

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.1156

LIU Fang, WU Minghui, YANG Meixue, et al. Research progress of DNDC model and its application prospect in alpine ecosystem[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1321-1333. [刘放, 吴明辉, 杨梅学, 等. DNDC模型的研究进展及其在高寒生态系统的应用展望[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4):1321-1333.]

DNDC模型的研究进展及其在高寒生态系统的应用展望

刘 放^{1,3}, 吴明辉^{1,3}, 杨梅学¹, 陈生云^{1,2,3}

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室 疏勒河源冰冻圈与生态环境综合监测研究站, 甘肃 兰州 730000;
2. 青海师范大学 高原科学与可持续发展研究院/地理科学学院, 青海 西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: DNDC(Denitrification-Decomposition, 反硝化-分解)模型是建立在元素丰度、耦合、循环和动力四个概念之上的生物地球化学模型。作为将生物地球化学理论应用于当前生态环境问题的桥梁, DNDC模型通过计算反硝化和有机质分解来模拟生态系统中碳氮循环过程, 其最终目的是计算目标生态系统中不同库间的温室气体排放通量。经过二十多年的发展, DNDC模型已成为目前国际上最成功的生物地球化学模型之一。文章阐述了DNDC模型的发展历程、科学结构、模型验证及校正, 总结了DNDC模型在生态系统应用中的主要研究进展及不足之处, 并对DNDC模型在高寒生态系统中的应用提出展望。

关键词: DNDC模型; 温室气体; 碳氮循环; 高寒生态系统

中图分类号: X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1321-13

0 引言

气候变化已成为当前广泛关注的话题。据政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次报告, 1951-2012年全球地表均温以每10年上升0.12℃的速率升高^[1], 而人类活动是造成大量温室气体排放的主要原因。其中, N₂O是增温效应非常强的一类温室气体, 在全球范围内农业N₂O排放量占N₂O总排放量的60%; 农业土壤是N₂O的重要来源, 对全球变暖的贡献率为6.1%^[2-4]。为研究农业管理和气候变化的潜在影响, 越来越多的研究者使用数学模型这种强大的工具, 其中以土壤温室气体为目标的生物地球化学模型DNDC(Denitrification-Decomposition, 反硝化-分解)逐渐建立起来。起初, DNDC模型的建立是为了模拟美国农业土壤N₂O的排放^[5], 它能够模拟N₂O的产生、消耗和迁移过程,

并且这种能力在全球气候变化情景下更具有针对性^[6-7]。经过不断的发展, DNDC模型的科学结构与与时俱进, 模块功能得到不断拓展, 且在世界许多国家得到应用与验证。其模拟的生物地球化学过程从温室气体排放扩展到植物生长、微生物活动、营养元素流失、土壤固碳等, 模拟的生态系统也从农田扩展到森林、草地、湿地和养殖系统。例如, 针对中国特有的农业生态系统特征而开发的China-DNDC^[8], 包括了复杂的耕作制度、集约经营等; Zhang等^[9]开发的Crop-DNDC模型, 集成了详细的作物生长算法, 用于作物生长C、N和水循环的模拟; Beheydt^[10]开发的BE-DNDC模型, 用于计算比利时集约农业用地N₂O的排放; Fumoto等^[11]用DNDC-Rice模型对日本稻田的CH₄缓解潜力进行了评估。针对森林生态系统, Li等^[12]整合了PnET、

收稿日期: 2019-07-09; 修订日期: 2019-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41690142; 41871064; 41571066; 41771068); 青海省自然地理与环境过程重点实验室开放课题(2018-QZH-K01)资助

作者简介: 刘放(1995-), 男, 四川广元人, 2018年在西华师范大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读硕士研究生, 从事高寒生态系统土壤碳氮循环研究. E-mail: 17369096753@163.com

通信作者: 陈生云, 副研究员, 从事冰冻圈生态学研究. E-mail: sychen@lzb.ac.cn.

DNDC 和一个硝化模型开发了 PnET-N-DNDC 模型；随后，Forest-DNDC^[13] 和 Forest-DNDC Tropical^[14] 相继被开发出来，用于预测森林产量、土壤碳汇和微量气体排放。另外，Haas 等^[15] 开发的 Landscape-DNDC，其主要特点是可进行多种生态系统（如森林、草原、耕地）C 和 N 循环的模拟。Zhang 等^[16] 开发的 Wetland-DNDC，主要用于预测由湿地生态系统中水文、土壤生物化学和植被过程驱动的 CO₂ 和 CH₄ 排放。Li 等^[17] 开发的 Manure-DNDC，主要用于对养殖生态系统温室气体和 NH₃ 排放的模拟。2013 年 DNDC 模型更新到 9.5 版本，也是目前最新的版本。DNDC 模型不断更新以适应不同地区、不同生态环境问题的需要，这种多指标和较为全面的生态系统模拟优势，使其成为各国研究者重点关注的模型之一。

虽然 DNDC 模型能模拟多种生态系统且在国内外许多地区得到了应用与验证，但目前对于 DNDC 模型在高寒生态系统的验证却鲜有报道。高寒生态系统是指在高寒环境下冻结和融化作用所塑造出的寒冻土壤、冷生植被群落、与冻土有关的水热变化过程等，以及在该环境下形成的协同发展的生态系统，也称为冻土生态系统^[18-19]。高寒生态系统与农田生态系统有很大的差异。相比于农田生态系统，低温等气候条件是影响高寒生态系统稳定的决定性因子，相对小的气候变化便能引起高寒生态系统的巨大变化^[20]；高寒生态系统与冻土环境关系密切，其中冻融过程引起的土壤环境（土壤水分和热量迁移过程等）改变对高寒生态系统典型植被生长发育产生直接或间接影响；另外，高寒生态系统与农田生态系统气象要素以及土壤环境不同，将直接或间接影响植物生理过程，进而形成显著的植物群落结构差异^[21]。除气候、土壤以及植被外，高寒生态系统与农田生态系统受人类活动的影响也存在显著差异。

受制于高寒生态系统碳氮循环复杂的生物物理过程，目前对其碳氮循环过程的调节机制尚不完全了解，对其气候变化敏感性的认识也十分有限，这些问题使量化和预测不同气候情景下高寒生态系统碳氮收支的未来动态变得困难。DNDC 模型对高寒生态系统模拟的难点在于模型本身科学结构存在缺陷，比如土壤日冻融循环^[22] 过程比较简单，缺乏对多年冻土和积雪变化等过程及其协同作用的有效模拟，缺乏用于验证的实测数据，模型校

正和优化参数化方案也是难点之一。高寒生态系统对全球变化非常敏感，以活动层增厚为主要表征的多年冻土退化已对高寒生态系统产生很大影响^[23-25]。近些年来，随着对冻土水热过程认识更加深入，人们意识到碳氮循环模型中耦合冻融过程和积雪变化过程的必要性和科学性^[26]，对进一步研究高寒生态系统温室气体产生与排放机理具有重要的指导作用。本文旨在对 DNDC 模型在生态系统中的应用进行详细的阐述和总结，明晰该模型在解决复杂生态问题中的贡献，分析 DNDC 模型的不足，指明未来发展方向，为推动 DNDC 模型在高寒生态系统的应用和碳氮循环研究提供参考资料。

1 DNDC 模型简介

1.1 发展过程

目前，国际上共有 30 多种生物地球化学过程模型^[27]，DNDC 模型是最为成功的 N₂O 释放机理模型之一^[7]。气候变化、农业管理措施以及微生物活动都会对农田土壤 N₂O 排放产生影响^[3]。传统排放因子的计算方法已经无法满足需求，那么将影响 N₂O 的众多环境因子和生物地球化学过程都包括到一个数学模型中就成为必然。1992 年，这一模型以 DNDC 命名并成功发表后，研究者对它的结构和功能产生了极大的兴趣，并且陆续加入到发展 DNDC 模型的行列中。为了适应不同的生态系统、区域尺度和研究问题，经过二十多年的发展，DNDC 模型的结构不断完善、相关参数得到优化、功能不断扩展，其模拟的温室气体由原来的 N₂O 增加到 CO₂ 和 CH₄，且能支持不同生态系统类型的模拟（如农田、森林、草地、湿地和养殖系统）。目前，DNDC 模型已在国际上得到广泛验证与应用，其具体的发展过程如表 1 所示。需要注意的是，本质上 Crop-DNDC 和 Wetland-DNDC 都属于 DNDC 特殊定制的 2 个版本，源代码都在 DNDC 里面；而 NZ-DNDC、UK-DNDC 等均属于部分研究人员自己发展的版本，属于并行发展关系。

近年来，也有一些在高寒生态系统应用和修改 DNDC 模型的案例。例如，Dutta 等^[28] 用加拿大渥太华实验农场的水汽通量、生物量数据进一步参数化 DNDC，开发了 DNDC95 v. CAN2 模型。该模型使用修正的彭曼公式计算蒸散量，该方法可提高蒸散量、作物产量和用水效率预测的准确性，有利于

表1 DNDC 模型的发展过程(据文献[29]修改)

Table 1 The development processes of DNDC model (modified from Reference [29])

年份	开发者	模型名称	模型优化	文献来源
1992	Li 等	DNDC 初级版本	3 个基础模块(土壤气候/水热、土壤碳素分解、土壤脱氮)	[30]
1994	Li 等	DNDC7.1 版本	加入 1 个植物生长模块	[31]
2000	Li 等	PnET-N-DNDC	加入 1 个光合-蒸散模块和 1 个硝化模块	[12]
2002	Zhang 等	Crop-DNDC	加入 3 个独立的植物生长模块	[9]
2002	Zhang 等	Wetland-DNDC	加入土壤水文参数、土壤温度参数和土壤碳轨迹	[16]
2002	Brown 等	UK-DNDC	加入 1 个有机肥模块	[32]
2004	Saggar 等	NZ-DNDC	进行了机理优化	[33]
2005	Li 等	Forest-DNDC	加入 1 个森林生理模块	[13]
2005	Kiese 等	Tropical	整合了 BIOME-BGC 模型的常绿阔叶林模块	[14]
2006	Beheydt	BE-DNDC	加入区域模拟模块	[10]
2007	Fumoto 等	DNDC-Rice	改进了支持水田不同水淹制度的模拟	[11]
2008	Leip 等	DNDC-Europe	整合了 CAPRI 模型	[34]
2011	Kröbel 等	DNDC-CSW	外挂 1 个 CSW 子模块	[35]
2012	Zhang 等	NEST-DNDC	整合了 NEST 模型和 DNDC 模型	[36]
2012	Li 等	Manure-DNDC	整合了一系列生物地球化学过程到一个可计算框架中	[17]
2013	Haas 等	Landscape-DNDC	将 DNDC、Forest-DNDC 合并于 MoBiLE 框架	[15]
2014	Zhao 等	DNDC9.5 版本	增强植物生长、水文动态模块;优化温室气体排放相关参数	[37]

改进温室气体排放的估计,且可以模拟大范围气候区域的蒸散发过程及其对其他生物地球化学过程的影响。提高土壤温度估算的准确性对模型模拟非常重要,Dutta 等^[38]开发了 DNDC v. CAN^{comp}模型,该模型考虑了加拿大实验农场冻结与非冻结条件下的土壤质地、作物冠层和积雪深度对土壤表层温度的影响,改进了由土壤导热系数和热容驱动的土壤温度计算。土壤传热机制的发展,提高了模型模拟春季融雪过程中 N₂O 排放的性能,且在高寒区不同质地土壤、不同种植和管理方式下,可显著改善土壤温度的模拟。DNDC 模型没有明确考虑有机肥中微生物的影响,Shen 等^[39]针对加拿大实验农场实际情况加入微生物因子模块,以说明有机肥投入对微生物含量的影响,并发展了 UK-DNDC 模型,发展后的模型能有效模拟土壤 N₂O 的排放。Cui 等^[40]修正了 DNDC 模型以更好地预测高寒区土壤温度和温室气体排放,修正后的 DNDC 模型考虑了积雪的保温效应,改进了模型中雨雪分区、土壤温度和土壤冻融循环子模块。为了减小输入参数和初始条件不确定性的影响,模型中加入了一种自旋向上的反向优化方法;并用加拿大野外实验观测数据(积雪深度、土壤温度和含水量、N₂O 和 CO₂ 通量)对修正后的模型进行评估,修正后的 DNDC 相比于未修正的 DNDC 能很好地捕捉积雪、地温以及温室气体(N₂O、CO₂)通量动态变化。以上案例表明,修

正后的 DNDC 模型能适应高寒生态系统,但为了更好地适应高寒生态系统复杂的生物地球化学过程,考虑到冻融循环、多年冻土融化、积雪以及冰川消融等过程的影响,诸如模型中土壤呼吸、硝化和反硝化等过程也可能需要修正。

冻融循环、多年冻土融化、积雪以及冰川消融等过程对高寒生态系统生物地球化学循环有重要影响。冻融循环通过改变土壤结构、土壤水热传输过程,影响微生物活性以及有机质的矿化,进而影响到温室气体的排放,改变土壤元素的生物地球化学循环过程,从而对土壤生态系统结构和功能产生影响^[41]。积雪和冻土并不是孤立变化的,积雪对土壤的保温作用使得有积雪覆盖地区的土壤温度高于无雪区域,而土壤冻结又能阻止积雪融水渗入土壤从而形成地表径流流走,积雪的融化和多年冻土的融化都会吸收相变潜热并引起土壤湿度的变化,进而改变生态系统地表热源^[42]。多年冻土融化甚至可能导致某一区域生态系统的转变,如陆生生态系统转至湿地生态系统。而高寒湿地由于季节性融化、淹水现象普遍存在,成为潜在的产生 CH₄ 的理想场所^[43]。冰川变化对生态环境有重要影响,冰川消融过程与水热条件、气象要素、冰面局地及周边地形、冰川表面状况等密切相关^[44]。

1.2 科学结构

Denitrification-Decomposition 即反硝化-分解作

用,是导致土壤碳氮向大气转移的主要生物地球化学过程。DNDC模型能模拟生态系统中碳氮迁移转化的计算机模拟表达,模型由两大部分构成:第一部分包括土壤气候、植物生长和有机质分解三个子模型,第二部分包括硝化作用、反硝化作用和发酵作用三个子模型(图1)。第一部分的作用是利用生态系统宏观结构的各种生态驱动因子(模型输入的参数,如气候、土壤、植被以及人类管理活动)来模拟生态系统内部的环境营力[温度、湿度、pH、

Eh(氧化还原)和相关反应物浓度梯度],这些生态系统内部的环境营力组成了一个目标生态系统的多维力场,即生物地球化学场。第二部分的作用是模拟环境营力对微生物活动的影响,并计算植物-土壤系统中主要温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)以及 N_2 、 NO 、 NH_3 的排放,生物地球化学场中的这些环境营力遵循化学热力学和反应动力学原则决定生态系统内部所有地球化学和生物化学反应的方向和速率^[45]。

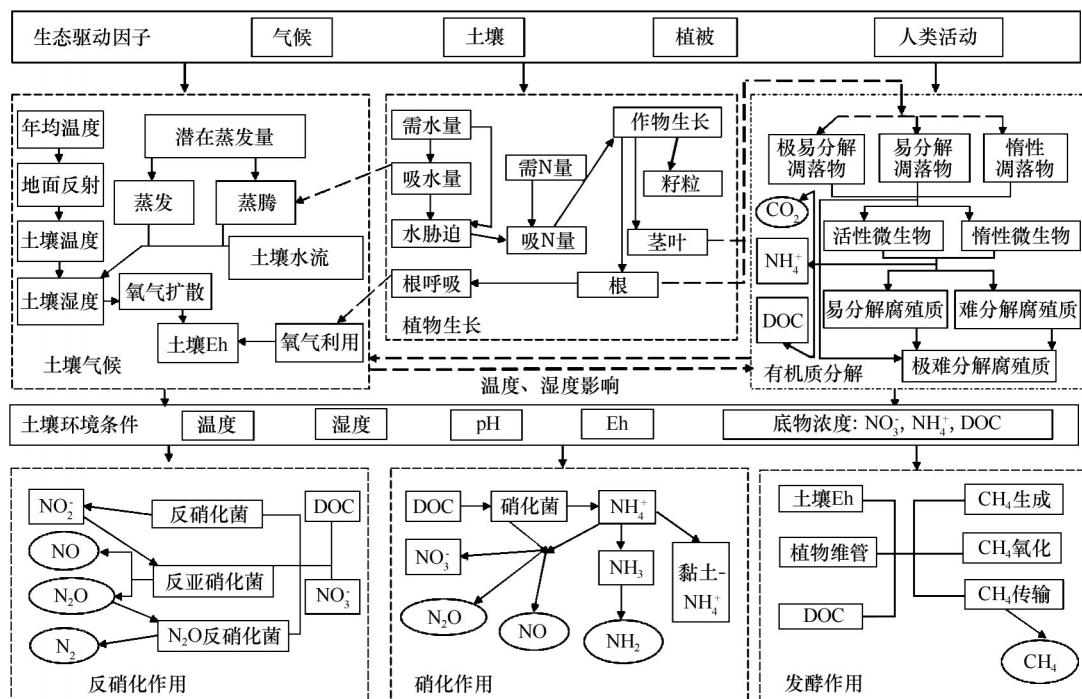


图1 DNDC模型结构图(据文献[46]改绘)

Fig. 1 Schematic diagram of DNDC model structure (modified from Reference [46])

在DNDC模型中有四个主要的碳库,包含植物凋落物、微生物、活性腐殖质和惰性腐殖质。这四个主要的碳库又分别包含2~3个亚库,每个亚库中土壤有机碳(SOC)的分解速率是由亚库的大小、土壤黏粒含量、土壤温度和湿度所决定的。DNDC以天为时间步长计算土壤有机碳库输入、输出量以及净变化量。为模拟微生物参与的硝化与反硝化过程,模型中使用了一个虚拟的算子“厌氧气球”(“厌氧体积比例”)来模拟氧化还原反应在土壤不同微区同时发生的动态过程。它是土壤中相对还原性微区占土壤总体积的比例,其大小代表着土壤总体的氧化还原水平。在土壤中, CO_2 、 CH_4 和 N_2O 由微生物活动产生或消耗,而微生物活动受Eh、溶解性有机质和电子受体(如氧气、硝酸盐等)的调控(图2)。

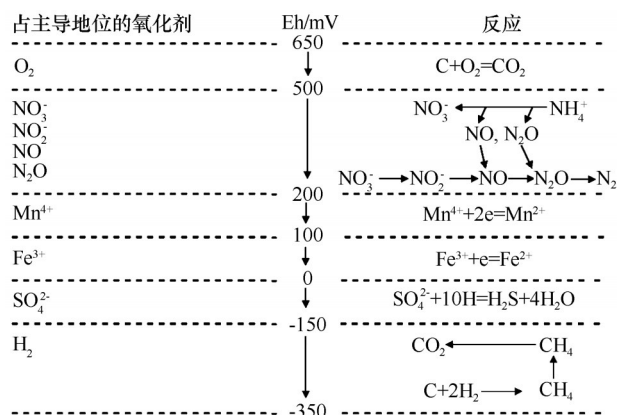


图2 特定Eh范围内微生物活动驱动温室气体的产生与消耗(据文献[47]改绘)

Fig. 2 Greenhouse gas production/consumption driven by microbial activity in specific Eh ranges (modified from Reference [47])

作物生长在调节土壤 C、N 和水分状况方面起着重要作用^[48], 对其模拟一般有两种方法, 即经验和基于过程的方法。经验方法是指根据作物生物量、积温、氮胁迫和水分来模拟作物生长; 基于过程的方法是根据呼吸、光合和碳分配来模拟作物生长发育, 采用了 MACROS 模型^[49]的模拟方法。DNDC 模拟作物生长时, 需要在模型输入界面中输入作物的生理及物候参数, 即最大产量、积温、需水量、固氮能力值、(根、茎、叶以及籽粒)生物量和 C/N 值。模型通过每日作物生长量和 C/N 值来计算作物对氮的需求量, 土壤中氮和水的供给能力决定着作物实际氮吸收量。作物收割后, 其残留在土壤中的根、秸秆等凋落物成为土壤有机质的主要来源, 使土壤与植物耦合成一个互相反馈的生物地球化学循环系统。气候、土壤、植被和人类活动这四个基本的生态因子驱动着 DNDC 模型的运行。从模型结构图(图 1)可以看出, DNDC 的日冻融循环过程比较简单, 且缺乏在中国冰冻圈的验证。因此, 开发 DNDC 模型针对高寒生态系统冻融过程的模块非常有必要。

2 DNDC 模型的验证和校正

模型的验证是利用模拟结果和实际观测数据进行对比分析, 量化实测数据与模拟结果之间的差异。量化两者之间的差异可以采用的指标有均方根误差(RMSE)、(相对)平均偏差(RMD)、模型效率值(ME)和决定系数(R^2)^[50]。RMSE 用来判断观测值与模拟值之间的一致性; RMD 用来评价模型的系统偏差; ME 是相对于观测数据平均值而言的模拟值与观测值的吻合程度, ME 为正值表示模拟结果比观测值的平均值更接近真实值, ME 为负值表示模拟结果对数据的描述比观测值的均值还差, ME 等于 1 表示模拟结果与观测结果完全吻合; R^2 用来评价模拟值与观测值在动态上的吻合程度。其公式为

$$RMSE = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$RMD = \frac{100}{\bar{O}} \sum_{i=1}^n \frac{P_i - O_i}{n} \quad (2)$$

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

式中: O_i 为第 i 个观测值; P_i 为第 i 个模拟值; \bar{O} 为所

有观测值的平均值; n 为观测或模拟的次数。

Cui 等^[50]在山西永济董村农场利用土壤温度、湿度、作物产量以及 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、NO 等观测数据对 DNDC 模型(9.5 版本)进行了验证, 其 5 cm 深处土壤层日平均温度模拟值与实测值的 R^2 为 0.97, RMSE、RMD 以及 ME 分别为 0.1、0.01 和 0.98。同时, 模拟了管理实践对生态系统中作物产量、NO 排放、硝酸盐淋溶、 NH_3 挥发(图 3)和温室气体净排放等目标变量的影响, 表明模拟结果与观测结果具有较好的一致性。Nie 等^[51]对黑龙江省水稻田 CH_4 排放通量进行了模拟验证, 模拟值与观测值的 R^2 、RMSE 以及 ME 分别为 0.89、0.35 和 0.87, 表明该模型能很好地模拟和预测 CH_4 通量的季节变化。但目前 DNDC 模型在高寒生态系统的验证实验较少, 对于高寒生态系统碳氮循环模拟研究, 还需进一步优化模型结构。

由于不同地区气候、地形、土壤、植被等环境因素差异较大, 可能会导致模型模拟结果与观测结果之间存在较大偏差, 需要对模型进行校正。模型校正包括两方面: 补充模型缺失模块和修改模型缺省参数。一般来说获得模型源代码比较困难, 使得模型缺失模块补充难以实现, 因此目前对模型的校正主要集中在修改模型缺省参数方面。靳帅等^[52]采用试错法对 DNDC 模型中铵态氮、土壤孔隙度、初始硝态氮、田间持水量等参数进行了校正, 校正后的模型可以更准确地模拟土壤性质, 同时也提高了玉米生长期 N_2O 排放的模拟精度。秦发倡等^[53]采用贝叶斯推断法对模型参数进行了校正, 表明当不能判断模型输入参数质量时, 利用贝叶斯推断和 MCMC 方法能够有效地自动校正模型输入参数以及实现对 SOC 模拟结果不确定性的定量评价。针对高寒生态系统复杂的生物地球化学过程, 需考虑冻融过程、积雪、多年活动层厚度变化等因素对模型参数校正的影响, 结合野外观测数据, 采用自旋向上的反向优化法^[40]对模型关键参数(如土壤温湿度)进行校正。

3 DNDC 模型在不同尺度上的应用

3.1 点位尺度

DNDC 模型基于点位空间尺度发展, 且依靠点位尺度获得的观测数据驱动模型运行, 进行模型验证和校正。目前, 利用 DNDC 模型在生态系统服务功能的研究与应用方面做了许多工作, 如温室气体

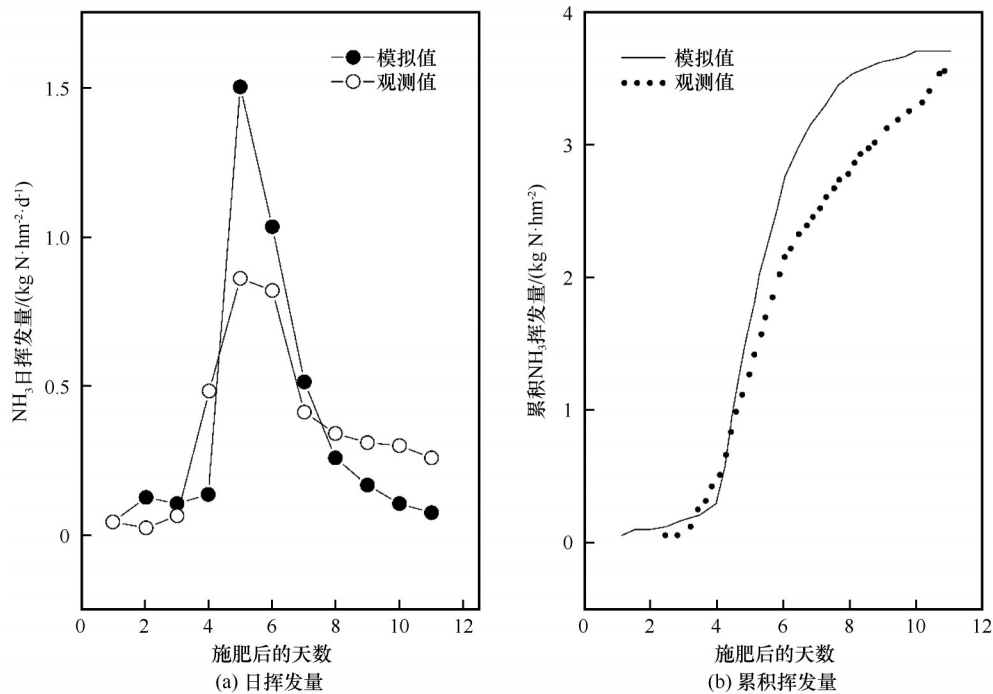


图3 2008年7月小麦-玉米地施肥事件后NH₃日挥发量和累积挥发量的模拟与观测(据文献[50]改绘)

Fig. 3 Observed and simulated daily (a) and cumulative (b) ammonium volatilization due to one fertilizer application event in the wheat-maize field during July of 2008 (modified from Reference [50])

排放通量计算、作物产量预测、土壤固碳潜力评价、营养元素流失评估、同位素模拟等。表2是DNDC模型在点位尺度上的应用情况，目前DNDC模型在高寒生态系统的验证研究较少。

表2 DNDC模型在点位尺度上的应用

Table 2 Application of DNDC model in point scale

生态系统	验证	地点	文献来源
高寒草甸	N ₂ O	中国中科院海北高寒草甸研究站	[54]
牧场	N ₂ O	爱尔兰野外实验点	[55]
高寒湿地	碳收支	中国若尔盖国家湿地自然保护区	[56]
草甸和荒漠草原	碳收支	中国内蒙古高原实验点	[57]
冬小麦-夏玉米地	氨挥发	中国北京、河南、河北、四川、山西	[58]
冬小麦地	氨挥发	英国的一个实验农场	[59]
草地	活性氮	奥地利阿尔卑斯山的一个实验地	[60]
玉米-大豆-冬小麦-苜蓿地	产量	加拿大的两个农场	[61]
冬小麦-夏玉米地	产量	中国河北省衡水市野外实验地	[62]
高寒草甸	SOC	中国甘肃省抓喜秀龙草原	[63]
高粱地	SOC	美国得克萨斯州的一个实验农场	[64]
泥炭地	CH ₄	瑞典北部Stordalen实验站	[65]

(1) 温室气体、碳收支和NH₃

Du等^[54]利用中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站2004年和2005年野外观测N₂O通量数据,对DNDC模型进行了参数化和验证。结果表明:①青藏高原矮嵩草高寒草甸N₂O通量对SOC、pH和温度敏感,对降水、土壤铵态氮和硝态氮含量的变化不敏感;②在春季或秋季的某些时段内模型

未能捕捉到N₂O通量,但对N₂O通量季节变化和年总排放量的模拟效果总体较好。Abdalla等^[55]测试了DayCent模型和DNDC模型对N₂O通量的模拟效果,并评估了气候变化对牧场温室气体通量和生物量生产的影响。结果表明,DayCent模拟的N₂O通量比DNDC模拟的精度更高,DNDC高估了N₂O通量,这可能是由于高估了SOC的影响。Kang等^[56]

利用实测碳通量数据对 DNDC 模型进行了验证,并对青藏高原高寒湿地生态系统碳收支分量进行了模拟和定量分离。结果表明,青藏高原高寒湿地生态系统具有明显碳汇特征;植物净初级生产力占总初级生产力的 53%,植物自养呼吸占生态系统呼吸的 61%,土壤异养呼吸占土壤呼吸的 51%;且在生长高峰期,植被具有最强的光合作用和净碳封存能力。Wu 等^[57]调整了 DNDC 模型中与植物生长相关的一系列参数(最大生物量产量、植物组织碳氮比和基于局部观测的生长积温),并利用 DNDC 模型模拟了内蒙古草甸和荒漠草原的碳收支潜力。结果表明,在未来 30 年里,如果当地气候变得更加湿润,草甸和荒漠草原就会起到吸收碳的作用,增加碳封存的潜力;而当地气候变得干燥时,草甸和荒漠草原会减少碳的吸收,且都将作为碳源向大气中释放 CO₂。

氨挥发是农田氮素损失的重要途径。Li 等^[58]利用改良的 DNDC 模型,模拟了人工合成肥料的应用对石灰性土壤氨挥发的影响。与原 DNDC 模型相比,虽然改进后的模型对于添加合成氮肥后土壤 NH₃挥发的模拟效果较好,但是仍然会高估或者低估轻质土壤中尿素深度分布、灌溉、降水、碳酸氢铵施用等情况下 NH₃的挥发量。可见, DNDC 模型对土壤深度因子的参数化还不够,不能很好地反映氮肥对土壤 NH₃挥发的调控作用,而灌溉和降水的复杂作用对 DNDC 模拟 NH₃挥发仍是一个相当大的挑战。Dubache 等^[59]用修改后的 DNDC 模型 DNDC95_NH₃模拟了英国冬季谷物田施用尿素后的氨挥发。与 DNDC95 相比, DNDC95_NH₃在模拟累积氨挥发和日氨通量方面的性能更好。Schroeck 等^[60]探讨了奥地利阿尔卑斯山耕地和草地土壤活性氮的动态变化,且重点建立了一个完整的 N 预算,模拟结果表明硝酸盐、NH₃、N₂O、NO 或分子 N₂的排放与总体预算一致,从而验证了模型的可靠性。

(2) 作物产量

Jarecki 等^[61]利用加拿大两个农场(Elora 和 Woodslee)长期观测数据,对不同轮作下玉米产量的变化趋势进行了模拟。Elora 农场有五种轮作方式:玉米单作(CC)、玉米-玉米-大豆-大豆(CCSS)、玉米-玉米-大豆-冬小麦(CCSW)、CCSW+红三叶草(CCSW+RC)、玉米-玉米-苜蓿-苜蓿(CCAA)。Woodslee 农场有两种轮作方

式:玉米单作(CC)和玉米-燕麦-紫花苜蓿-紫花苜蓿(COAA)。模拟结果显示,CCSW、CCSW+RC、CCAA、COAA 这四种轮作方式有利于提高玉米产量;CCSW、CCSW+RC、CCAA 这三种轮作方式的玉米产量增加趋势较缓,CC 和 CCS 轮作方式的玉米产量无明显增加趋势;总的来说,轮作玉米的产量高于玉米单作的产量。Zhang 等^[62]利用 DNDC 模型模拟了冬小麦-夏玉米轮作系统中秸秆还田长期间断施肥和连续施肥对作物产量的影响。模拟结果表明, DNDC 模型可以有效预测衡水地区不连续施肥条件下的作物产量,增加施肥量对作物增产的影响大于增加秸秆掺量对作物增产的影响,通过优化施肥量与秸秆掺量的比例,可以达到高产稳产、提高土壤肥力的目的。

(3) 土壤有机碳

王多斌等^[63]利用 DNDC 模型模拟气候变化和放牧对青藏高原高寒草甸土壤有机碳含量的影响,并评估了气候变化和放牧对土壤有机碳含量变化的贡献率。结果显示,气候变化对土壤有机碳产生负面影响,放牧强度通过增加践踏、落叶和粪便返还影响土壤有机碳含量;气候变解释释了土壤有机碳变化的 61.9%,而放牧强度解释了其变化的 1.6%。Dou 等^[64]利用 DNDC 模型评估了不同秸秆还田率对高粱地 SOC 的影响(图 4),长期(50 年)预测显示,在不同的秸秆还田处理下, SOC 含量随着

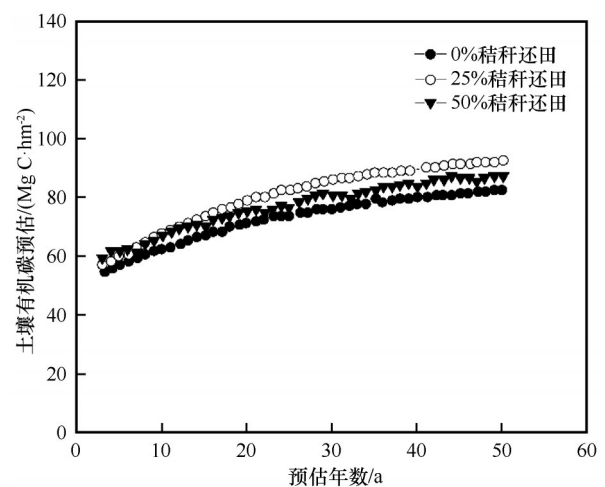


图 4 模拟预测未来 50 年不同秸秆还田率对 50 cm 表层土壤有机碳的影响(美国得克萨斯州实验农场,据文献[64]改绘)

Fig. 4 Simulated soil organic carbon variation in a 50 a period for the surface 50 cm soil as affected by different straw return ratios at College Station, Texas, USA (modified from Reference [64])

时间的推移而增加,对高粱的田间管理措施将持续增加土壤的固碳量。

(4) 同位素分馏

DNDC模型在生态系统中的同位素模拟,主要侧重于对稳定同位素分馏作用的模拟,其作用是为温室气体的产生过程提供普通测试分析不能提供的科学依据。Deng等^[65]用改良后的DNDC模型在瑞典北部Stordalen实验站进行了同位素模拟工作,为了改进对CH₄转化的预测,将醋酸盐及与CH₄循环相关的稳定碳同位素纳入到DNDC模型中。改良后的DNDC模型针对性地模拟了两种不同途径对CH₄产生的相对贡献,并预测了土壤C库和排放气体中的 $\delta^{13}\text{C}$,该模型能更好地约束和检验微生物机制,并为预测泥炭地CH₄循环打下了坚实的基础。

3.2 区域尺度

为回答区域、国家或全球尺度的问题,将在点位观测基础上发展的模型应用于更大空间范围是不可避免的。要实现区域模拟,DNDC模型需要从提前建立的GIS数据库(气象数据库、作物数据库、土壤数据库)以及7个GIS文件(地理位置、气象台站标号、土壤特性、作物种类、农田管理等)中读取全部区域输入信息。一个区域被划分成许多小单元,每个小单元里有自己特定的气象、作物和土壤管理数据,模型先对所有小单元逐一模拟,最后把每个单元模拟结果累加得到区域模拟的结果。表3是DNDC模型在区域尺度上的应用情况,目前在高

表3 DNDC模型在区域尺度上的应用

Table 3 Application of DNDC model in regional scale

生态系统	验证	地区	文献来源
豆类-谷物地	N ₂ O	澳大利亚北领地	[66]
水稻-小麦地	N ₂ O、CH ₄	中国南方稻麦轮作区	[67]
农田	CO ₂	加拿大	[68]
农田	产量	中国	[69]
高寒草甸、高寒湿地	植物生产力	中国若尔盖高原	[70]
高寒草甸、高寒草原	SOC	中国青海省	[71]
农田	SOC	中国	[72]
冬小麦-玉米地	硝态氮淋溶	中国华北地区	[73]
玉米地	硝酸盐淋溶	中国华北平原	[74]

寒生态系统的应用研究依然较少。

(1) 温室气体

Ma等^[66]模拟了未来气候变化情景下,澳大利亚北部谷类地区豆类-谷物轮作模式的N₂O排放情况。研究表明,豆类轮作作物降低了基于产量的N₂O排放速率,可以节省25%产量比例的N₂O排放。Nie等^[51]用2017年黑龙江省稻田CH₄通量实测数据验证了DNDC模型模拟结果,同实测值吻合度较高(图5)。CH₄通量时空变化显示:1960-2015年CH₄平均通量为145.56 kg C·hm⁻²,气候趋势为11.88 kg C·hm⁻²·(10a)⁻¹;CH₄通量由西向东呈下降趋势,北部和西部的气候趋势较大;大气CO₂浓度和温度通过改变SOC含量和植物生物量影响CH₄通量。Wang等^[67]模拟了中国南方稻麦轮作系统不同管理方式下N₂O和CH₄的排放,模拟结果表明秸

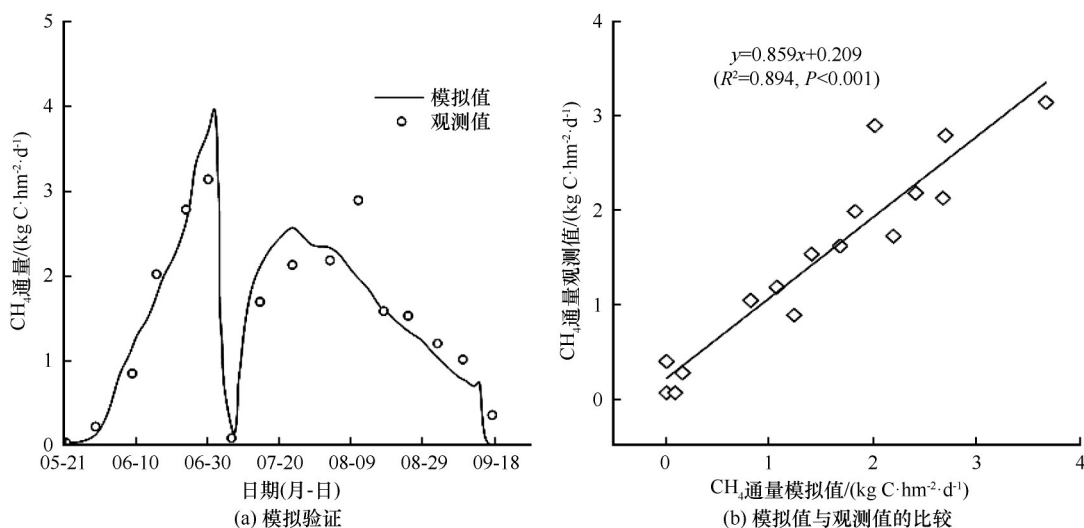


图5 验证实验中模型模拟值与CH₄观测值的比较(据文献[51]改绘)

Fig. 5 Variation of simulated and observed CH₄ fluxes in the validated experiment (a) and their relation (b) (modified from Reference [51])

秆还田显著增加了 CH_4 的排放量, 施用高无机氮肥会增加 N_2O 的排放量, 而施用肥料改良剂和低无机氮肥则降低了 N_2O 的排放量。Yadav 等^[68]模拟了加拿大农田土壤的 CO_2 排放, 预测结果表明随着化肥和灌溉量减少, CO_2 排放量将减少, 每年 CO_2 排放量分别减少 13% 和 1%。

(2) 作物产量及植物生产力

Yu 等^[69]利用 DNDC 模型对中国 1955 – 2014 年的作物产量进行模拟, 得出国内粮食产量从 1955 年的 132×10^6 t 增加到 2014 年的 607×10^6 t, 现有农作物产量的 45% 由氮化肥支持。为保证大部分地区的粮食产量不受影响且将所有省份氮排放降到安全范围内, 需要将氮循环率提高到 87%。Wang 等^[70]将 DNDC 模型与时间序列遥感数据相结合, 探讨了放牧对草地地上净初级生产力的影响。研究发现放牧强度和放牧周期越低(短), 草本湿地和高寒草甸的地上净初级生产力越低; 结合时间序列的遥感数据和基于过程的生态系统模型可提供高分辨率的区域放牧强度和放牧周期数据, 监控放牧强度的空间变化, 识别草场类型, 模拟放牧条件下草地地上净初级生产力的时空变化。

(3) 土壤有机碳和硝酸盐

Zhang 等^[71]利用 DNDC 模型研究了不同气候变化和放牧管理情景下青海省草地 SOC 动态。研究发现, 相对于放牧强度, 气候变化可能是导致草地 SOC 波动的主要因素, 它可以解释 47.7% 的 SOC 变异, 而放牧强度只能解释 2.3%。模型预测在 RCP4.5 和 RCP8.5 未来气候变化情境下, 研究区平均 SOC 显著降低, SOC 变化率由南向北呈下降趋势; SOC 模拟值与实测值吻合度较高 (R^2 为 0.73)。Tang 等^[72]模拟了 2003 年中国农田土壤有机碳储量, 发现 2003 年 1.18×10^8 hm^2 的中国耕地 0~30 cm 土层 SOC 存储量为 4.95 Pg C, 其中东北地区 SOC 储量占全国总量的 1/4 左右, 主要原因是其土壤有机质含量较高。

Li 等^[73]利用改进后的 DNDC 模型对 2009 年华北地区耕地硝态氮淋溶进行模拟后发现, 与原始 DNDC 模型相比, 修正后的 DNDC 在模拟土壤水分和氮淋失方面取得了较好的效果。华北地区农田硝态氮总潜在淋失量为每年 1.5~2.15 Tg N, 平均为 1.8 Tg N, 相当于该地区 2009 年氮肥施用总量的 26.1%。Zhang 等^[74]模拟了华北平原硝酸盐淋溶量, 并根据该地区作物的可接受产量和硝态氮淋溶

量来确定临界施氮量, 结果表明硝酸盐淋溶量随施氮量的增加而增加, 模拟的最佳施氮率在 150~240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 为国内其他耕作地区确定最佳施氮率提供了有价值的参考。

4 模型的不足之处

4.1 模拟结果不准确

生态系统中各环境因子之间存在交互作用且关系复杂, 然而模型本身科学结构具有不完善性, 许多公式计算出的中间变量与输入参数仅呈单一性相关, 由此导致模型出现高估或低估真实值的情况。在点位尺度上, 谢军飞等^[75]用 DNDC 模拟农田大豆 N_2O 排放通量生长期变化时, 低估了干旱期和休耕期 N_2O 排放通量, 主要原因是模型对干旱期和休耕期 N_2O 排放的反应灵敏度不足。勾继等^[76]模拟的华东地区稻麦轮作农田 N_2O 排放总量低于实测值, 其主要原因可能是模型低估了反硝化作用的 N_2O 排放量。在区域尺度上, Xuri 等^[77]把研究面积从 1 km^2 尺度升到 11 856 km^2 时, 其模拟的区域尺度 N_2O 排放量比实测值高 64%。

4.2 涉及生态系统类型有限

虽然 DNDC 模型能模拟多种生态系统, 但目前对 DNDC 模型在高寒生态系统的验证却鲜有报道, DNDC 模型中日冻融循环过程较简单且未考虑到多年冻土活动层厚度变化对土壤温室气体排放的影响。冻融作用能改变土壤的物理性状以及土壤微生物量和活性, 造成植物根系死亡, 影响土壤养分以及土壤矿化作用; 多年冻土活动层厚度的变化是地气交换的主要过程, 影响着冻土区生态系统物理、生物及地球化学过程, 随着活动层厚度增加, 储藏在多年冻土中的老碳以温室气体形式逐步释放到大气中, 进一步影响局域甚至全球气候变化^[25]。在全球气候变暖背景下, 多年冻土退化严重^[78], 由此引发的温室气体排放及气候效应问题备受关注。然而, DNDC 模型在高寒生态系统中的模拟验证依然较少, 开发新的模块或者准确找到需要校正的参数是难点。

5 研究展望

仅靠有限的观测数据和简单的相关分析, 很难揭示高寒生态系统碳氮循环过程的控制机制, 而将 DNDC 模型应用于高寒生态系统, 不仅有助于定量理解过去、现在和未来高寒生态系统碳氮循环的动

态变化,且有助于提供一个更客观的减缓和适应气候变化的措施。目前DNDC模型耦合的日冻融循环过程较简单,在高寒生态系统的验证与应用较少。只有通过系统地研究生物地球化学循环过程,优化模型结构,才能准确揭示气候变化背景下高寒生态系统土壤碳氮释放机理,进而为碳氮循环研究及高寒生态系统土壤温室气体排放预测提供科学依据。鉴于此,对未来DNDC模型在高寒生态系统的应用提出如下建议:

(1) 数据收集

结合涡度相关通量技术,获取大范围、长时间的日尺度野外监测数据。无论点位尺度还是区域尺度模拟,最终都需要大量实测数据验证模型的可信度。为降低模拟结果的不确定性,首先应提高输入数据(气候、土壤、植被以及人类活动)的准确性,其次需控制和评估涡度相关通量数据的质量,尤其对夜间 CO_2 通量进行校正,避免高估生态系统净交换量(NEE),最后要提高模型对土壤水氮运移等过程的模拟能力。高寒生态系统中土壤水热状况、植被和水文的复杂作用,使其生物地球化学过程较其他生态系统更复杂。因此,在高寒生态系统还需考虑冻融过程、积雪、多年活动层厚度变化等因素对模型参数校正的影响,为模型参数校正提供数据支撑,且需合理利用试错法、贝叶斯推断法和自旋向上的反向优化法。鉴于此,应结合当前技术手段和研究成果,对模型的关键参数(氮沉降、土壤温湿度、土壤有机质含量、土壤容重、pH值、生物量等)开展长期系统监测。

(2) 模型结构优化

完善DNDC模型的科学结构并将其应用于高寒生态系统,是当前研究高寒区碳氮循环和可持续发展的重要方向。将DNDC模型应用于高寒生态系统,模拟其SOC动态变化、生物量、温室气体排放、营养元素收支平衡等,需将日冻融循环过程和活动层厚度变化耦合到DNDC模型土壤气候子模块中。模拟高寒生态系统,还需要考虑积雪对土壤水热动态的影响,需将积雪整合进土壤气候子模块中,由能量平衡和地热通量分别决定其上边界条件(地面或者雪面)和下边界条件,并根据能量守恒原理,确定土壤的融化和冻结,以及冰和水组分的相关变化。当前,对高寒生态系统温室气体排放的研究还不够完善,许多模型只能预测温室气体总量而未能区分 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 ,而DNDC模型不但能预

测温室气体总量而且能区分 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 ,并能模拟出温室气体日排放量。DNDC模型结构优化后,将有利于进一步研究冻融作用对土壤碳氮释放及高寒生态系统的影响机理。

(3) 多尺度综合研究

高寒生态系统碳氮循环研究多停留在点位尺度,由点位尺度扩展到区域尺度,将面临时空尺度转换问题。因此,需要注重点位尺度模型的发展,同时开发新的升级策略对区域尺度模型进行整合,通过尺度升级与转换,最终实现多尺度综合研究。

参考文献(References):

- [1] Stocker T F, Qin Dahe, Plattner G-K, et al. Climate change 2013: the physical science basis: contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Solomon S, Qin Dahe, Manning M, et al. Climate change 2007: the physical science basis: contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Smith P, Martino D, Cai Zucong, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2007, 118(1/2/3/4): 6–28.
- [4] Smith P, Martino D, Cai Zucong, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2008, 363(1492): 789–813.
- [5] United States Environmental Protection Agency. Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks: 1990–1994 [M]. Washington, D. C.: United States Environmental Protection Agency, 1995.
- [6] Shepherd A, Wu Lianhai, Chadwick D, et al. A review of quantitative tools for assessing the diffuse pollution response to farmer adaptations and mitigation methods under climate change [J]. Advances in Agronomy, 2011, 112: 1–54.
- [7] Williams E J, Hutchinson G L, Fehsenfeld F C. NO_x and N_2O emissions from soil [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1992, 6(4): 351–388.
- [8] Li Hu, Wang Ligang, Li Jianzheng, et al. The development of China-DNDC and review of its applications for sustaining Chinese agriculture [J]. Ecological Modelling, 2017, 348: 1–13.
- [9] Zhang Yu, Li Changsheng, Zhou Xiujie, et al. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture [J]. Ecological Modelling, 2002, 151(1): 75–108.
- [10] Beheydt D. Nitrous oxide emission from agricultural soils: experimental approach and simulation [D]. Ghent, Belgium: Ghent University, 2006: 121–136.
- [11] Fumoto T, Kobayashi K, Li Changsheng, et al. Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes [J]. Global Change Biology, 2007, 14(2): 382–402.
- [12] Li Changsheng, Aber J, Stange F, et al. A process-oriented model of N_2O and NO emissions from forest soils: 1. model de-

- velopment[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D4): 4369 – 4384.
- [13] Li Changsheng, Trettin C, Sun Ge, et al. Modeling carbon and nitrogen biogeochemistry in forest ecosystems [C]// *Proceedings of the 3rd International Nitrogen Conference*. Nanjing: Science Press, 2005: 893 – 898.
- [14] Kiese R, Li Changsheng, Hilbert D W, et al. Regional application of PnET-N-DNDC for estimating the N₂O source strength of tropical rainforests in the wet tropics of Australia[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(1): 128 – 144.
- [15] Haas E, Klatt S, Fröhlich A, et al. LandscapeDNDC: a process model for simulation of biosphere-atmosphere-hydrosphere exchange processes at site and regional scale [J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(4): 615 – 636.
- [16] Zhang Yu, Li Changsheng, Trettin C C, et al. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems[J/OL]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4) [2019-09-26]. <https://doi.org/10.1029/2001GB001838>.
- [17] Li Changsheng, Salas W, Zhang Ruihong, et al. Manure-DNDC: a biogeochemical process model for quantifying greenhouse gas and ammonia emissions from livestock manure systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93(2): 163 – 200.
- [18] Wu Qingbai, Cheng Guodong, Ma Wei. Impact of permafrost change on the Qinghai-Tibet Railroad engineering [J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2004, 47(1): 122 – 130. [吴青柏, 程国栋, 马巍. 多年冻土变化对青藏铁路工程的影响[J]. *中国科学: D辑 地球科学*, 2003, 33(1): 115 – 122.]
- [19] Walker D A, Jia G J, Epstein H E, et al. Vegetation-soil-thaw-depth relationships along a low-arctic bioclimate gradient, Alaska: synthesis of information from the ATLAS studies [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, 14(2): 103 – 123.
- [20] Potter C. Predicting climate change effects on vegetation, soil thermal dynamics, and carbon cycling in ecosystems of interior Alaska[J]. *Ecological Modelling*, 2004, 175(1): 1 – 24.
- [21] Zhao Lin, Chen Guichen, Cheng Guodong, et al. Permafrost: status, variation and impacts [M]// *Mountain geocology and sustainable development of the Tibetan Plateau*. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 2000: 113 – 137.
- [22] Wang Xuejia, Yang Meixue, Wan Guoning. Processes of soil thawing-freezing and features of ground temperature and moisture at D105 on the northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 56 – 63. [王学佳, 杨梅学, 万国宁. 藏北高原D105点土壤冻融状况与温湿特征分析[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 56 – 63.]
- [23] Wang Yibo, Wang Genxu, Cheng Yufei, et al. Response of typical high cold frozen soil to change of the high cold ecosystem on Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 633 – 641. [王一博, 王根绪, 程玉菲, 等. 青藏高原典型寒冻土壤对高寒生态系统变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 633 – 641.]
- [24] Wang Genxu, Li Yuanshou, Wang Yibo, et al. Impacts of alpine ecosystem and climate changes on surface runoff in the headwaters of the Yangtze River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(2): 159 – 168. [王根绪, 李元寿, 王一博, 等. 长江源区高寒生态与气候变化对河流径流过程的影响分析[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(2): 159 – 168.]
- [25] Plaza C, Pegoraro E, Bracho R, et al. Direct observation of permafrost degradation and rapid soil carbon loss in tundra[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(8): 627 – 631.
- [26] Ni Jie, Wu Tonghua, Zhao Lin, et al. Carbon cycle in circum-Arctic permafrost regions: progress and prospects [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(4): 845 – 857. [倪杰, 吴通华, 赵林, 等. 环北极多年冻土区碳循环研究进展与展望[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(4): 845 – 857.]
- [27] Cao Mingkui, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change [J]. *Nature*, 1998, 393(6682): 249 – 252.
- [28] Dutta B, Smith W N, Grant B B, et al. Model development in DNDC for the prediction of evapotranspiration and water use in temperate field cropping systems [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2016, 80: 9 – 25.
- [29] Gilhespy S L, Anthony S, Cardenas L, et al. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): model evolution [J]. *Ecological Modelling*, 2014, 292: 51 – 62.
- [30] Li Changsheng, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. model structure and sensitivity [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97(D9): 9759 – 9776.
- [31] Li Changsheng, Frolking S, Harriss R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(3): 237 – 254.
- [32] Brown L, Syed B, Jarvis S C, et al. Development and application of a mechanistic model to estimate emission of nitrous oxide from UK agriculture [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(6): 917 – 928.
- [33] Saggat S, Andrew R M, Tate K R, et al. Modelling nitrous oxide emissions from dairy-grazed pastures [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 68(3): 243 – 255.
- [34] Leip A, Marchi G, Koeble R, et al. Linking an economic model for European agriculture with a mechanistic model to estimate nitrogen losses from cropland soil in Europe [J]. *Biogeosciences*, 2008, 5: 73 – 94.
- [35] Kröbel R, Smith W, Grant B, et al. Development and evaluation of a new Canadian spring wheat sub-model for DNDC [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91(4): 503 – 520.
- [36] Zhang Yu, Sachs T, Li Changsheng, et al. Upscaling methane fluxes from closed chambers to eddy covariance based on a permafrost biogeochemistry integrated model [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(4): 1428 – 1440.
- [37] Zhao Zheng, Zhang Hanlin, Li Changsheng, et al. Quantifying nitrogen loading from a paddy field in Shanghai, China with modified DNDC model [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 197: 212 – 221.
- [38] Dutta B, Grant B B, Congreves K A, et al. Characterising effects of management practices, snow cover, and soil texture on soil temperature: model development in DNDC [J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 168: 54 – 72.
- [39] Shen Jiacheng, Treu R, Wang Junye, et al. Modeling growing season and annual cumulative nitrous oxide emissions and emission factors from organically fertilized soils planted with barley in Lethbridge, Alberta, Canada [J/OL]. *Agricultural Systems*, 2019, 176 [2019-09-26]. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102654>.
- [40] Cui Guotao, Wang Junye. Improving the DNDC biogeochemistry model to simulate soil temperature and emissions of nitrous oxide and carbon dioxide in cold regions [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 687: 61 – 70.
- [41] Wang Yang, Liu Jingshuang, Wang Guoping. Study on the effect of freezing and thawing action to soil physical and chemical characteristics [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(2): 91 – 96. [王洋, 刘景双, 王国平. 冻融作用与

- 土壤理化效应的关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(2): 91–96.]
- [42] Warrach K, Mengelkamp H T, Raschke E. Treatment of frozen soil and snow cover in the land surface model SEWAB[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2001, 69(1/2): 23–37.
- [43] Hirota M, Tang Yanhong, Hu Qiwei, et al. Methane emissions from different vegetation zones in a Qinghai-Tibetan Plateau wetland[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(5): 737–748.
- [44] Moore R D, Fleming S W, Menounos B, et al. Glacier change in western North America: influences on hydrology, geomorphic hazards and water quality [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(1): 42–61.
- [45] Li Changsheng. Biogeochemistry: scientific fundamentals and modeling approach [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. [李长生. 生物地球化学: 科学基础与模型方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.]
- [46] Li Changsheng. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems [M]// Methane emissions from major rice ecosystems in Asia. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 2000: 259–276.
- [47] Li Changsheng. Quantifying greenhouse gas emissions from soils: scientific basis and modeling approach[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(4): 344–352.
- [48] Zhang Yajie, Niu Haishan. The development of the DNDC plant growth sub-model and the application of DNDC in agriculture: a review[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 230: 271–282.
- [49] Penning de Vries F W T, Jansen D M, ten Berge H F M, et al. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops [M]. Wageningen, the Netherlands: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1989.
- [50] Cui Feng, Zheng Xunhua, Liu Chunyan, et al. Assessing biogeochemical effects and best management practice for a wheat-maize cropping system using the DNDC model[J]. Biogeosciences, 2014, 11: 91–107.
- [51] Nie Tangzhe, Zhang Zhongxue, Qi Zhijuan, et al. Characterizing spatiotemporal dynamics of CH_4 fluxes from rice paddies of cold region in Heilongjiang Province under climate change [J/OL]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(5) [2019-09-26]. <http://www.mdpi.com/1660-4601/16/5/692/pdf>.
- [52] Jin Shuai, Shi Yonghui, Ye Guixiang, et al. Study on coupling effect of straw returning and nitrogen fertilizer on N_2O emission in summer corn field based on DNDC model[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, 48(2): 68–73. [靳帅, 史永晖, 叶桂香, 等. 基于DNDC模型的秸秆还田量与氮肥的耦合效应对夏玉米农田 N_2O 排放的影响研究[J]. 山东农业科学, 2016, 48(2): 68–73.]
- [53] Qin Falü, Zhao Yongcun, Shi Xuezheng, et al. Input parameters calibration and uncertainty estimation of the DNDC model based on Bayesian inference [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2): 247–254. [秦发磊, 赵永存, 史学正, 等. 基于贝叶斯推断的DNDC模型参数校正与不确定性评价研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 247–254.]
- [54] Du Yangong, Cui Xiaoyong, Cao Guangmin, et al. Simulating N_2O emission from *Kobresia humilis* Serg. alpine meadow on Tibetan Plateau with the DNDC model[J]. Polish Journal of Ecology, 2011, 59(3): 443–453.
- [55] Abdalla M, Jones M, Yeluripati J, et al. Testing DayCent and DNDC model simulations of N_2O fluxes and assessing the impacts of climate change on the gas flux and biomass production from a humid pasture[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(25): 2961–2970.
- [56] Kang Xiaoming, Li Yong, Wang Jinzhi, et al. Precipitation and temperature regulate the carbon allocation process in alpine wetlands: quantitative simulation[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20: 3300–3315.
- [57] Wu Xuan, Kang Xiaoming, Liu Wenjun, et al. Using the DNDC model to simulate the potential of carbon budget in the meadow and desert steppes in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(1): 63–75.
- [58] Li Siqu, Zheng Xunhua, Zhang Wei, et al. Modeling ammonia volatilization following the application of synthetic fertilizers to cultivated uplands with calcareous soils using an improved DNDC biogeochemistry model[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 931–946.
- [59] Dubache G, Li Siqu, Zheng Xunhua, et al. Modeling ammonia volatilization following urea application to winter cereal fields in the United Kingdom by a revised biogeochemical model[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 1403–1418.
- [60] Schroeck A M, Gaube V, Haas E, et al. Estimating nitrogen flows of agricultural soils at a landscape level: a modelling study of the Upper Enns Valley, a long-term socio-ecological research region in Austria[J]. Science of the Total Environment, 2019, 665: 275–289.
- [61] Jarecki M, Grant B, Smith W, et al. Long-term trends in corn yields and soil carbon under diversified crop rotations[J]. Journal of Environment Quality, 2018, 47: 635–643.
- [62] Zhang Jing, Hu Kelin, Li Kejiang, et al. Simulating the effects of long-term discontinuous and continuous fertilization with straw return on crop yields and soil organic carbon dynamics using the DNDC model[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165: 302–314.
- [63] Wang Duobin, Ji Changting, Lin Huilong. A ‘denitrification-decomposition’ (DNDC) model evaluation of alpine meadow soil carbon response to climate change[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(12): 197–204. [王多斌, 籍常婷, 林慧龙. 基于DNDC模型的高寒草甸土壤有机碳含量动态研究[J]. 草业学报, 2019, 28(12): 197–204.]
- [64] Dou Fugen, Wight J P, Wilson L T, et al. Simulation of biomass yield and soil organic carbon under bioenergy sorghum production[J/OL]. PLOS ONE, 2014, 9(12) [2019-09-26]. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0115598>.
- [65] Deng Jia, McCalley C K, Frolking S, et al. Adding stable carbon isotopes improves model representation of the role of microbial communities in peatland methane cycling [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2017, 9(2): 1412–1430.
- [66] Ma Yuchun, Schwenke G, Sun Liying, et al. Modeling the impact of crop rotation with legume on nitrous oxide emissions from rain-fed agricultural systems in Australia under alternative future climate scenarios[J]. Science of the Total Environment, 2018, 630: 1544–1552.
- [67] Wang Jinyang, Zhang Xiaolin, Liu Yinglie, et al. Modeling impacts of alternative practices on net global warming potential and greenhouse gas intensity from rice-wheat annual rotation in China[J/OL]. PLOS ONE, 2012, 7(9) [2019-09-26]. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0045668>.
- [68] Yadav D, Wang Junye. Modelling carbon dioxide emissions

- from agricultural soils in Canada[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 230: 1040 – 1049.
- [69] Yu Chaoqing, Huang Xiao, Chen Han, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. *Nature*, 2019, 567 (7749): 516 – 520.
- [70] Wang Jiyan, Li Ainong, Bian Jinhu, et al. Simulation of the grazing effects on grassland aboveground net primary production using DNDC model combined with time-series remote sensing data: a case study in Zoige Plateau, China[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(3): 168 – 187.
- [71] Zhang Wenjuan, Zhang Feng, Qi Jianguo, 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.
- [72] Tang Huajun, Qiu Jianjun, Li Hu, et al. Modeling soil organic carbon storage and its dynamics in croplands of China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(5): 704 – 712.
- [73] Li Hu, Wang Ligang, Qiu Jianjun, et al. Calibration of DNDC model for nitrate leaching from an intensively cultivated region of northern China[J]. *Geoderma*, 2014, 223: 108 – 118.
- [74] Zhang Yitao, Wang Hongyuan, Liu Shen, et al. Identifying critical nitrogen application rate for maize yield and nitrate leaching in a Haplic Luvisol soil using the DNDC model[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 514: 388 – 398.
- [75] Xie Junfei, Li Yu'e. Comparative analysis on measured and DNDC (DeNitrification-DeComposition) modeled N_2O [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23(4): 691 – 695. [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.]
- [76] Gou Ji, Zheng Xunhua, Wang Mingxing, et al. A simulating study of N_2O emission from a rice-wheat rotation ecosystem in Southeast China[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 2000, 24 (6): 835 – 842. [勾继, 郑循华, 王明星, 等. 华东地区稻麦轮作农田生态系统 N_2O 排放的模拟研究[J]. *大气科学*, 2000, 24(6): 835 – 842.]
- [77] Xuri, Niu Haishan, Li Changsheng, et al. Uncertainties in up-scaling N_2O flux from field to $1^\circ \times 1^\circ$ scale: a case study for Inner Mongolian grasslands in China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(4): 633 – 643.
- [78] Luo Dongliang, Jin Huijun, Lin Lin, et al. Degradation of permafrost and cold-environments on the interior and eastern Qinghai Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(3): 538 – 546. [罗栋梁, 金会军, 林琳, 等. 青海高原中、东部多年冻土及寒区环境退化[J]. *冰川冻土*, 2012, 34 (3): 538 – 546.]

Research progress of DNDC model and its application prospect in alpine ecosystem

LIU Fang^{1,3}, WU Minghui^{1,3}, YANG Meixue¹, CHEN Shengyun^{1,2,3}

(1. Cryosphere and Eco-Environment Research Station of Shule River Headwaters, State Key Laboratory of Cryospheric Science,

Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Academy of Plateau Science and Sustainability / School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University,

Xining 810008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Denitrification-Decomposition (DNDC) model is a biogeochemical model based on the concepts of element abundance, coupling, circulation and dynamics. As a tool of solving present environmental problems based on the theory of biogeochemistry, the DNDC simulates carbon and nitrogen cycles by calculating the decomposition of organic matter in denitrification process. The aim of DNDC is to calculate the greenhouse gas emission fluxes in different pools in the target ecosystem. During more than 20 years, DNDC has become one of the most successful biogeochemical models in the world. This paper mainly described the development, scientific structure, model verification and correction of DNDC, and pointed out the shortcomings of DNDC. We put forward the application prospect of DNDC in alpine ecosystem.

Key words: DNDC model; greenhouse gas; carbon-nitrogen cycle; alpine ecosystem

(责任编辑: 牟翠翠; 编辑: 武俊杰)