

钱海燕,于婷婷,周杨明,等.基于DNDC模型的稻田生态系统碳动态模拟研究进展[J].华中农业大学学报,2022,41(6):59-70.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.06.007

基于DNDC模型的稻田生态系统碳动态模拟研究进展

钱海燕¹,于婷婷¹,周杨明²,王媿³,陈莎莎¹

1. 东华理工大学地球科学学院,南昌 330013; 2. 江西师范大学地理与环境学院,南昌 330022;
3. 江西省工程咨询中心有限公司,南昌 330036

摘要 DNDC (denitrification-decomposition,反硝化-分解)模型是一个含有时间因子的模拟生物地球化学过程较为成熟的动态模拟模型,可用于模拟和评估作物(如水稻)生产、碳氮动态演变以及温室气体排放等。为了能够更充分地认识DNDC模型,使之得到更广泛应用,本文基于DNDC模型的构成与功能、目前6个(DNDC、CENTURY、CASA、EPIC、Biome-BGC、Roth C)世界著名的生物地球化学模型的比较及其DNDC模型在稻田生态系统中的模块优化,从稻田土壤碳动态角度出发,分析和总结了DNDC模型在稻田土壤固碳潜力、温室气体CO₂和CH₄排放模拟、稻田管理模式评估以及模型参数敏感性分析方面的研究进展。本文也指出,受土壤属性空间异质性大、区域田间管理措施差异等因素影响,DNDC模型存在诸如点位尺度验证难以扩展到区位尺度模拟、模型矫正困难等限制模型准确性的问题。为使DNDC模型能够在中国复杂的农耕特征下开展模拟研究,今后的发展应重视DNDC模型模块功能优化、提高输入参数精确度等,进一步提高模型模拟精确度和预测评价系统的可信度,使模型更好地预测土壤碳动态变化,在稻田生态系统固碳减排和管理方案制定等方面发挥作用。

关键词 DNDC模型;稻田生态系统;土壤固碳;CH₄和CO₂排放;管理模式评估

中图分类号 S158.2; X511 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)06-0059-12

稻田生态系统是在人为耕作条件下形成并长期处于淹水状态的特殊土壤生态系统,具有较高的固碳能力,也是CO₂、CH₄和N₂O温室气体重要的源和汇^[1]。稻田CO₂和CH₄排放分别约占农业活动CO₂和CH₄排放量的16%和35%,其中稻田CH₄排放是全球CH₄排放主要排放源之一,大气中10%~20%的CH₄来源于水稻,而稻田N₂O在排放上与其他农业活动相比不突出、来源一致,主要来自作物生长过程土壤N₂O排放及氮肥施用^[2-4]。中国水稻土面积约为3 000万hm²,占全国农业耕地总面积的25%^[5-6]。研究表明,中国水稻土表层土壤有机碳库约13亿t,固碳潜力可达30亿t,具有土壤有机碳(SOC)含量较高、固碳作用明显、固碳潜力巨大且温室气体排放量大的特点^[1,7-8]。因此,研究稻田生态系统碳动态变化不仅能为土壤培肥、作物增产提供科学依据,而且对制定国家减排战略和应对全球变化具有重要意义^[9-10]。

稻田生态系统碳动态变化研究通常采用直接观

测法,该方法耗时耗力,观测区域及时间极为有限,大范围的区域排放情况代表性较差,而利用模型将有限的点位观测案例扩展到较大的区域尺度,能够弥补田间直接观测的不足^[6,11]。目前,世界上已经研发出了许多用于描述碳氮循环的生物地球化学模型,比较著名的模型包括DNDC (denitrification-decomposition,反硝化-分解模型)、CENTURY、CASA (Carnegie-Ames-Stanford approach,卡内基-埃姆斯-斯坦福方法模型)、EPIC (erosion/productivity impact calculator,土壤侵蚀/生产力影响模型)、Biome-BGC (biome biogeochemical cycles model,生物群落生物地球化学循环模型)、Roth C (Rothamsted carbon model,洛桑碳模型)等^[9-10,12]。其中,DNDC模型经过长期的发展和改进在农田生态系统中得到了广泛应用,对于目前的稻田生态系统区域实验研究有着重要的指导作用。因此,本文基于DNDC模型的构成与功能及其在稻田生态系统中的模块优化,分析总结了模型在稻田生态系统土壤固碳、CO₂和

收稿日期:2022-05-25

基金项目:江西省自然科学基金面上项目(20212BAB203002);国家自然科学基金项目(41561105);东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBM201909838);江西省重点研发计划一般项目(20181BBG70037)

钱海燕,E-mail:hyqian@163.com

通信作者:周杨明,E-mail:zhouym@jxnu.edu.cn

CH₄温室气体排放模拟、稻田管理措施评估及敏感性分析等方面的研究进展,提出了模型在稻田生态系统模拟中的不足之处和优化措施,旨在为稻田生态系统碳动态变化模拟研究提供方法参考,使模型能够更好地在稻田减排、农业管理、政策制定上发挥作用。

1 DNDC模型的构成与功能

1.1 DNDC模型简介

DNDC是以模拟农业生态系统中碳氮循环为目的,耦合生态环境驱动因子及其相应的生物地球化学过程的模型。模型最初由新罕布什尔大学的李长生教授及其团队研发,主要用计算机模拟表达硝化作用和分解作用,用于描述美国土壤碳氮循环和反

应机制^[13]。模型由2大部分、6个子模型组成(图1)。第一部分主要包括土壤气候、农作物生长和土壤有机质分解3个子模型,通过气候、土壤、植被和人类活动4种生态驱动因子模拟出第二部分中的土壤环境条件(土壤温度、湿度、pH、Eh和相关化学底物浓度梯度);第二部分包括硝化、反硝化以及发酵作用3个子模型,利用第一步模拟所得的5种土壤环境条件,来模拟土壤环境条件变化对微生物活动带来的影响,计算植物系统和土壤系统内部CO₂、CH₄、N₂O、NH₃、NO以及N₂的排放情况。模型使用者只需要输入待模拟地点的日气象数据、土壤性质、植被特征及管理措施,即可运转DNDC模拟该地的植物生长情况、土壤水分和碳氮动态、CO₂及多种微量气体的排放,具有多尺度、高精度以及良好的适用性^[14]。

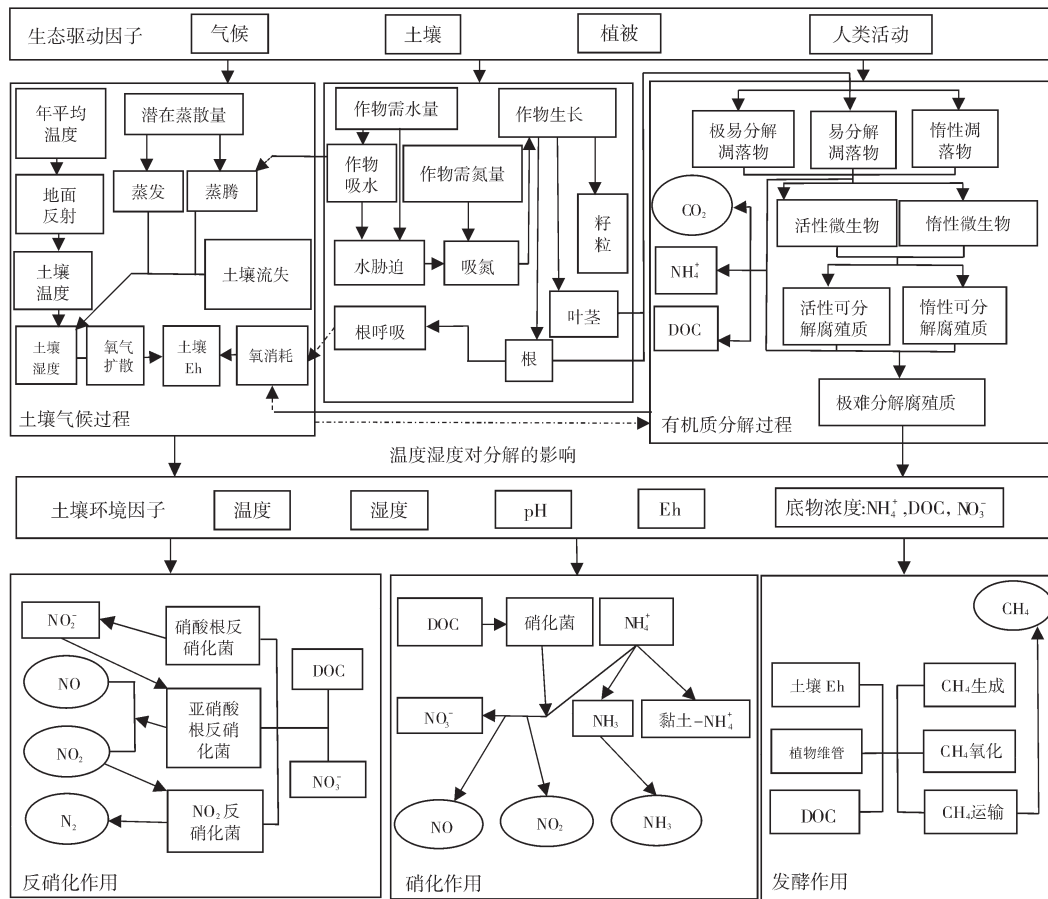


图1 DNDC模型结构^[11,14]

Fig.1 The structure of DNDC model^[11,14]

1.2 DNDC模型与其他生物地球化学模型比较

DNDC、CENTURY、CASA、EPIC、Biome-BGC、Roth C是目前应用较为广泛的6个生物地球化学模型。这6个模型起源存在差异,不同模型优势以及发展过程中经验积累不同,针对同一模拟评估对象所能达到的模拟精度也有层次之分(表1)。对

于农田(稻田)生态系统碳动态、温室气体排放等方面模拟而言,以模拟农业土壤碳氮循环为目的的DNDC模型最具优势且研究经验最为丰富,但存在输入模型参数较多、模型校正困难等问题^[12,15]。CENTURY模型始于草地生态系统,是以月为单位建立的主要用于模拟研究草原生产力和土壤有机质

含量的模型,也被用于研究农田、森林生态系统SOC情况,其中该模型对于农田SOC的变化特征模拟,在间作农业模式下的模拟精度相较于单一农业模式要高,但该模型默认区域物种之间无差别且不能很好地反应土壤碳饱和增长情况^[10,16-17]。Roth C模型与CENTURY模型在模拟思路存在相同点,能够很好地模拟不同区域草地、农田以及森林等生态系统SOC的趋势,也比较适用于模拟估算旱地和水旱轮作以及不同施肥下SOC的变化。但Roth C模型同样带有CENTURY模型缺陷,在模拟南方双季稻农田的SOC变化趋势时,该模型主要考虑非淹水状态下表层SOC周转,虽后续可通过添加新参数来调节土壤淹水期和非淹水期碳库的分解速率,但对一些长期淹水状态下的土壤模拟效果不太理想,同时该模型仅考虑土壤过程而不计算地上生物量归还到土壤中的碳^[17-18]。CASA模型是基于不同植物光能利用率差异结合环境胁迫因子(如水分)建立,目前主要用于模拟和估测草地、森林以及湿地NPP(净初级生产力)和固碳潜力,在农业尤其是农田(稻田)生态系统中碳动态、温室气体排放方面的模拟应用较少,且该模型参数未考虑人为活动带来的影响,而稻田生态系统与人类活动关系密切^[19]。EPIC模型最初是为评估不同管理模式的选择对土壤侵蚀和土地生

产力带来的影响而构建的模型,在稻田生态系统中用于作物产量估算、养分利用和流失情况、评估水稻灾害(如春季旱灾)以及气候变化对不同作物轮作系统(如玉米-小麦-水稻轮作系统)带来的影响等,但该模型作为一个单点模型,定义的最大田间尺度只有约为1.012 km²且默认整个田间区域环境整体条件以及管理措施均—^[20]。Biome-BGC模型与CASA模型类似,主要用于估算NPP、模拟森林、草地以及农田等生态系统的碳水循环。但该模型具有普适性,基于物质与能量守恒原理模拟植物生理生态过程,一般不考虑各种扰动带来的影响,虽可以模拟很多植被类型但缺少对混合植被类型的生理生态参数描述,不适合稻田生态系统中多种套作模式模拟^[21-23]。

通过对比分析各个模型的优点和缺点(表1),发现模型模块越完备,其考虑的因子越多越详细,模拟结果与实际值越接近。其中,DNDC模型在农业领域土壤碳氮循环模拟中具有独特优势,不仅能够同时模拟CO₂、CH₄等温室气体的排放过程,而且能够定量评价作物产量等综合调控机制^[12],被广泛应用于观察、分析和预测农田生态系统产量、土壤固碳和温室效应^[2,6,14]。因此,DNDC模型被认为是当前世界上较为完善的6个模型之一^[24],被指定为亚太地区首选推广的生物地球化学模型^[25]。

表1 6个生物地球化学模型的优点和缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of six biogeochemical models

模型名 Model name	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
DNDC	模拟时间尺度长;对农业领域碳氮循环过程模拟经验丰富且效果较好;模块考虑参数详细能够较好描述、预测农业生态系统碳氮循环的源、库、流及反馈机制;适用性,强能够在各种生态系统开展模拟评估 ^[2,12,15] 。	输入参数较多且代码不公开,模型矫正困难;模拟精度受输入参数准确程度影响较大;模拟结果及其模拟尺度受环境整体条件影响大 ^[12,15] 。
CENTURY	能够较好地预测地上净初级生产力的变化;操作方便、输入参数易获取易修改、模型开源化 ^[16] ;能够很好地模拟草原、农作物和森林生态系统C和N动态 ^[26] 。	模拟主要基于点区域,以“均一性”来看待区域物种,区域模拟能力欠缺 ^[16] ;忽略诸多影响模型准确性的因素(如降水);不能反映土壤碳饱和和增长的实际情况,对有机碳含量较高的土壤模拟效果较差 ^[10] 。
CASA	所需参数少且误差小 ^[27] ;模拟充分考虑环境因子适用于区域NPP(植被净初级生产力)的动态估算 ^[19] ;估算结果能够很好的表现未干扰天然植被的发育和演变过程 ^[28] 。	模型反演在遥感影像选择上存在局限;模型参数中未考虑人类活动,忽略人类活动对植被的影响 ^[18-19,28] 。
EPIC	可模拟N、P等土壤营养元素变化来反应养分利用和损失情况;能够对不同管理措施下土壤水分动态、生物量累计以及作物生长过程进行模拟;在农业旱灾风险模糊评估方法中置信水平高 ^[20,29-30] 。	模块参考少,田间管理类型缺乏,与现实管理条件存在偏差;研究尺度小以均一的小区域为主;对极端气候事件敏感性差 ^[20,29-30] 。
Biome-BGC	不考虑各种扰动情况下对植被NPP估算效果较好 ^[21] ;能够很好地模拟不同植被类型的碳氮水的循环过程;自身具有普适性 ^[22] 。	基于站点模拟对区域环境差异考虑不足;参数和模块不足,对植物种类复杂的生态系统模拟效果不理想 ^[22-23] 。
Roth C	参数简单且易获取;一定条件下模拟效果较好;能够模拟不同管理条件下各腐解阶段的有机碳残留率;可以很好地应用于陆地生态系统碳循环的相关研究 ^[17] 。	结构过于简单;单考虑土壤中有有机碳变化过程,忽略了植物生长过程和地上植物归还到土壤中的有机碳量;与CENTURY类似不能反映土壤碳饱和和增长的实际情况,对有机碳含量较高的土壤模拟效果较差 ^[10,18] 。

1.3 DNDC模型在稻田生态系统中的模块功能优化

自DNDC模型研发以来,世界各地科研人员为模型的发展做出了重要贡献,不仅丰富了模型的研究过程方法、优化了模型的参数设置、拓展模型的应用领域,而且还推动了模型功能的研发。随着DNDC模型在国内的应用,一些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^[31]。起初为研究农田土壤碳的生物地球化学循

环,研究人员利用当时的土壤C和N动力学模型辅以植物生长子模型和种植实践程序(施肥、灌溉、耕作、轮作和肥料改良)来开展研究^[32]。其后陆续有更多的研究者加入到优化和丰富DNDC模型模块的行列当中(表2)。经过30多年的开发和在各地的应用,DNDC模型能够准确模拟不同农业生产环境和不同管理方式下的土壤固碳能力及温室气体排放规律,可以作为农业固碳和温室气体减排计量的一个便捷工具。

表2 DNDC模型的模块添加和改进

Table 2 Module addition and improvement of DNDC model

研究者(文献) Researcher name	改进 Improvement
Zhang等 ^[33]	在DNDC原有模型的基础上添加了土壤气候与水热通量、植物生理参数、分解与硝化3个模块,使模型具备追踪植物生长过程中碳氮以及水分流动情况的能力,添加模块后的模型被命名为crop-DNDC。
Li等 ^[34]	对DNDC进行了修改,提高了其预测水稻生态系统温室气体排放的能力,修改的内容主要集中在厌氧生物地球化学、水稻生长模拟以及水稻管理参数优化,并测试了新模型对管理替代方案和自然条件变化(包括天气和土壤特性)的敏感性。
Li等 ^[35]	将DNDC模型的稻田土壤特性和管理因素与GIS数据库结合,根据1990年的气候和管理条件,设置2种水管理情景来模拟中国稻田土壤固碳、净CO ₂ 排放以及CH ₄ 和N ₂ O的排放。DNDC模型9.3版本通过改进土壤蒸发的计算方式,提高了该模块的模拟精度。
Zhao等 ^[36]	利用黄浦江流域的典型稻田3年的实测数据对DNDC模型进行了校准和验证,完善了水文动态模块和植物生长模块,经过优化后的模型更新到DNDC模型9.5版,该版本强化了作物生长模块,优化了温室气体排放参数,使模型对农田作物生长期间温室气体排放模拟更加可靠。同时,研究者对作物参数进行了修正,DNDC模型新版本增加了适合中国水稻种植特点的移栽日期设置 ^[37-38] 。
蒋在获 ^[39]	开发出了CHINA-DNDC模型,该模型在DNDC原模型的理论结构和预测过程基础上,对模型的科学核心部分进行了重新编写,优化了模型结构,简化了原模型操作,提高了数据共享能力,设计了3种数据存储体系补充了相关系数,使CHINA-DNDC的功能得到扩展。

2 DNDC模型在稻田生态系统碳动态模拟中的应用

2.1 稻田土壤固碳模拟

DNDC模型能够准确模拟田块和区域尺度SOC储量和固碳速率,有助于明确土壤固碳潜力、制定固碳减排措施,对维护生态系统稳定性和农业生产具有重要意义^[40-41]。刘清等^[40]基于GIS和DNDC模型,采用中国科学院红壤生态实验站的长期实验数据模拟预测出江西省余江县面积3.6亿m²的水稻土表层(0~20 cm)中SOC储量为 2.9×10^9 kg,其中潴育性水稻土的SOC储量水平较高,淹育性和潜育性水稻土较低。徐胜祥等^[42]基于1:100万土壤数据库,以土壤图斑为基本模拟单元模拟2009—2050年间江苏省稻田在少耕、免耕和少耕+秸秆还田3种耕作制度下的土壤固碳潜力,结果发现免耕和少耕+秸秆还田条件下稻田固碳速率优于少耕。

受研究区域大小不同的影响,研究者在进行土壤碳库模拟研究中采用的比例尺度有很大不同。国

家尺度模拟中DNDC模型所采用的土壤属性数据大多来自于1:1400万土壤图和《中国土种志》,区域尺度模拟中一般也是土壤信息相对比较粗糙的省级土种志资料^[18]。如: Xu等^[43-44]结合1:100万土壤数据库和DNDC模型模拟发现中国水稻土在1980—2050年间固碳总量达到 $2.920 \times 10^7 \sim 8.477 \times 10^8$ t; Zhang等^[45]结合1:1400万土壤数据库县级单元法和DNDC模型模拟研究发现太湖地区水稻土在1982—2000年间共释放碳 1.538×10^7 t; Xu等^[9]基于1:100万和1:1400万2种比例尺土壤数据库和DNDC模型模拟江苏省水稻土1980年和2008年SOC储量,模拟结果显示基于1:1400万土壤数据库模拟SOC储量分别为1.310亿~3.206亿t和1.703亿~3.051亿t,基于1:100万土壤数据库模拟SOC储量分别为2.016亿、2.162亿t。上述结果也表明,由于缺乏详细的土壤数据及建立该类数据库不易,大区域尺度上的DNDC模型有机碳研究多集中在中、小比例尺土壤数据库,而粗糙的土壤数据将在一定程度上降低模拟精度,从而增加“固碳减排”管理措施制定的不

确定性。吴世蓉等^[41]基于目前区域尺度最为详细的1:5万土壤数据库下福建省闽侯、浦城、同安、武平和永定5个县1980—2009年和2010—2039年有机碳动态变化的模拟结果,运用尺度上推的方法估算出福建省耕地土壤1980—2009年的固碳总量为 7.37×10^6 t,2010—2039年的固碳潜力为 7.04×10^6 t,2个时段的年均固碳速率分别为190、176 kg/hm²,认为目前的农田管理措施有利于研究区长期固碳。其中,水稻土和盐渍水稻土分别在土类和亚类级别中固碳速率最大,每年不同时段均大于175 kg/hm²,2个时段水稻土的固碳总量均占全省耕地固碳总量的92%以上,是今后制定固碳减排措施的重点。

采用栅格单元模拟不同比例尺矢量图斑单元及其转换生成的不同分辨率的栅格单元,能够对区域尺度土壤碳库模拟精度产生影响。倪元龙等^[46]结合DNDC模型模拟太湖地区2000年水稻土表层(0~20 cm)SOC,对比分析了1:5万、1:100万、1:140万3种比例尺土壤矢量图斑单元以及由矢量图斑单元转换生成的不同分辨率的栅格单元与3种比例尺矢量图斑单元的水稻土类型数量、面积、碳储量以及碳密度的变化特征,认为1:5万、1:100万和1:140万3种比例尺的最佳栅格模拟单元分辨率分别为0.2 km×0.2 km、2 km×2 km、17 km×17 km,既能保证模型模拟过程中的精度要求,又可以避免数据冗余,提高模拟效率。

2.2 稻田生态系统CH₄和CO₂排放模拟

研究表明,将充分考虑基于过程的DNDC模型模拟结果与通过实地仪器测量结果进行对比,经过模块优化和参数本地化的DNDC模型不仅能够有效地追踪或捕获稻田在整个生长期内的CH₄和CO₂排放模式,而且还能应用于区域尺度^[11,47-50]。Wang等^[51]模拟估算中国稻田CH₄的年排放量约为 8.20×10^6 t,中国东南部、中部和西南地区CH₄排放量占全国总排放量的92%。高小叶等^[5]研究表明,本地化改进的DNDC模型能够准确模拟长江中下游地区施用紫花苜蓿绿肥情景下水稻生长和温室气体排放规律。赵苗苗等^[49]基于气象、土壤和管理措施等数据,模拟发现常年种植水稻的稻田CH₄等温室气体通量模拟效果优于新转水田。王利华等^[52]模拟估算了宁波市大嵩江流域稻田生态系统不同种植模式CH₄平均排放速率是7~400 kg/hm²。贺冬冬^[53]模拟结果表明当冬水田转为稻麦轮作后稻田生态系统年CO₂固定量显著增加,即稻田轮作固碳能力优于单一水稻种植。邹凤亮等^[54]模拟表明稻-油菜、稻-冬闲相比

稻-小麦模式更能有效减少温室气体CH₄的排放。

许多学者结合地面数据和遥感数据,利用遥感图像解译和实地验证,促进DNDC模型点位尺度外推。帅艳菊^[11]结合遥感技术模拟估算了2006—2015年湖北省主要稻作模式CH₄排放量为 5.60×10^5 t/a。阿依吐拉·买买提祖农等^[55]通过随机森林对遥感影像进行分类获得潜江市各稻作模式分布数据,结合气象、土壤、作物管理数据库,区域模拟结果表明2019年潜江市主要稻作模式CH₄及全年SOC变化量分别为0.40~64 043.34 kg/km²和0.18~35 835.27 kg/km²。孙园园等^[56-57]结合遥感手段提取的川中丘陵区稻田时空变化信息模拟结果表明不同耕作制度下水稻田生长期CH₄排放通量平均值为冬水田-水稻田>小麦-水稻田>油菜-小麦田。张远等^[48]利用遥感信息提取技术获得研究区水稻田的空间分布信息,对三江平原稻田CH₄的季节排放进行了区域模拟和估算,认为稻田是三江平原农业生态系统中的一个较大的“CH₄源”,DNDC模型在模拟北方寒地稻田CH₄释放方面具有很好的应用潜力。这些研究表明,集成遥感信息技术和DNDC模型模拟方法,对研究区水稻田时空变化信息进行精确提取,进而对水稻田温室气体排放通量进行模拟和定量估算,概括农田气体排放的时空变化模式极具应用价值,可为编制稻田温室气体排放清单和制定减排策略提供可靠的技术支撑^[47-48]。

土壤数据的详细程度是保证地球生物化学模型模拟精度的重要因子,在利用栅格数据进行计算机模拟估算农田温室气体排放中,选择适宜的模拟单元非常重要^[9,58-59]。张黎明等^[58]研究了3种不同土壤数据单元法对太湖地区水稻土CH₄排放模拟的影响,发现1:5万图斑单元法大多数县的CH₄排放量都在1:5万“县级”单元法最大与最小值范围之间,但整个地区总排放量相差达到 1.68×10^6 t;而1:140万“县级”单元法CH₄排放量与1:5万图斑单元法相比,尽管整个地区总排放量只相差 1.8×10^5 t,但各“县级”单元之间的估算差异却很大,验证了DNDC模型以“县”作为最小模拟单元,并用排放量范围来表达区域CH₄气体排放的合理性。孙欣等^[59]估算了由太湖地区1:5万土壤数据库转换集成的七种栅格粒度下1982—2000年共19 a的稻田CH₄排放总量,发现大于16 km栅格粒度的栅格单元会引起面积误差,导致模拟结果迅速增大,综合考虑空间数据量和模型运算周期,以1:5万土壤数据库为前提,认为16 km栅格粒度是最适宜于太湖地区区域尺度温室气体排

放的DNDC模型模拟粒度。

2.3 稻田管理模式评估

DNDC模型不仅可以用来评估稻田水肥管理、土地利用方式及土壤特性对稻田生态系统碳动态变化的影响,而且有助于判断在何时何地实施新措施会获得最佳效果,在预测生态系统变动方面具有可实施性^[14]。自20世纪80年代初起,中国水稻农业的水管理措施发生改变,全国水稻田由传统的持续淹灌转变成晒田间灌。以1990年农业和气象数据为基础,构建气象、土壤、作物轮作、农田管理等农业数据库,利用DNDC计算1990年在晒田间灌和持续淹灌两种管理模式中国稻田CH₄年排放量分别为 $2.3 \times 10^6 \sim 10.5 \times 10^6$ t和 $8.6 \times 10^6 \sim 1.6 \times 10^7$ t,表明晒田措施能够很好的减少中国稻田CH₄排放量^[7]。DNDC模拟也发现,受到作物轮作、气候和土壤质地的影响,晒田措施减少CH₄排放的效果各地不同,四川、海南、湖北、广东等省效益最好(CH₄排放减少量为200~290 kg/hm²),而河北、天津、宁夏、甘肃诸省最差(CH₄排放减少量<25 kg/hm²)^[14]。研究表明,淹水和施用秸秆状态下会增加稻田CH₄排放通量和周转速率,CO₂生产期主要在高温的作物生长期^[60]。稻田CH₄排放量和稻田淹水深度关系密切^[52],持续的淹水灌溉制度能够导致稻田具有较高排放通量^[48],在干旱区DNDC模型对小于15 cm积水灌溉实验地模拟效果较好,相对误差均在20%以内^[61]。

孙园园等^[56-57]等通过模型模拟研究认为,不同耕作方式土壤CH₄排放量差异主要是由于不同耕作制度导致的土壤氧化还原电位差异所致。吴梦琴等^[50]研究表明,鄂西北、鄂东南地区和江汉平原采用优化管理栽培模式能够有效减少稻作系统产生的CH₄。优化稻作管理模式,如改变稻田淹水天数、选取高产低排稻种、节水灌溉和秸秆粉碎覆盖还田技术集成,可以在保持水稻产量的同时实现CH₄减排^[50,52]。

DNDC模型对不同灌溉模式和不同水文年条件下的稻田SOC具有较好的模拟效果^[62],能正确反映SOC在水稻生长过程中的变化规律^[2]。不同水文年条件下稻田最优的水碳管理模式是节水灌溉与秸秆还田耦合,在相同秸秆还田水平下,控灌稻田0~10 cm层SOC略低于淹灌处理,但水稻产量更高;平、枯、丰水年的推荐秸秆还田水平分别为6 000、6 000、7 500 kg/hm²,SOC达到潜力的99.2%以上,水分生产率较相同秸秆还田量的淹灌处理高43.5%以上^[62]。

耕作施肥制度和生态环境条件能够影响SOC储量,施用绿肥和化肥、少耕+30%秸秆还田均能增加SOC储量^[40,42]。王季斐^[63]通过对施用磷肥亚热带地区的典型缺磷的水稻土壤进行研究,发现亚热带地区磷缺乏影响土壤碳固定,而碳磷共施能够促进有机质腐殖化程度,促使土壤有机质由简单结构转化为复杂高分子化合物。该研究选取了2种土壤,分别为极缺磷土壤Olsen-P(采用碳酸氢钠浸提的方法测定的有效磷含量)为0.74 mg/kg (Soil 1)、缺磷土壤Olsen-P为3.41 mg/kg (Soil 2),以NaH₂PO₄为磷源(60 mg/kg),模拟根际分泌物为碳源(65%葡萄糖C+30%草酸C+5%丙氨酸C,添加量为土壤100%MBC(土壤微生物量碳)量),对2种土壤进行3种处理:不添加、添加外源碳(C处理:Soil 1/Soil 2+C)、添加外源碳和磷(C+P处理:Soil 1/Soil 2+C+P),模拟结果发现无论是Soil 1还是Soil 2,方法上采取C+P处理都比单一的C处理效果要好得多。

DNDC模型能够根据稻田管理模式的改变,构建出相应的农业数据库用以模拟不同管理模式下CH₄的排放情况,验证其模式的实用价值和助推新管理模式的施行。而且,该模型能够针对不同土地耕作制度、灌溉模式及施肥条件等,较好的模拟出SOC的变化规律,从而预测稻田生态系统SOC变动趋势,有助于不同地区更好地选择和设计适宜当地水稻农业可持续发展的模式。

2.4 敏感性分析

敏感性分析可以确定影响模拟结果的关键模型参数,减少模型参数的不确定性,提升模型模拟精度^[64]。朱相成等^[65]研究表明,平均气温是影响东北单季稻区、长江中下游稻麦轮作区和南方双季稻区CH₄排放最大的因子,土壤容重、秸秆还田量、土壤黏粒含量、SOC以及水稻生长中期晒田时间也对CH₄排放有明显影响,长江中下游稻麦轮作区秸秆还田的敏感性指数较高,而南方双季稻区则表现为平均气温和土壤黏粒含量更高。帅艳菊^[11]认为,不同稻作模式下各类型参数对温室气体排放的敏感程度不同,土壤参数中容重、黏粒含量、SOC和pH值对温室气体排放影响最为显著;气象参数中除稻虾模式外,年均温和大气CO₂浓度均为较敏感参数,在稻麦和稻油模式下降水量也为较敏感参数;管理参数中施氮量、晒田时间和秸秆还田量对各模式温室气体排放量影响最大。也有研究表明,稻田CH₄排放对植物根系与总生物量比的变化高度敏感^[66]。张远

等^[48]研究表明,土壤因素是影响三江平原稻田CH₄排放的主要因素,土壤黏粒和SOC含量是最主要的敏感性因子;气象因子中温度的变化对稻田CH₄影响大于降水;对于耕作措施而言,水稻生长季内的田间排干可以明显降低稻田CH₄排放量。可见,不同地区气候、土壤属性和管理措施的差异不仅导致稻田CH₄排放对相同因素的敏感性存在一定的差异,而且反映了输入参数对稻田土壤CH₄排放影响的复杂性,而DNDC模型的准确性很大程度上取决于模型参数输入的精确度。

3 DNDC模型在稻田生态系统碳动态模拟中的不足之处

3.1 模型点位/区域尺度模拟

模型点位模拟结果与实测数据具有较高的拟合度,这是判断模型适用性的前提条件^[6]。研究表明,DNDC模型已经能够很好地模拟稻田生态系统土壤碳固定和CH₄、CO₂等温室气体排放规律,在其适宜的条件下均能达到较高的模拟精度。但也发现,DNDC模型模拟所对比分析的点位实测数据一般只有1~2 a,气象参数对模型产生的影响可能很大程度上被忽略,需结合长期有机碳和温室气体定位观测基础数据对DNDC模型进行本土化和参数优化^[11]。也有研究认为DNDC模型可以估算某研究区多年温室气体的时间序列,但模型并没有实现对时间序列分析的模块,而温室气体多年变化的趋势、周期以及自相似性等特征具有很重要的研究价值,需要将时间序列分析算法和DNDC模型有机结合^[67]。

大部分DNDC模型的应用目前还是处于单方面的点位尺度模拟或区域尺度模拟,而从点位尺度验证到区位尺度模拟研究,估算误差较大。土壤属性空间异质性是SOC动态变化、碳储量、温室气体估算不确定最主要的来源^[58]。受区域异质性大、输入数据准确性的影响,如果模型以几个点的模拟结果来概括描述整个研究区的特征,得到的结果准确性较差^[64,68]。由于区域在气候、水分、土壤性质、管理措施等方面存在很大的差异,导致地区SOC储量和温室气体排放量差异性较大^[54],局部地区得到验证的模型并不一定能够适用于其他地区,尤其是当模型拓展到国家尺度容易出现不确定性。因此,在国家或区域尺度模拟中需要使用更详细的土壤资料,并对土壤数据源造成的模拟误差进行评估^[34,58,69]。此外,基于DNDC模型模拟的一些研究只是简单描述

了造成该结果的可能因素,并未对影响土壤固碳和CH₄、CO₂排放结果的干扰因素进行足够分析,也未对模型存在的弊端进行分析解释。

3.2 模型模块功能优化

虽然DNDC模型能够较好地用于中国稻田生态系统模拟,但由于DNDC模型提供的作物生理及物候学参数主要来自北美的观测,不能完全适应中国土地的复杂性,模型在应用时需进行验证,确认DNDC模型适用于模拟的区域。国内外种植模式和耕作措施存在差异,DNDC模型缺乏一些中国特有且复杂的农业耕作特征。

DNDC模型虽经过不同领域的研究工作者数十年来的改进,能够用于草地、森林、湿地等生态系统碳氮循环的模拟。但随着农业技术的革新,如水稻移栽、复杂多种作物系统以及农田管理过程中不断出现的新技术,使我国的农田管理措施得到很大的改进,模型拥有的模块很大程度上已经不能满足当前的实际情况,包括模型对中国主要农业生产区温室气体的精细研究还有待进一步发展^[37,54,70]。其次在水稻育种上,新品种的出现伴随着新的栽培方式,如节水抗旱稻,其抗旱性得到增强,突破了传统水稻依附水资源的局限,水田节水栽培或旱地种植都可以,扩大了水稻种植范围,增加了稻田生态系统研究的复杂程度^[71]。因此,为了使模型能够更好地服务于稻田生态系统碳氮循环科学试验达到研究目的,需要补充和完善DNDC模型,使之适用于当前环境。而深入研究不同种植管理模式对碳循环的影响,需要增加其稻作模式评价和土地利用类型转变中的适用性,更准确地模拟多样的栽培模式,进行DNDC模型模块功能优化^[55]。稻田生态系统碳周转和温室气体排放在不同灌溉、施肥和秸秆还田处理下变得较为复杂^[62,72],目前DNDC模型模拟主要是淹水状态下的参数输入,缺乏对排水状态的模拟,导致该模型只对某些积水灌溉范围内(如干旱区小于15 cm积水灌溉实验地)的模拟效果较好。因此,模型模块功能有待进一步优化,需要针对模型模拟的不确定性进行深入研究。

3.3 模型校准和验证

任万辉^[73]基于DNDC模型对广州地区稻田CH₄排放进行模拟研究,但由于模型对施肥敏感,对低水位不敏感,导致模型只考虑了输入参数中的淹水条件,没有提供对排水的稻田模拟结果,使本应出现的排放峰值并没有模拟出来。李东丽^[61]利用DNDC模型对新疆乌鲁木齐市米东区5种水分控制条件下的

稻田温室气体排放情况进行模拟,结果显示当灌溉水超过 15 cm,模型预测结果就会出现极大的误差。这说明DNDC模型存在一定的前提条件并受环境条件限制,利用模型对不同地区或不同管理条件下的稻田开展一些特定方面的研究时会出现模拟结果不准确的现象。

DNDC模型需要大量的参数支撑,而且所使用的参数受气候因子和环境整体条件影响较大,因此利用DNDC模型对不同区域稻田生态系统开展研究时,需要根据区域条件对模型的参数进行修改。目前对于模型模拟结果进行矫正的方法有试错法、贝叶斯推断法2种。但是,由于存在输入参数较多,找准矫正参数困难和代码不公开等问题,使得模型校正难度增加,限制了模型准确性^[12]。模型验证的统计检验方法主要包括RMSE(均方根误差)、MAE(平均绝对误差)、EF(模型效率)和相关系数(R)等来验证模拟结果的精确度,一般来说RMSE小于10%时模拟结果较为理想、10%~20%模拟效果一般、30%以上模拟效果不理想,MAE值是反映模拟值与实测值之间的系统偏差,EF反映模拟值对实测数据的趋势描述效果^[74]。因此,为了提高模型的模拟准确性,输入参数时需要提高输入参数精确度,并结合马尔科夫蒙特卡洛方法与贝叶斯推断法,完成输入参数的自动矫正以及定量评价碳动态模拟结果的不确定性。

利用长期点位试验的结果,对DNDC模型当中的参数进行本土化校正,采用RMSE、MAE、相对误差(E)和相关系数(R)这4种统计学参数,能够验证DNDC模型在稻田生态系统碳动态变化和温室气体估算的适用性。此外,区域尺度模拟将DNDC区域模拟的最小单元划分到乡(镇)的同一土壤类型,能够减少空间异质性^[75-76]。

4 总结与展望

总之, DNDC模型在模拟和估算稻田生态系统碳动态变化等方面,能够达到非常满意的精度和可靠性,适用于中国稻田生态系统模拟。但DNDC模型也会由于地区环境条件差异、管理条件不同而导致模型模拟结果出现偏差。因此, DNDC模型也在不断的开发改进,如将模型从单机版推向网络版,进一步拓展模型的模块功能,使之更好地服务于研究活动^[39]。而耦合3S技术、互联网大数据与有机碳模型,并结合气候模型和植被生长等模型有效扩大研究区域,提高输入参数的准确性和模型模拟精确度,增强DNDC模型为水稻低碳生产服务能力以及不同

稻田管理措施下模型预测评价系统的可信度,将会是模型在稻田生态系统应用上的发展趋势。

参考文献 References

- [1] 潘根兴,李恋卿,郑聚锋,等.土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J].土壤学报,2008,45(5):901-914. PAN G X, LI L Q, ZHENG J F, et al. Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China[J]. Acta pedologica sinica, 2008, 45(5): 901-914 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李强,李建国,张忠启.滨海盐渍土地水稻田C、N及生物量动态变化的模拟与应用[J].生态科学,2018,37(3):148-158. LI Q, LI J G, ZHANG Z Q. Simulation of C, N and biomass dynamic change in coastal saline soil region paddy field[J]. Ecological science, 2018, 37(3): 148-158 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张学智,王继岩,张藤丽,等.中国农业系统甲烷排放量评估及低碳措施[J].环境科学与技术,2021,44(3):200-208. ZHANG X Z, WANG J Y, ZHANG T L, et al. Assessment of methane emissions from China's agricultural system and low carbon measures[J]. Environmental science & technology, 2021, 44(3): 200-208 (in Chinese with English abstract).
- [4] 陈松文,刘天奇,曹凑贵,等.水稻生产碳中和现状及低碳稻作技术策略[J].华中农业大学学报,2021,40(3):3-12. CHEN S W, LIU T Q, CAO C G, et al. Situation of carbon neutrality in rice production and techniques for low-carbon rice farming[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(3): 3-12 (in Chinese with English abstract).
- [5] 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. GAO X Y, YUAN S L, LÜ A M, et al. Effects of alfalfa green manure on rice production and greenhouse gas emissions based on a DNDC model simulation[J]. Acta prataculturae sinica, 2016, 25(12): 14-26 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张鲜鲜,周胜,孙会峰,等. DNDC模型在稻田生态系统中的研究进展及应用[J].上海农业学报,2019,35(1):109-117. ZHANG X X, ZHOU S, SUN H F, et al. Advance and application of DNDC model in paddy ecosystem[J]. Acta agriculturae Shanghai, 2019, 35(1): 109-117 (in Chinese with English abstract).
- [7] LI C S, QIU J J, FROLKING S, et al. Reduced methane emissions from large-scale changes in water management of China's rice paddies during 1980—2000[J]. Geophysical research letters, 2002, 29(20): 33-1 [2022-05-25]. <https://doi.org/10.1029/2002GL015370>.
- [8] 邵玲玲.基于DNDC模型的水稻土有机碳储量变化研究—以青田县为例[D].金华:浙江师范大学,2014. SHAO L L. Study on the changes of paddy soil organic carbon storage in Qingtian County based on dn/dc model[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [9] XU S X, SHI X Z, ZHAO Y C, et al. Modeling carbon dynamics in paddy soils in Jiangsu Province of China with soil databases differing in spatial resolution[J]. Pedosphere, 2011, 21(6): 696-705.

- [10] 张凤,王世航,王军委.土壤有机碳模型研究进展[J].宜春学院学报,2019,41(9):12-18.ZHANG F,WANG S H,WANG J W.Research progress of soil organic carbon model[J].Journal of Yichun University,2019,41(9):12-18(in Chinese with English abstract).
- [11] 帅艳菊.湖北省主要稻作模式温室气体排放模拟研究[D].武汉:华中农业大学,2021.SHUAI Y J.Simulation research on greenhouse gas emission of major rice-based cropping systems in Hubei Province[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2021(in Chinese with English abstract).
- [12] 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.XIE H K,JIANG Y Q,LI H,et al.Modification and application of the DNDC model in China[J].Chinese journal of applied ecology,2017,28(8):2760-2770(in Chinese with English abstract).
- [13] LI C S,FROLKING S,FROLKING T A.A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events:2.model applications[J].Journal of geophysical research:atmospheres,1992,97(D9):9777-9783.
- [14] 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.LI C S.Modeling terrestrial ecosystems[J].Complex systems and complexity science,2004,1(1):49-57(in Chinese with English abstract).
- [15] 张超.基于DNDC模型的草地生态系统碳收支研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2021.ZHANG C.Study on carbon budget of grassland ecosystem by DNDC model[D].Hohhot:Inner Mongolia Normal University,2021(in Chinese with English abstract).
- [16] 郭燕云,刘艳,李秋月,等.CENTURY模型在新疆天山山区的适用性分析[J].草地学报,2020,28(1):252-258.GUO Y Y,LIU Y,LI Q Y,et al.Validation and adaptability evaluation of grassland ecosystem model CENTURY in the Tianshan Mountain area[J].Acta agrestia sinica,2020,28(1):252-258(in Chinese with English abstract).
- [17] 赵雅雯.RothC模型在我国北方农田作物残体提升土壤有机碳中的应用[D].北京:中国农业科学院,2017.ZHAO Y W.RothC model simulation of soil organic carbon on farmland crop residue in North China[D].Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2017(in Chinese with English abstract).
- [18] 张黎明.太湖地区水稻土有机碳演变模拟的尺度效应研究[D].南京:南京农业大学,2009.ZHANG L M.Scale effects of dynamic simulation of paddy soil organic carbon in Taihu Lake region[D].Nanjing:Nanjing Agricultural University,2009(in Chinese with English abstract).
- [19] 原一荃,薛力铭,李秀珍.基于CASA模型的长江口崇明东滩湿地植被净初级生产力与固碳潜力[J].生态学杂志,2022,41(2):334-342.YUAN Y Q,XUE L M,LI X Z.Net primary productivity and carbon sequestration potential of salt marsh vegetation in Chongming Dongtan of the Yangtze Estuary based on CASA model[J].Chinese journal of ecology,2022,41(2):334-342(in Chinese with English abstract).
- [20] 范兰,吕昌河,陈朝.EPIC模型及其应用[J].地理科学进展,2012,31(5):584-592.FAN L,LU C H,CHEN Z.A review of EPIC model and its applications[J].Progress in geography,2012,31(5):584-592(in Chinese with English abstract).
- [21] 梅晓丹,李丹,王强,等.基于Biome-BGC模型的小兴安岭森林碳通量时空分析[J].测绘与空间地理信息,2021,44(11):7-10.MEI X D,LI D,WANG Q,et al.Spatial-temporal analysis of forest carbon flux of in Xiaoxing'anling based on Biome-BGC model[J].Geomatics & spatial information technology,2021,44(11):7-10(in Chinese with English abstract).
- [22] 刘丽慧,孙皓,李传华.基于改进土壤冻融水循环的Biome-BGC模型估算青藏高原草地NPP[J].地理研究,2021,40(5):1253-1264.LIU L H,SUN H,LI C H.Estimation of grassland NPP in the Qinghai-Tibet Plateau based on the improved Biome-BGC model considering soil freeze-thaw water cycle[J].Geographical research,2021,40(5):1253-1264(in Chinese with English abstract).
- [23] 王乐,杜灵通,马龙龙,等.人工灌丛化对荒漠草原生态系统碳储量的影响[J].生态学报,2022,42(1):246-254.WANG L,DU L T,MA L L,et al.Effects of planted shrub encroachment on carbon storage of desert steppe ecosystem[J].Acta ecologica sinica,2022,42(1):246-254(in Chinese with English abstract).
- [24] 唐敏.中国土壤有机碳时空分布及影响因素研究进展[J].河南工程学院学报(自然科学版),2019,31(4):42-49,82.TANG M.Research advances in spatial and temporal distribution of soil organic carbon and its influencing factors in China[J].Journal of Henan University of Engineering (natural science edition),2019,31(4):42-49,82(in Chinese with English abstract).
- [25] 邱建军,秦小光.农业生态系统碳氮循环模拟模型研究[J].世界农业,2002(9):39-41.QIU J J,QIN X G.Study on carbon and nitrogen cycle simulation model of agroecosystem[J].World agriculture,2002(9):39-41(in Chinese).
- [26] 张钊.呼伦贝尔草甸草原生态系统碳循环动态模拟与未来情景分析[D].北京:中国农业科学院,2016.ZHANG Z.Simulation on hulunber meadow steppe ecosystem carbon cycle dynamic and future climate scenario analysis[D].Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2016(in Chinese with English abstract).
- [27] 王淼,刘珮玥,刘博文,等.区域植被净生产力模型的生态红线实施评估[J].测绘科学,2022,47(2):157-165.WANG M,LIU P Y,LIU B W,et al.Ecological red line implementation evaluation of regional vegetation net productivity model[J].Science of surveying and mapping,2022,47(2):157-165(in Chinese with English abstract).
- [28] 朱玉果,杜灵通,谢应忠,等.2000—2015年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应[J].生态学报,2019,39(2):518-529.ZHU Y G,DU L T,XIE Y Z,et al.Spatiotemporal characteristics of grassland net primary production in Ningxia Province from 2000 to 2015 and its response to climate change[J].Acta ecologica sinica,2019,39(2):518-529(in Chinese with English abstract).
- [29] 王宪志.基于EPIC模型的苹果园土壤水分变化及水分生产力模拟研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.WANG X Z.Study on simulation of soil water change and water productivity in apple orchard based on EPIC model[D].Yangling:Northwest A & F University,2021(in Chinese with English abstract).
- [30] 方兴义.基于EPIC模型的农业旱灾风险模糊评估方法[J].灾害学,2020,35(3):55-58.FANG X Y.Fuzzy evaluation method of agricultural drought risk based on EPIC model[J].Journal of catastrophology,2020,35(3):55-58(in Chinese with English abstract).
- [31] CHEN H,YU C Q,LI C S,et al.Modeling the impacts of water

- and fertilizer management on the ecosystem service of rice rotated cropping systems in China[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2016, 219: 49-57.
- [32] LI C S, FROLKING S, HARRISS R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils[J]. *Global biogeochemical cycles*, 1994, 8(3): 237-254.
- [33] ZHANG Y, LI C S, ZHOU X J, et al. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture[J]. *Ecological modelling*, 2002, 151(1): 75-108.
- [34] LI C S, MOSIER A, WASSMANN R, et al. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: sensitivity and upscaling[J/OL]. *Global biogeochemical cycles*, 2004, 18(1): GB1043 [2022-05-25]. <https://www.researchgate.net/publication/255596290>.
- [35] LI C S, FROLKING S, XIAO X M, et al. Modeling impacts of farming management alternatives on CO₂, CH₄, and N₂O emissions: a case study for water management of rice agriculture of China [J/OL]. *Global biogeochemical cycles*, 2005, 19(3): GB3010 [2022-05-25]. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2005/2004GB002341.shtml>.
- [36] ZHAO Z, ZHANG H L, LI C S, et al. Quantifying nitrogen loading from a paddy field in Shanghai, China with modified DNDC model[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2014, 197: 212-221.
- [37] LI H, WANG L G, LI J Z, et al. The development of China-DNDC and review of its applications for sustaining Chinese agriculture[J]. *Ecological modelling*, 2017, 348: 1-13.
- [38] 陆俊, 黄进良, 王立辉, 等. 基于时空数据融合的江汉平原水稻种植信息提取[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(6): 874-881. LU J, HUANG J L, WANG L H, et al. Paddy rice planting information extraction based on spatial and temporal data fusion approach in Jianghan Plain[J]. *Resources and environment in the Yangtze basin*, 2017, 26(6): 874-881 (in Chinese with English abstract).
- [39] 蒋在获. 网络版 CHINA-DNDC 模型的研发与应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2018. JIANG Z D. Development and application of the CHINA-DNDC online model[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [40] 刘清, 孙波, 解宪丽, 等. 县域尺度红壤丘陵区水稻土有机碳模拟[J]. *土壤学报*, 2009, 46(6): 1059-1067. LIU Q, SUN B, XIE X L, et al. The spatial-temporal dynamic change and simulation of county-scale paddy soil organic carbon in red soil hilly region[J]. *Acta pedologica sinica*, 2009, 46(6): 1059-1067 (in Chinese with English abstract).
- [41] 吴世蓉, 位佳, 邱龙霞, 等. 基于大比例尺数据库的福建省耕地土壤固碳速率和潜力研究[J]. *土壤学报*, 2022: 1-15 [2022-05-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210723.1538.004.html>. WU S R, WEI J, QIU L X, et al. Study of soil organic carbon sequestration rate and potential of farmland soil in Fujian Province based on the large scale soil database[J]. *Acta pedologica sinica*, 2022: 1-15 [2022-05-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210723.1538.004.html>. DOI: 10.11766/trxb202012040671 (in Chinese with English abstract).
- [42] 徐胜祥, 史学正, 赵永存, 等. 不同耕作措施下江苏省稻田土壤固碳潜力的模拟研究[J]. *土壤*, 2012, 44(2): 253-259. XU S X, SHI X Z, ZHAO Y C, et al. Simulation of carbon sequestration potential from paddy fields in Jiangsu Province under different tillage practices[J]. *Soils*, 2012, 44(2): 253-259 (in Chinese with English abstract).
- [43] XU S X, SHI X Z, ZHAO Y C, et al. Carbon sequestration potential of recommended management practices for paddy soils of China, 1980—2050[J]. *Geoderma*, 2011, 166(1): 206-213.
- [44] XU S X, ZHAO Y C, SHI X Z, et al. Map scale effects of soil databases on modeling organic carbon dynamics for paddy soils of China[J]. *CATENA*, 2013, 104: 67-76.
- [45] ZHANG L, YU D, SHI X, et al. Effects of soil data and simulation unit resolution on quantifying changes of soil organic carbon at regional scale with a biogeochemical process model[J/OL]. *PLoS One*, 2014, 9(2): e88622 [2022-04-29]. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.2014.e88622>.
- [46] 倪元龙, 于东升, 张黎明, 等. 不同比例尺农田土壤碳库模拟的最佳栅格单元分辨率[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 32-40. NI Y L, YU D S, ZHANG L M, et al. Optimal resolution of grid units of simulated paddy soil organic carbon pools of various scales[J]. *Acta pedologica sinica*, 2014, 51(1): 32-40 (in Chinese with English abstract).
- [47] 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. ZHANG Y, QI J G, YIN M F, et al. Simulating spatial-temporal dynamics of greenhouse gas emission from rice paddy field in Liaodong coastal region, China[J]. *Scientia agricultura sinica*, 2007, 40(10): 2250-2258 (in Chinese with English abstract).
- [48] 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. ZHANG Y, LI Y, WANG Y Y, et al. Simulation and estimation of methane emissions from rice paddies in Sanjiang Plain of the Northeast China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 293-298 (in Chinese with English abstract).
- [49] 赵苗苗, 邵蕊, 杨吉林, 等. 基于 DNDC 模型的稻田温室气体排放通量模拟[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1057-1066. ZHAO M M, SHAO R, YANG J L, et al. Simulation of greenhouse gas fluxes in rice fields based on DNDC model[J]. *Chinese journal of ecology*, 2019, 38(4): 1057-1066 (in Chinese with English abstract).
- [50] 吴梦琴, 李成芳, 盛锋, 等. 基于 DNDC 模型评估湖北省不同稻作系统不同管理措施温室气体排放的周年变化[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(9): 1480-1492. WU M Q, LI C F, SHENG F, et al. Assessment of the annual greenhouse gases emissions under different rice-based cropping systems in Hubei Province based on the denitrification-decomposition (DNDC) model[J]. *Chinese journal of eco-agriculture*, 2021, 29(9): 1480-1492 (in Chinese with English abstract).
- [51] WANG Z, ZHANG X Y, LIU L, et al. Estimates of methane emissions from Chinese rice fields using the DNDC model[J/OL]. *Agricultural and forest meteorology*, 2021, 303: 108368 [2022-05-25]. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108368>.
- [52] 王利华, 万海波, 邵小云, 等. 典型大高江流域稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的分析与控制研究[J]. *科技通报*, 2017, 33(5): 217-223. WANG L H, WAN H B, SHAO X Y, et al. Analyses of paddy field CH₄ and N₂O emissions and management in the dasongjiang watershed[J]. *Bulletin of science and technology*, 2017, 33(5): 217-223 (in Chinese with English abstract).

- [53] 贺冬冬. 稻田利用方式转变对生态系统CO₂排放和碳收支的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017. HE D D. The effect of paddy field management change on ecosystem CO₂ emission and carbon budget [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [54] 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. ZOU F L, CAO C G, MA J Y, et al. Greenhouse gases emission under different cropping systems in the Jianghan Plain based on DNDC model[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2018, 26(9): 1291-1301 (in Chinese with English abstract).
- [55] 阿依吐拉·买买提祖农, 帅艳菊, 魏浩东, 等. 基于遥感识别与DNDC模型的不同稻作模式评价——以潜江市为例[J]. 农业大数据学报, 2021, 3(3): 33-44. AYITULA M, SHUAI Y J, WEI H D, et al. Evaluation of green development of rice-based cropping systems using remote sensing data and the DNDC model: case study of Qianjiang City[J]. Journal of agricultural big data, 2021, 3(3): 33-44 (in Chinese with English abstract).
- [56] 孙园园, 孙永健, 王锐婷, 等. DNDC模型对川中丘陵区稻田CH₄、N₂O排放的模拟对比分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(S1): 1003-1010. SUN Y Y, SUN Y J, WANG R T, et al. Research of tillage-cropping systems on CH₄ and N₂O emission from permanently flooded rice fields in a central Sichuan hilly area of southwest China [J]. Ecology and environmental sciences, 2011, 20(S1): 1003-1010 (in Chinese with English abstract).
- [57] 孙园园, 孙永健, 杨志远, 等. 模拟栽培条件的改变对稻田主要温室气体排放的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 181-189. SUN Y Y, SUN Y J, YANG Z Y, et al. Simulation of greenhouse gas emissions as affected by cultivation practices in rice fields [J]. Agricultural research in the arid areas, 2013, 31(6): 181-189 (in Chinese with English abstract).
- [58] 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CH₄排放模拟研究[J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2185-2192. ZHANG L M, YU D S, SHI X Z, 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 model [J]. Environmental science, 2009, 30(8): 2185-2192 (in Chinese with English abstract).
- [59] 孙欣, 史学正, 潘剑君, 等. 太湖地区稻田甲烷排放模拟的粒度效应研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 659-664. SUN X, SHI X Z, PAN J J, et al. Size effect on simulation of methane emission from paddy soils in Taihu Lake region [J]. Acta pedologica sinica, 2010, 47(4): 659-664 (in Chinese with English abstract).
- [60] 刘平丽. 稻田土壤剖面CH₄、N₂O、CO₂分布特征及周转规律研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011. LIU P L. Distribution characteristics and turnover of soil profile methane, nitrous oxide and carbon dioxide in paddy fields [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [61] 李东丽. 基于DNDC模型的干旱区水稻田温室气体排放实验研究——以乌鲁木齐市米东区为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021. LI D L. Experimental study on greenhouse gas emissions from rice fields in arid areas based on DNDC model: a case study of midong district, Urumqi city [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [62] 江贇伟, 杨士红, 丁洁, 等. 基于DNDC模型的不同水文年稻田水碳管理模式优化[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 93-102. JIANG Z W, YANG S H, DING J, et al. Optimization of water and carbon management modes for paddy fields in different hydrological years based on the DNDC model [J]. Agricultural research in the arid areas, 2020, 38(4): 93-102 (in Chinese with English abstract).
- [63] 王季斐. 不同磷含量水稻土微界面有机质转化的微观过程研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2020. WANG J F. The microscopic process of organic matter transformation on microsurface in paddy soil with different phosphorus contents [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [64] 吕晓东, 王婷. DNDC模型模拟农田温室气体排放研究进展[J]. 甘肃农业科技, 2018(11): 91-96. LÜ X D, WANG T. Research progress of DNDC model simulating greenhouse gas emission from farmland [J]. Gansu agricultural science and technology, 2018(11): 91-96 (in Chinese with English abstract).
- [65] 朱相成, 白若琦. 基于DNDC模型稻田甲烷排放影响因子的敏感性分析[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(3): 577-580, 583. ZHU X C BAI R Q. Sensitivity analysis of influence factor for methane emissions in paddy field based on DNDC model [J]. Journal of Zhejiang agricultural sciences, 2020, 61(3): 577-580, 583 (in Chinese).
- [66] SIMMONDS M B, LI C S, LEE J, et al. Modeling methane and nitrous oxide emissions from direct-seeded rice systems [J]. Journal of geophysical research: biogeosciences, 2015, 120(10): 2011-2035.
- [67] 张庆国, 李鹏飞, 徐丽, 等. 皖中沿江平原水稻田CH₄和N₂O排放估算及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 212-218. ZHANG Q G, LI P F, XU L, et al. Estimation of CH₄ and N₂O emissions from the paddy fields in Wan-Zhong-Yan-Jiang plain and analysis of their influence factors [J]. Chinese journal of soil science, 2012, 43(1): 212-218 (in Chinese with English abstract).
- [68] WANG Y Q, ZHANG X C, ZHANG J L, et al. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the loess plateau [J]. Pedosphere, 2009, 19(4): 486-495.
- [69] PATHAK H, LI C S, WASSMANN R. Greenhouse gas emissions from Indian rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model [J]. Biogeosciences, 2005, 2(2): 113-123.
- [70] 黄国勤. 中国南方稻田耕作制度发展的成就、问题及战略对策[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 1-20. HUANG G Q. Achievements, problems and strategic countermeasures of development of paddy field farming systems in Southern China [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1): 1-20 (in Chinese with English abstract).
- [71] 李兴华, 汪昊凯, 杨特武, 等. 节水抗旱稻发展现状、优势及需解决的主要问题[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 84-91. LI X H, WANG W K, YANG T W, et al. Development status, advantages and main problems to be resolved of water-saving and drought-resistant rice [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1): 84-91 (in Chinese with English abstract).
- [72] 江峰. 秸秆还田与灌溉模式对超级粳稻产量形成、及温室气体排放的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2014. JIANG F. Effects of straw returning and irrigation condition on yield formation of su-

- per japonica rice and emission of greenhouse gases from paddy field[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014(in Chinese with English abstract).
- [73] 任万辉. 广州地区稻田甲烷和氧化亚氮排放及模拟研究[D]. 南京: 南京气象学院, 2004. REN W H. Emission and simulation of methane and nitrous oxide from rice fields in Guangzhou [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Meteorology, 2004(in Chinese with English abstract).
- [74] 夏文建, 王淳, 张丽芳, 等. 基于DNDC模型的双季稻体系氮挥发损失研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(9): 2035-2046. XIA W J, WANG C, ZHANG L F, et al. Suitability of DNDC model to simulate ammonia volatilization for double rice cropping system [J]. Resources and environment in the Yangtze basin, 2020, 29(9): 2035-2046(in Chinese with English abstract).
- [75] 贾海霞, 汪霞, 李佳, 等. 新疆焉耆盆地绿洲区农田土壤有机碳储量动态模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5106-5116. JIA H X, WANG X, LI J, et al. Dynamic simulation of soil organic carbon storage in farmland of the Yanqi Basin Oasis area, in Xinjiang [J]. Acta ecologica sinica, 2019, 39(14): 5106-5116(in Chinese with English abstract).
- [76] 史常明, 柳洋, 张富荣, 等. 焉耆盆地绿洲农田不同类型土壤有机碳空间分布特征及储量估算[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 672-681. SHI C M, LIU Y, ZHANG F R, et al. Soil organic carbon spatial distribution and reserve estimation of different soil types in Yanqi Basin Oasis area [J]. Arid zone research, 2021, 38(3): 672-681(in Chinese with English abstract).

Progress on carbon dynamics simulation of paddy ecosystem based on DNDC model

QIAN Haiyan¹, YU Tingting¹, ZHOU Yangming², WANG Wei³, CHEN Shasha¹

1. College of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. College of Geographic and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;
3. Jiangxi Engineering Consulting Center Co. LTD, Nanchang 330036, China

Abstract The DNDC model is a relatively mature dynamic simulation model that simulates biogeochemical processes with time factors, and can be used to simulate and evaluate the production of crop (such as rice), the dynamic evolution of carbon and nitrogen, and greenhouse gas emissions in paddy ecosystem. In order to understand the DNDC model more fully and make it used more widely, this article analyzed and summarized the progress of DNDC model in paddy soil carbon sequestration potential, greenhouse gas CO₂ and CH₄ emission simulation, paddy management model evaluation and model parameter sensitivity analyses from the perspective of paddy soil carbon dynamics based on the composition and function of the DNDC model, the comparison of the six world-famous biogeochemical models, and the module optimization of the DNDC model in the paddy ecosystem. It also pointed out that the DNDC model affected by factors including large spatial heterogeneity of soil properties and differences in regional field management measures has problems including difficulty in extending point-scale verification to location-scale simulation and difficulty in model correction, which limit the accuracy of the model. In order to enable the DNDC model to carry out simulation under the complex characteristics of the agricultural development in China in the future, we should pay attention to optimize the function of the DNDC model module and improve the accuracy of input parameters to further improve the accuracy of model simulation and the reliability of the prediction and evaluation system, to provide methodological reference for studying the carbon dynamics of paddy ecosystem and making the model play a better role in the carbon sequestration, emission reduction of paddy field and the formulation of management scheme.

Keywords DNDC model; paddy ecosystem; soil carbon sequestration; CH₄ and CO₂ emissions; management model evaluation

(责任编辑: 陆文昌)