较好地模拟玉米生长期内 N_2O 的排放规律；薛静等[21]在河北省曲周试验站也采用试错法对 DNDC 模型中与冬小麦和夏玉米生长相关的参数(如籽粒最大生物量、生物量在籽粒的分配比例、叶面积指数、固氮系数等)进行校正，校正后的模型可以较好地模拟当地农田叶面积指数、作物产量，同时模拟和再现当地农田土壤 N_2O 的季节变化特征；秦发侣等[22]通过江苏省宜兴市的长期定位试验采用贝叶斯推断的方法，对模型参数不确定性进行研究，结果表明在 DNDC 模型输入参数数据质量不明的情况下，利用贝叶斯推断和 MCMC 方法能够有效地实现模型输入参数的自动校正和 SOC 模拟结果不确定性的定量评价.

表 1　DNDC 模型模拟值与实测值对比和验证

Table 1　Comparison and validation for DNDC prediction against experimental measurement

作物系统 Crop system	验证 Validation	决定系数 Correlation coefficient (R^2)	均方根误差 RMSE	地点 Site	文献 Literature
小麦/玉米/大葱等 Wheat/corn/green onion, *etc.*	产量、N 淋失	–	–	山东省济南市	[9]
小麦/玉米/油菜等 Wheat/corn/oil, *etc.*	N_2O	0.72～0.76	–	贵州省农业科学院土壤肥料研究所实验站	[17]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/ summer corn	SOC	0.97～0.98	–	河北邯郸市曲周试验站	[18]
棉花 Cotton	CO_2	0.81	–	新疆	[19]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/ summer corn	N_2O	0.82～0.87	–	山东省泰安市	[20]
大豆 Soybean	N_2O	0.574	–	北京市昌平区	[23]
玉米 Corn	SOC	0.975	–	内蒙古武川中后河，黑龙江省龙江县	[24]
棉花/冬小麦/夏玉米 Cotton/winter wheat/summer corn	CO_2、N_2O	0.79～0.90	–	河北省邯郸市	[25]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/ summer corn	N 淋失	0.94	–	河南省封丘县	[26]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/ summer corn	SOC	–	<10.0%	河南省封丘县	[27]
春小麦/豌豆 Spring wheat/peas	SOC	0.895～0.977	–	甘肃省定西县	[28]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/ summer corn	N_2O、地表温度	0.980(地温)	–	河北省农林科学院衡水试验站	[29]
小麦/水稻 Wheat/ rice	N_2O、氨挥发	0.53、0.68	–	湖北省农业科学院南湖实验站	[30]
小麦/玉米/大葱等 Wheat/corn/green onion, *etc.*	淋溶水量、N 淋失	–	–	小青河流域	[31]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/ summer corn	再生水、N_2O	0.701(再生水)	–	北京市通州区	[32]
水稻 Rice	SOC	0.95～0.98	<10.0%	西南大学试验农场	[33]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/ summer corn	产量、N 淋失	–	–	四川省盐亭县	[34]
水稻/小麦 Rice/ wheat	N_2O、CH_4	–	–	南京市秣陵镇	[35]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/ summer corn	SOC、产量	–	–	陕西省杨凌县	[36]
春玉米 Spring corn	SOC	–	<10.0%	吉林省公主岭市	[37]
春玉米 Spring corn	CO_2、N_2O、产量	–	<14.0%	辽宁省凌海市	[38]
小麦/玉米 Wheat/ corn	SOC	0.904	–	新疆乌鲁木齐市	[39]
小麦/玉米 Wheat, corn	SOC	–	<10.0%	河南省郑州市、北京市昌平区	[40]

SOC：土壤有机碳 Soil organic carbon. 下同 The same below.

3 模型在中国不同农田尺度上的应用

3.1 点位尺度

DNDC 模型在国内的应用始于 20 世纪 90 年代后期,主要集中在农田 SOC 动态变化、农田温室气体如 CO_2、CH_4、N_2O 的排放以及农田氮素淋失估算.表 2 是 DNDC 模型在我国点位尺度上的运用情况.

3.1.1 作物产量 陈海心等[36]用 DNDC 模型模拟了陕西省杨凌示范区不同施肥处理下的 20 年间小麦、玉米产量的变化;杨黎等[38]在辽宁省凌海市用 DNDC 模型模拟了不同管理措施对春玉米产量的影响,结果表明,减少氮肥、增加秸秆还田,有助于提高该地区春玉米产量.

3.1.2 N_2O 排放 靳帅等[20]用 DNDC 模型模拟了山东省泰安市大汶口镇冬小麦夏玉米的 N_2O 排放规律,研究发现在大喇叭口期、小喇叭口期的排放峰值受降雨和基肥的控制,乳熟期排放峰值受降雨和追肥的控制.徐文斌等[41]以贵州省农业科学院土壤肥料研究所试验站田间测得的 N_2O 通量验证了该模型,并用模型估算了不同施肥条件和耕作措施、不同降雨量和温度下该地区的 N_2O 排放通量.

3.1.3 有机碳动态变化 王立刚等[18]在河北省邯郸市曲周试验站用 DNDC 模型模拟了不同翻耕方式对土壤有机碳变化的影响,结果表明免耕并施用 112.5 kg · hm^{-2} 氮肥(纯 N)再配合每年秸秆还田 4500 kg · hm^{-2} 的土壤有机碳比初始值增加了 62.0%,翻耕并施用 187.5 kg · hm^{-2} 氮肥、150 kg · hm^{-2} 磷肥再配合每年秸秆还田 4500 kg · hm^{-2} 的土壤有机碳含量比初始值增加了 56.0%.陈长青等[27]在河南省封丘县用 DNDC 模型模拟了不同施肥处理下不同时间段内土壤有机碳的变化,结果表明施用有机肥土壤有机碳的增加效果比化肥效果明显.

3.1.4 土壤呼吸 Yu 等[19]在新疆用 DNDC 模型模拟了棉田的土壤呼吸,结果表明模型大约低估了 CO_2 累积排放的 15.0%,但是模型可以较好地模拟根呼吸;孙园园等[42]在四川金堂县地区模拟了冬水田-水稻田、油菜-水稻田、小麦-水稻田 3 种轮作制度下的土壤呼吸量,结果表明:3 种模式下水稻生长期 CO_2 排放通量差别不大,但是在非水稻生长期油菜-水稻田、小麦-水稻田 2 种模式下 CO_2 排放通量分别为冬水田-水稻田休闲期的 5.8 和 6.2 倍.另外,根际呼吸是植物生长的生态系统中土壤呼吸的主要部分,整个生长期的根呼吸贡献率平均为 59.1% ~ 63.0%.

3.1.5 淋溶淋失 李虎等[9]在山东省济南市唐王庄用 DNDC 模型模拟了该地农田和设施蔬菜的土壤氮淋失情况,结果表明由于土壤中氮的迁移转化是非常复杂的过程,同时又受降雨和灌溉等因素的影响.虽然模拟结果与实际值间存在偏差,但考虑到田间实际情况的复杂性,模型已较好地表现了土壤氮素的基本迁移规律.朱波等[34]模拟了四川盐亭县紫色土农业生态试验站土壤氮素淋失情况,结果表明该地小麦玉米轮作期内累积氮流失量高达 36.93 kg · hm^{-2},占全年氮肥用量的 13.2%.

3.2 区域(或流域)尺度的应用

模型在点位尺度上的验证和工作,是为了在更

表 2 DNDC 模型在点位尺度上的应用
Table 2 Point scale studies using the DNDC model

作物系统 Crop system	验证 Validation	地点 Site	文献 Literature resources
小麦/玉米/大葱等 Wheat/corn/green onion, *etc.*	产量、N 淋失	山东省济南市	[9]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/summer corn	SOC	河北省邯郸市曲周试验站	[18]
棉花 Cotton	CO_2	新疆	[19]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/summer corn	N_2O	山东省泰安市	[20]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/summer corn	SOC	河南省封丘县	[27]
春小麦/豌豆 Spring wheat/peas	SOC	甘肃省定西县	[28]
水稻 Rice	SOC	西南大学试验农场	[33]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/summer corn	产量、N 淋失	四川省盐亭县	[34]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/summer corn	SOC、产量	陕西省杨凌示范区	[36]
春玉米 Spring corn	SOC	吉林省公主岭市	[37]
小麦/玉米 Wheat/corn	SOC	新疆乌鲁木齐市	[39]
小麦/玉米/油菜 Wheat/corn/oil	N_2O	贵州省农业科学院土壤肥料研究所实验站	[41]
水稻 Rice	CO_2	四川省金堂县	[42]
水稻 Rice	C、N 循环	湖北省梁子湖湿地	[43]
小麦 Rice	C、N 循环	陕西省长武县	[44]

大的区域尺度上进行应用.任何重大的生态环境问题都是在大尺度上发生的,模型只有在大区域或国家尺度上有适应性才值得研究和推广.DNDC 模型的区域模拟功能是在点位模拟的基础上进一步扩展的,即将区域划分为许多小的单元,并认为每一小单元内部各种条件都是均匀的,模型所需要的各个模拟单元因地而异地输入参数,如气象、土壤、作物类型和管理措施等均来自提前建立的 GIS 数据库,模型对所有单元逐一模拟,每一单元每一种作物类型以最敏感因子(如土壤有机质)的最高、最低值分别运行模型 2 次,以减小误差,每一模拟单元的结果进行加和即得到区域模拟结果.表 3 列举了部分 DNDC 模型在我国区域尺度上的应用.

3.2.1 作物产量　邱建军等[45]用 DNDC 模型模拟了土壤有机碳变化对作物产量的影响,结果表明当土壤有机碳含量增加 1 g C · kg^{-1},东北地区玉米产量可增加 176 kg · hm^{-2};华北地区夏玉米与冬小麦轮作,产量可增加约 454 kg · hm^{-2};西北玉米产量可增加 328 kg · hm^{-2};中南地区单季水稻产量可增加 185 kg · hm^{-2};华东地区双季稻产量可增加 266 kg · hm^{-2};西南地区水稻与冬小麦轮作产量可增加 229 kg · hm^{-2}.Chen 等[46]在国家尺度上用 DNDC 模型模拟了我国水稻产量变化,模拟结果与当年实测结果有较好的一致性.

3.2.2 N_2O 排放　李长生等[47]用 DNDC 模型以中国 2483 个县的点位试验模拟估算了中国农田生态系统的温室气体 N_2O 排放,结果表明减少 N_2O 的有效措施是根据土壤氮矿化率来确定因地而异的施肥量,有效降低高肥力土壤因过量施肥而造成 N_2O 高排放的现状.Qiu 等[48]在黑龙江、河北、甘肃、湖南、江苏、四川不同农田生态系统实测 N_2O 的排放量验证了 DNDC 模型,并且预测了该地区不同施肥和秸秆还田处理下的 N_2O 释放通量;Li 等[49]还采用 DNDC模拟了水稻田温室气体的排放并进行区域预

表 3　DNDC 模型在区域尺度上的应用
Table 3　Regional application of the DNDC model

作物系统 Crop system	验证 Validation	地区 Region	文献 Literature resources
作物/蔬菜和养殖场 Crop/vegetable and farm	N 淋失	山东小清河流域	[15]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/summer corn	N_2O、CO_2	河北省	[25]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/summer corn	N 淋失	天然文岩渠流域	[26]
小麦/玉米/蔬菜 Wheat/corn/vegetables	N 淋失	山东小清河流域	[31]
小麦/玉米/水稻等 Wheat/corn/rice, *etc.*	产量	国家尺度	[45]
水稻 Rice	产量、CO_2、N_2O、CH_4	国家尺度	[46]
小麦/玉米/水稻等 Wheat/corn/rice, *etc.*	N_2O、CO_2、CH_4	国家尺度	[47]
小麦/玉米/水稻等 Wheat/corn/rice, *etc.*	SOC、CH_4、N_2O	国家尺度	[48]
水稻 Rice	N_2O、CO_2、CH_4	国家尺度	[49]
冬小麦/夏玉米 Winter wheat/summer corn	N_2O、CO_2	河北省	[50]
小麦/玉米/水稻等 Wheat/corn/rice, *etc.*	SOC	国家尺度	[51]
小麦/玉米/水稻等 Wheat/corn/rice, *etc.*	SOC	国家尺度	[52]
小麦/玉米/水稻等 Wheat/corn/rice, *etc.*	SOC	国家尺度	[53]
小麦/玉米/水稻等 Wheat/corn/rice, *etc.*	氮素平衡	国家尺度	[54]
水稻 Rice	CH_4	国家尺度	[55]
水稻 Rice	CH_4	三江平原	[56]
大豆 Soybean	N 循环	三江平原	[57]
小麦/玉米/水稻等 Wheat/corn/rice, *etc.*	N_2O	国家尺度	[58]
水稻 Rice	CH_4、N_2O	长江三角洲	[59]
玉米/大豆/高粱等 Corn/soybean/sorghum	SOC	辽宁省	[60]
玉米/大豆/小麦 Corn/soybean/wheat	SOC	内蒙古自治区	[61]
小麦/玉米/大豆等 Wheat/corn/soybean, *etc.*	SOC	黑龙江、吉林、辽宁省	[62]
玉米 Corn	SOC	黑龙江、吉林、辽宁省	[24]
小麦/玉米/水稻等 Wheat/corn/rice, *etc.*	SOC	陕西省	[63]
玉米/大豆/小麦等 Corn/soybean/wheat, *etc.*	SOC	密云水库上游	[64]
水稻 Rice	CH_4	太湖地区	[65]
小麦/玉米/大豆等 Wheat/corn/soybean, *etc.*	SOC	国家尺度	[66]
水稻 Rice	CH_4	太湖地区	[67]
水稻 Rice	CH_4	三江平原	[68]
水稻 Rice	气温、降雨	国家尺度	[69]

测,对不同管理措施下中国水稻生产 20 年后的净温室气体排放量以及产量的增加情况进行预测.Li 等[50]模拟了不同的农田管理措施对华北平原冬小麦/夏玉米轮作地温室气体排放的影响,结果表明增施有机肥和增加秸秆还田比例替代增施化肥能有效降低该区域温室气体的排放.

3.2.3 有机碳动态变化 韩冰等[51]以模型估算了中国农业生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力,指出中国农田土壤固碳潜力为-0.969 Pg,从总固碳潜力看,湖南省最高,达 13.5Tg,黑龙江省最低,为-421.4 Tg,有 21 个省市自治区的农田土壤固碳潜力为负值,表明这些省市自治区的农田土壤应释放相应数量的碳素才会达到平衡.Wang 等[52]利用模型模拟了中国 6 个主要农区土壤有机碳长期的动态变化,并指出增加秸秆还田比例和增施有机肥有利于提高土壤碳汇.Tang 等[53]以模型估算了中国不同地区农田土壤的 SOC 含量以及每年损失量.

3.2.4 土壤呼吸 李虎等[25]用 DNDC 模型对黄淮海平原河北省范围内农田土壤 CO_2 排放量的估算表明,全省释放的 CO_2 中有 40.0%左右来自冬小麦/夏玉米地,并提出减少该地区农业土壤 CO_2 排放量的措施应集中用于排放量高的县市和这些地区的冬小麦/夏玉米地.DNDC 模型不仅可以预测农田温室气体排放,还可以定性识别出温室气体排放高的地区,从而有针对性地根据当地情况提出具体管理措施.

3.2.5 淋溶淋失 李虎等[31]用 DNDC 模型模拟了山东省鲁北平原南部小清河流域农田和设施蔬菜地的氮素淋失情况,结果显示流域氮淋失存在较大的空间区域差异,根据不同地区的实际情况进行水氮管理,对减少氮素的无效丢失十分必要.邱建军等[54]模拟估算了中国农田的氮素平衡,从结果可以看出在氮肥施用量高的地区,淋溶丢失的氮素也较多.

3.2.6 CH_4排放 Li 等[55]用 DNDC 模型模拟了集中排水和连续淹水措施下中国水稻田 CH_4的排放状况,对 1990 年中国水稻田 CH_4排放模拟的结果表明:集中排水措施下的排放量为 2.3~10.5 Tg $CH_4 \cdot a^{-1}$,连续淹水措施下的排放量为 8.6~16.0 Tg $CH_4 \cdot a^{-1}$.表明集中排水可以同时降低 CH_4排放的最小值和最大值,并且通过量化对大气的影响,发现降低中国水稻田 CH_4排放对空气质量有重要影响.Zhang 等[56]用 DNDC 模型并结合遥感制图技术对三江平原水稻 2006 年的 CH_4排放进行模拟,模拟结果与实际结果相比,每年每公顷 CH_4排放量在空间上的差异为 38.6~943.9 kg,并且,土壤 SOC 含量高、作物生长周期长、生物量大都会增加水稻田 CH_4的排放.

4 模型的不足

4.1 模拟结果的不准确

总的来说,DNDC 模型可以准确模拟温室气体排放和土壤有机碳变化等,但还存在一些不足.如谢军飞等[23]的研究结果基本正确模拟旱地农田大豆 N_2O 排放通量的生长期变化,但模型低估了干旱期和非农业活动期农田 N_2O 排放通量.主要是由于模型认为农田排放 N_2O 在时间上是不连续的,其排放过程受降雨和农业活动所驱动.因此,对于干旱期和非农业活动期农田的 N_2O 排放反应灵敏度不够.李虎等[9]在山东济南唐王庄的研究结果表明,模型在田间灌溉水量较大的情况下对淋溶水量的估计偏高.这可能是由于土壤中各剖面的饱和导水率不同所致,而模型只能详细模拟 0~50 cm 土层的土壤水分运动,对于更深的土层,模型认为各土层物理性质均一.勾继等[70]在华东地区稻麦轮作农田生态系统的研究结果表明:小麦生长前期 N_2O 排放实测值比模拟值高 3.0~4.0 倍,模拟的 N_2O 排放总量低于实测值的原因,很可能是低估了反硝化作用的 N_2O 排放量.表明模型还需要得到更广泛的校准和验证.

4.2 模型校正的困难

DNDC 模型需要输入的参数较多,并且受环境和气候因素影响较大.不同区域的生态环境和气候不同,因此 DNDC 模型在应用到不同地区的时候可能需要对参数进行修改,即对模型进行校正.目前模型校正主要面临着两个问题:1)如何准确找到校正的参数;2)模型的代码是不公开的.模型中任何一个单独的过程如作物生长、土壤质地、气候条件等子模型对土壤 C、N 的动态变化、N_2O 排放等都是相关的,这就使得模型的校正变得困难,即使是有编码能力的研究者,也很难去准确找到需要校正的参数.目前,广泛使用的模型参数校正方法只有两种(试错法和贝叶斯推断法),从而限制了提高模型的准确性.

4.3 模型模块的缺乏

DNDC 模型最初是针对农田生态系统中碳氮循环过程而开发的,几十年来经过不同研究工作者的改进已经可以模拟包括森林、草地、湿地等所有生态系统的碳氮循环.随着科学技术的发展,农田管理措

施也有了很大改进，模型之前所拥有的模块已经不能满足当前的实际情况.比如近年来设施蔬菜的种植面积逐年增加，成为氮素污染的重要原因之一；中国农业生产中磷流失造成的水体污染日益严重；生物肥料、微量元素肥料等新技术的应用，使模型之前所拥有的模块已经不能满足当前的实际情况，因此在模型中加入新的模块已经成为模型发展的一项重要任务.如在模型中加入设施菜地大棚环境模块、磷流失子模型模块、新型肥料的施用模块.模型的使用是为了更好地服务科学试验，当其不能满足科学工作的需要时，我们应该勇于创新，建立适合当前环境的新型 DNDC 模型.

4.4　区域尺度模拟的不确定性

模型发展的主要目的是为了在区域尺度上的应用.由于气候的空间差异性很大，从点位尺度上的验证到区域尺度的应用均非常困难.虽然 DNDC 模型有按照比例从点位扩大到区域尺度模拟的能力，但受输入数据的质量和模型中对生物化学过程模拟的精确性的限制，也造成了区域尺度上模拟结果的不确定性.为了解决这个问题，首先应该提高输入数据如气候、土壤性质、农田管理措施的准确性，其次提高模型对土壤中水氮运移等过程的模拟能力.

5　结　　语

DNDC 模型已经在我国大多数地区得到了验证和应用.并且经过科学家们的不懈努力，对模型进行了改进和校准，使其已经适应于中国特色农业生态系统.目前 DNDC 模型在我国可以应用于不同的生态系统和生态区，包括作物生态系统、林地生态系统、湿地生态系统，草地生态系统以及畜禽生态系统等.可以应用于以下模拟和估算：农田温室气体（如 N_2O、CH_4、CO_2 等）的排放；土壤 SOC 含量的变化；氮素的收支平衡和土体水分渗漏；作物产量变化等.总之，DNDC 模型对于宏观区域试验研究有着积极的指导作用，今后我们应注重其在农业领域的应用和发展，这对于解决中国当前农业生产中的生态环境问题，以及找到解决区域生态问题的具体措施有极大的帮助.

参考文献

[1] Su W（苏　伟）. The Second National Information Bulletin on Climate Change in People's Republic of China. Beijing: China Economic Publishing House, 2013 (in Chinese)

[2] Zhang F-S（张福锁）, Wang J-Q（王激清）, Zhang W-F（张卫峰）, *et al*. China's main food crop fertilizer utilization present situation and way to improve. *Acta Pedologica Sinica*（土壤学报）, 2008, **45**(5): 915-924 (in Chinese)

[3] Zheng XH, Xie BH, Liu CY, *et al*. Quantifying net ecosystem carbon dioxide exchange (NEE) of a short-plant cropland with intermittent chamber measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, **22**: GB3031

[4] Zhang W-L（张维理）, Ji H-J（冀宏杰）, Kolbe H, *et al*. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies. I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century. *Scientia Agricultura Sinica*（中国农业科学）, 2004, **37**(7): 1018-1025 (in Chinese)

[5] Brown L, Syed B, Jarvis SC, *et al*. Development and application of a mechanistic model to estimate emissions of nitrous oxide from UK agriculture. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**: 917-928

[6] Saggar S, Andrew RM, Tate KR, *et al*. Modelling nitrous oxide emissions from dairy-grazed pastures. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, **68**: 243-255

[7] Li CS, Frolking S, Frolking TA. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**: 9759-9776

[8] Li CS, Farahbakhshazad N, Jaynes DB, *et al*. Modeling nitrate leaching with a biogeochemical model modified based on observations in a row-crop field in Iowa. *Ecological Modelling*, 2006, **196**: 116-130

[9] Li H（李　虎）, Wang L-G（王立刚）, Qiu J-J（邱建军）. Application of DNDC model in estimating crop land nitrate leaching. *Chinese Journal of Applied Ecology*（应用生态学报）, 2009, **29**(7): 1591-1596 (in Chinese)

[10] Li H, Wang LG, Qiu JJ, *et al*. Calibration of DNDC model for nitrate leaching from an intensively cultivated region of Northern China. *Geoderma*, 2014, **223/225**: 108-118

[11] Deng J, Zhu B, Zhou ZX, *et al*. Modeling nitrogen loadings from agricultural soils in southwest China with modified DNDC. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**: G0202, doi: 10.1029/2010JG001609

[12] Zhao Z, Zhang HL, Li CS, *et al*. Quantifying nitrogen loading from a paddy field in Shanghai, China with modified DNDC model. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, **197**: 212-221

[13] Han J, Jia ZK, Wu W, *et al*. Modeling impacts of film mulching on rainfed crop yield in Northern China with DNDC. *Field Crops Research*, 2014, **155**: 202-212

[14] Li C-S（李长生）. Blogeochemistry Scientific Fundamentals and Modeling Approach. Beijing: Tsinghua University Press, 2016 (in Chinese)

[15] Gao MF, Qiu JJ, Li CS, *et al*. Modeling nitrogen loading from a watershed consisting of cropland and livestock farms in China using Manure-DNDC. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, **185**: 88-98

[16] Guo J-W（郭佳伟）, Zou Y-C（邹元春）, Lyu X-G

(吕国宪), *et al*. DNDC model, a model of biogeochemical processes: Research progress and applications. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(2): 571-580 (in Chinese)

[17] Xu W-B (徐文斌), Liu G-S (刘广深), Hong Y-T (洪业汤), *et al*. The fitting analysis of DNDC model on N_2O release in China dryland. *Acta Mineralogica Sinica* (矿物学报), 2002, **22**(3): 222-228 (in Chinese)

[18] Wang L-G (王立刚), Qiu J-J (邱建军), Ma Y-L (马永良), *et al*. Apply DNDC model to analysis long-term effect of soil organic carbon content under different fertilization and plough model. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), 2004, **9**(6): 15-19 (in Chinese)

[19] Yu YX, Zhao CY. Modelling soil and root respiration in a cotton field using the DNDC model. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, **178**: 787-791

[20] Jin S (靳 帅), Shi Y-H (史永晖), Ye G-X (叶桂香), *et al*. Study on coupling effect of straw returning and nitrogen fertilizer on N_2O emission in summer corn field based on DNDC model. *Shandong Agricultural Sciences* (山东农业科学), 2016, **48**(2): 68-73 (in Chinese)

[21] Xue J (薛 静), Mao M (毛 萌), Ren L (任理). The parameter sensitivity analysis and calibration of DNDC model in Quzhou agricultural experiment station. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2013, **46**(13): 2695-2708 (in Chinese)

[22] Qin F-L (秦发侣), Zhao Y-C (赵永存), Shi X-Z (史学正), *et al*. A research of the DNDC model parameters calibration and uncertainty evaluation based on Bayesian inference. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2014, **51**(2): 247-254 (in Chinese)

[23] Xie J-F (谢军飞), Li Y-E (李玉娥). Comparative analysis DNDC (denitrification-decomposition) modeled N_2O emissions from upland farm Beijing. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2004, **23**(4): 691-695 (in Chinese)

[24] Qiu J-J (邱建军), Wang L-G (王立刚), Tang H-J (唐华俊), *et al*. Studies on the change of cultivated soil organic carbon in the three provinces of Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2004, **37**(8): 1166-1171 (in Chinese)

[25] Li H (李 虎), Wang L-G (王立刚), Qiu J-J (邱建军). Estimation of CO_2 and N_2O emissions from farmland soils in Hebei Province in Huang-Huai-Hai plain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(9): 1994-2000 (in Chinese)

[26] Li X-P (李小鹏), Zhang J-B (张佳宝), Liu J-T (刘金涛), *et al*. Simulating soil water drainage and nitrogen leaching in Tianranwenyanqu basin. *Environmental Science* (环境科学), 2009, **30**(3): 864-869 (in Chinese)

[27] Chen C-Q (陈长青), Hu Q-Y (胡清宇), Sun B (孙波), *et al*. Simulating trends in soil organic carbon of in calcareous fluvo-aquic soil under long-term fertilization using the DNDC model. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(6): 1410-1417 (in Chinese)

[28] Ma Y-F (马玉芳), Cai L-Q (蔡立群), Zhang R-Z (张任陟). The simulation study of carbon cycle from agricultural ecosystem in the Loess Plateau hilly-gully region. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2010, **19**(12): 2875-2880 (in Chinese)

[29] Wang X-B (王秀斌), Zhou W (周 卫), Liang G-Q (梁国庆), *et al*. Field validation of DNDC model for nitrous oxide emission from typical fluvo-aquic soils. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2011, **17**(4): 925-933 (in Chinese)

[30] Xia W-J (夏文建), Zhou W (周 卫), Liang G-Q (梁国庆), *et al*. Evaluating the validity and sensitivity of the DNDC model to estimate nitrogen cycling in rice-wheat rotation system. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(1): 77-88 (in Chinese)

[31] Li H (李 虎), Qiu J-J (邱建军), Gao C-Y (高春雨), *et al*. Estimation of nitrogen leaching potential from farmland using DNDC model in a typical small watershed of Bohai. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2012, **28**(13): 127-134 (in Chinese)

[32] Xue Y-D (薛彦东), Ren S-M (任树梅), Yang P-L (杨培玲), *et al*. DNDC model analysis of N_2O fluxes in winter wheat/summer maize system with reclaimed water irrigation. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* (农工业机械学报), 2013, **44**(9): 73-85 (in Chinese)

[33] Chen J-H (陈杰华), Ci E (慈 恩), Xie D-T (谢德体), *et al*. The change tendency of purple paddy soil organic carbon under different cultivation systems using the DNDC model to predict. *Journal of Agricultural Mechanization Research* (农机化研究), 2013(1): 38-42 (in Chinese)

[34] Zhu B (朱 波), Zhou M-H (周明华), Kuang F-H (况福虹), *et al*. Measurement and simulation of nitrogen leaching loss in hillslope cropland of purple soil. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (生态农业研究), 2013, **21**(1): 102-109 (in Chinese)

[35] Zhang X-L (张啸林), Pan X-J (潘晓健), Xiong Z-Q (熊正琴), *et al*. Effects of farming managements on the global warming potentials of CH_4 and N_2O from a rice-wheat rotation system based on the analysis of DNDC modeling. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(3): 690-696 (in Chinese)

[36] Chen H-X (陈海心), Sun B-H (孙本华), Feng H (冯 浩), *et al*. Simulation of soil carbon contents and crop yields in long-term fertilized cropland in Guanzhong area using DNDC Model. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2014, **33**(9): 1782-1790 (in Chinese)

[37] Wang D-Y (王德营), Yao Y-M (姚艳敏), Si H-Q (司海清), *et al*. Using DNDC model to simulate and predict changes in black soil organic carbon. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (生态农业研究), 2014, **22**

(3)：277-283 (in Chinese)
[38] Yang L (杨　黎), Wang L-G (王立刚), Li H (李虎), *et al*. Modeling impacts of alternative farming management practices on carbon sequestration and mitigating N_2O emissions from spring maize fields. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2014, **20**(1)：75-86 (in Chinese)
[39] Han D-L (韩东亮), Jia H-T (贾宏涛), Zhu X-P (朱新萍), *et al*. The change of soil organic carbon in gray desert soil of farmland in Xinjiang by DNDC model to predict. *Resources Science* (资源科学), 2014, **36**(3)：577-583 (in Chinese)
[40] Li SM, Li JM, Li CS, *et al*. Testing the RothC and DNDC models against long-term dynamics of soil organic carbon stock observed at cropping field soils in North China. *Soil and Tillage Research*, 2016, **163**：290-297
[41] Xu W-B (徐文斌), Hong Y-T (洪业汤), Chen X-H (陈旭辉), *et al*. The potential impacts of future climate change to N_2O release from upland ecosystems. *China Environmental Science* (中国环境科学), 1999, **19**(5)：387-391 (in Chinese)
[42] Sun Y-Y (孙园园), Sun Y-J (孙永健), Wang R-T (王锐婷), *et al*. Simulation of CO_2 emission from rice fields under different cropping systems in central Sichuan hilly area with DCDC Model. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2011, **32**(4)：530-537 (in Chinese)
[43] Xiong H-F (熊汉锋), Chen Z-P (陈志平), Huang S-K (黄世宽), *et al*. Simulating Study on carbon, nitrogen cycling in paddy field in the Liangzi Lake wetland. *Journal of Agro-environment Science* (农业环境科学学报), 2006, **25**(suppl.)：533-536 (in Chinese)
[44] Xu B-C (徐炳成), Liang Y-L (梁银丽). The characteristics on carbon, nitrogen cycling of the loess plateau dry farmland ecosystem. *Chinese Journal of Eco-agriculture* (中国生态农业学报), 2000, **8**(2)：42-46 (in Chinese)
[45] Qiu J-J (邱建军), Wang L-G (王立刚), Li H (李虎), *et al*. The studies on impacts of modeling soil organic carbon for crop yield. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2009, **42**(1)：154-161 (in Chinese)
[46] Chen H, Yu CQ, Li CS, *et al*. Modeling the impacts of water and fertilizer management on the ecosystem service of rice rotated cropping systems in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, **219**：49-57
[47] Li C-S (李长生), Xiao X-M (肖向明), Frolking S, *et al*. The greenhouse gas emissions from farmland of China. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 2003, **23**(5)：493-503 (in Chinese)
[48] Qiu JJ, Li CS, Wang LG, *et al*. Modeling impacts of carbon sequestration on net greenhouse gas emissions from agricultural soils in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, **23**：2263-2267
[49] Li CS, Mosier AR, Wassmann R, *et al*. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems：Sensitivity and upscaling. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**：523-528
[50] Li H, Qiu JJ, Wang LG, *et al*. Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat-maize rotation system in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, **135**：24-33
[51] Han B (韩　冰), Wang X-K (王效科), Ouyang Z-Y (欧阳志云). Saturation levels and carbon sequestration potentials of soil carbon pools in farmland ecosystems of China. *Rural Eco-environment* (农村生态环境), 2005, **21**(4)：6-11 (in Chinese)
[52] Wang LG, Qiu JJ, Tang HJ, *et al*. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China. *Geoderma*, 2008, **147**：47-55
[53] Tang HJ, Qiu JJ, Van Ranst E, *et al*. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model. *Geoderma*, 2006, **134**：200-206
[54] Qiu J-J (邱建军), Li H (李　虎), Wang L-G (王立刚). The studies of nitrogen levels and soil nitrogen balance in cropland of China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2008, **24**(8)：40-44 (in Chinese)
[55] Li CS, Qiu JJ, Steve F, *et al*. Reduced methane emissions from large-scale changes in water management of China's rice paddies during 1980－2000. *Geophysical Research Letters*, 2002, **33**：1-4
[56] Zhang Y, Wang YY, Su SL, *et al*. Quantifying methane emissions from rice paddies in Northeast China by integrating remote sensing mapping with a biogeochemical model. *Biogeosciences*, 2011, **8**：1225-1235
[57] Wang Y-Y (王毅勇), Yang Q (杨　青), Wang R-S (王瑞山). The simulation studies on soybean fields nitrogen cycle of Sanjiang Plain. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学),1999, **19**(6)：555-558 (in Chinese)
[58] Wang X-K (王效科), Li C-S (李长生). The estimates of N_2O emissions of agricultural soil of China. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2000, **20**(4)：483-488 (in Chinese)
[59] Wang X-K (王效科), Ouyang Z-Y (欧阳志云), Miao H (苗　鸿). Application of DNDC model in estimation of CH_4 and N_2O emissions in agricultural ecosystems in Yangtze River delta. *Environmental Science* (环境科学), 2001, **22**(3)：15-19 (in Chinese)
[60] Han B (韩　冰), Wang X-K (王效科), Ouyang Z-Y (欧阳志云), *et al*. A simulation analysis of distribution and change of agricultural soil carbon pool in Liaoning Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(7)：1321-1327 (in Chinese)
[61] Qiu J-J (邱建军), Tang H-J (唐华俊). Studies on the change of cultivated soil organic carbon in agriculture and pasturage interlaced zone of in the North, in the Inner Mongolia autonomous region, for example. *Chinese Journal of Eco-agriculture* (中国生态农业学报), 2003, **11**(4)：86-88 (in Chinese)
[62] Han B (韩　冰), Wang X-K (王效科), Ouyang Z-Y (欧阳志云), *et al*. Studies on the situation and change

of soil organic carbon storage in croplands in Northeast of China. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2004, **35**(4): 401-407 (in Chinese)

[63] Zhang F (张 凡), Li C-S (李长生), Wang Z (王政). Modeling the impacts of cultivation measures for soil organic carbon storage in croplands in Shanxi. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 2006, **26**(6): 1021-1028 (in Chinese)

[64] Wang S-F (王淑芳), Wang X-K (王效科), Ouyang Z-Y (欧阳志云). Modeling the soil organic carbon storage and change in farmland of the upper stream watershed of Miyun reservoir. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2009, **18**(5): 1923-1928 (in Chinese)

[65] Zhang L-M (张黎明), Yu D-S (于东升), Shi X-Z (史学正), *et al*. Simulation of methane emissions from rice fields in the Taihu Lake region, China by using different unit of soil database with the DNDC Mode. *Environmental Science* (环境科学), 2009, **30**(8): 2185-2192 (in Chinese)

[66] Jin L (金 琳), Li Y-E (李玉娥), Gao Q-Z (高清竹), *et al*. Modeling the 20 years change of soil carbon in cropland of China using the DNDC model. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2010, **41**(5): 1081-1085 (in Chinese)

[67] Sun X (孙 欣), Shi X-Z (史学正), Pan J-J (潘剑君), *et al*. The paddy granularity effect of methane emission simulation research of Taihu lake region. *Acta Pedologlca Sinice* (土壤学报), 2010, **47**(4): 659-664 (in Chinese)

[68] Zhang Y, Su SL, Zhang F, *et al*. Characterizing spatiotemporal dynamics of methane emissions from rice paddies in Northeast China from 1990 to 2010. *PLoS One*, 2012, **7**(1): e29156

[69] Tian Z (田 展), Niu Y-L (牛逸龙), Sun L-X (孙来祥), *et al*. China's rice field greenhouse gas emission under climate change based on DNDC model simulation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(3): 796-799 (in Chinese)

[70] Gou J (勾 继), Zheng X-H (郑循华), Wang M-X (王明星). The simulation studies of N_2O emissions of rice-wheat rotation in Eastern China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (大气科学), 2000, **24**(6): 835-842 (in Chinese)

作者简介 谢海宽,男,1991 年生,硕士研究生.主要从事农田生态系统碳氮循环研究.E-mail: xie13673671962@163.com

责任编辑 杨 弘

谢海宽, 江雨倩, 李虎, 等. DNDC 模型在中国的改进及其应用进展. 应用生态学报, 2017, **28**(8): 2760-2770
Xie H-K, Jiang Y-Q, Li H, *et al*. Modification and application of the DNDC model in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(8): 2760-2770 (in Chinese)