1	陆地高分辨率水文-生物地球化学过程三维模型					
2	CNMM-DNDC 的研发及应用进展					
3	郑循华 ^{1,2} 李思琪 ¹ 张伟 ¹ 刘春岩 姚志生 韩圣慧 王睿 王凯 李勇 ^{1,*}					
4	1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029					
5	2 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049					
6	摘 要 CNMM-DNDC 是本文作者团队研发的陆地高分辨率水文-生物地球化学过程三维模型。本文系统					
7	介绍了建模背景和理念、核心过程和模型特点、模拟功能和观测验证、多尺度区域或流域初步应用以及					
8	来发展展望。自2018年刊发其首个版本以来,该模型经过了多方面科学过程改进和模拟功能扩展,在元素					
9	化学反应、物质相变和机械迁移等基本理化生过程层面,完成了对陆地表层系统碳氮磷水循环全耦合的精					
10	细刻画。迄今开展的观测验证表明,CNMM-DNDC 基本普适于不同生物气候带(从热带到寒区多年冻土地					
11	带)的流域或区域长时间序列"三高"(即时间、空间和过程高分辨率)综合模拟,实现对陆地生态系统					
12	的碳氮磷水三维运移、水土流失、水力驱动溶解态和颗粒态碳氮磷横向迁移、碳氮温室气体和污染气体排					
13	放、生态系统生产力、水分蒸散发和水分能量平衡等众多可持续发展目标表征变量的预测。该模型广泛推					
14	广应用于多尺度区域或流域的复杂过程虚拟科学试验研究和服务于面向生态环境建设与减污降碳的优化调					
15	控决策,可望为协同落实多个联合国可持续发展目标提供先进的数值模拟技术支撑。					
16	关键词 碳氮磷水循环全耦合模拟 水文-生物地球化学过程模型 CNMM-DNDC 联合国可持续发展目					
17						
18	文章编号					
19	doi: 10.3878/J.issn.1006-9895.2305.23314					
20						
21	Review on Development and Application of CNMM-DNDC					
22	A Three-Dimension, High-Resolution and Process-Oriented					
23	Terrestrial Hydro-Biogeochemical Model					
24	ZHENG Xunhua ^{1, 2} LI Siqi ¹ ZHANG Wei ¹ LIU Chunyan ¹ YAO Zhisheng ¹ HAN Shenghui ¹ WANG Rui ¹ WANG Kai ¹ LI Yong ^{1*}					
25	1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese					
26	Academy of Sciences, Beijing 100029					
27	2 College of Earth and Planet Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049					
28						
29	Abstract The CNMM-DNDC, which is developed by the authors, is a three-dimension (3D), high-resolution and					
30	process-oriented terrestrial hydro-biogeochemical model that fully couples the cycling processes of carbon (C),					
31	nitrogen (N), phosphorous (P) and water in terrestrial ecosystems at site, catchment, regional, or global scales.					
32	Here, this model is reviewed in terms of development background, basic ideals and theories, core scientific					
33	processes, characteristics and features, comprehensive functions, verification by observations, and preliminary					
34	applications at site, regional or catchment/basin scales. Since the publication of its first version in 2018, this model					
35	has undergone several scientific process improvements and function enhancements. As a result, the cycles of C, N,					

36 P elements and water have been fully coupled in this model through numerically linking a series of 37 biogeochemical reactions of these life elements, and matter phase changes and mechanical movements, which are 38 occurring in terrestrial earth surface systems. Wide validations with field comprehensive observations demonstrate 39 that the CNMM-DNDC model can be generally applicable for long time 3D and "3H" integrative simulations of 40 terrestrial ecosystems in different bioclimatic zones from tropical to boreal permafrost regions, wherein the "3H" 41 is referred to high spatial, high temporal and high process resolutions. As this model is designed to well describe the biogeochemical transformations and the 3D movements of the three life elements and water at different (site, 42 43 ecosystem, catchment/basin, regional or global) scales, available validations and preliminary applications so far 44 have demonstrated its potential to simultaneously predict multiple variables to measure the sustainability in terms 45 of the United Nations Sustainable Goals (SDGs). The predictable variables include at least hydraulic soil erosion, 46 surface runoff and subsurface flow, leaching of water and C, N and P solutes, horizontal flows of dissolved and 47 particle C, N and P substrates or matter, emissions of greenhouse gases (carbon dioxide, methane, and nitrous 48 oxide) and gaseous N pollutants (ammonia and nitric oxide), ecosystem productivity, water evapotranspiration, 49 and balances of energy, water, C, N and P. The CNMM-DNDC model is expected to provide advanced technical 50 support of numerical simulation for the multiple-goal implementations of the SDGs, as it could be a) a robust tool 51 for virtually experimental studies on complex processes at different scales and b) a core model of a decision 52 supporting system to optimize carbon and environmental management.

53

Keywords Coupled simulations of C, N, P and water cycles, Process-oriented hydro-biogeochemical model,
 CNMM-DNDC, United Nations sustainable development goals (SDGs)

56

57 收稿日期 2023-5-15; 网络预出版日期 2023- -

58 作者简介 郑循华, 女, 1964 年出生, 博士生导师, 研究方向为生物地球化学循环。E-mail: xunnhua.zheng@post.iap.ac.cn

59 通讯作者 李勇, E-mail: yli@mail.iap.ac.cn

60 资助项目 中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA23070100)和基础前沿科学研究计划从0到1原始创新项目

61 (ZDBS-LY-DQC007),国家重大科技基础设施项目"地球系统数值模拟装置"。

62 Funded by the Strategic Pilot Science & Technology Program project (XDA23070100) and the 0 to 1 Original Innovation

63 project (ZDBS-LY-DQC007) under the Fundamental Frontier Research Program of the Chinese Academy of Sciences, and the

64 National Key Scientific and Technological Infrastructure Project "Earth System Science Numerical Simulator Facility".

65

66 1 引言

⁶⁷陆地生态系统约占地球表面积的三分之一,对维持地球生物圈、大气、海洋
⁶⁸等圈层或系统的正常功能起着重要作用(Mekonnen, 2018; Lal *et al.*, 2018)。
⁶⁹陆地生态系统碳氮磷等元素的生物地球化学循环和水循环是相互作用、紧密耦合
⁷⁰的复合体(Yu *et al.*, 2010;于贵瑞等, 2014)。通过构建动力学过程模型
⁷¹(process-oriented dynamical model),精细定量刻画陆地生态系统碳、氮、磷等
⁷²生命元素生物地球化学循环及水循环的全耦合动态过程,这是深入认识它们之间
⁷³的复杂相互作用规律及其响应和反馈影响气候、环境和人为活动的基础,也是定

74 量评估人类对全球或区域气候、环境变化的减缓和适应成效的前提。

生态系统动力学过程模型的最初发展,可以追溯到上世纪早期由斯特里特 75 (H Streeter)和费尔普斯(E Phelps)建立的河流水质模型,用以描述河水缺氧 76 动态,还有同期数学家洛特卡(AJLotka)和沃尔泰拉(VVolterra)建立的捕 77 食者-猎物模型,用以描述互动的掠食者和猎物种群规模变化。在生态系统动力 78 79 学过程模型的启发下,复杂生物地球化学过程模型从大约40多年前开始发展, 如今已有众多模型发展到相对成熟程度并在国际上得到广泛应用,其中较具代表 80 性的有 DayCent、Daisy、DeComposition-DeNitrification(DNDC)、LandscapeDNDC、 81 Forest-BGC 或 PnET-BGC 等(于贵瑞等, 2013; Maharjan et al., 2018; Zhang et 82 al., 2018)。此外,近年来,大气科学领域发展起来的陆面过程模型或动态植被 83 模型, 也通过比较简化地耦合进生态系统碳循环或氮循环过程, 使其具备部分生 84 物地球化学模型的模拟功能。这些模型都属于一维模型,即只考虑水分的垂直运 85 动,不考虑地形坡度引起的横向水流及其对物质横向迁移与其后进一步转化的影 86 响。显然,在非平坦地形区域,忽略横向水流影响的一维模型提供的模拟结果, 87 难免与客观事实之间存在显著偏差。 88

不同于一维的生物地球化学过程模型,三维的生态水文模型则以基于流域整 89 体模拟的集总式或基于分散单元或栅格模拟的分布式方式同时进行纵向和横向 90 水流及其对相关过程影响的定量刻画(石教智和陈晓宏, 2006;杨大文等, 2018)。 91 其中分布式生态水文模型能更客观地反映降水、地形起伏和下垫面不均性对流域 92 径流的影响,因而能够更客观地模拟自然和人为因素影响下的流域水资源和水环 93 境。这类生态水文模型以 SHE、DHSVM 和 SWAT 等为代表,已被广泛应用于 94 陆地水循环、面源污染和水资源调控研究(邓鹏和李致家, 2013)。但是, 生态 95 水文模型对土壤-植物体系和水体内部的生命元素迁移转化过程却缺乏精细刻画, 96 难以模拟水循环与单种或多种元素循环的复杂耦合作用。 97

98 尽管一维生物地球化学过程模型是依据物理、化学、生物的基本理论及其定
99 理定律而构建,实现了对植被生理、土壤物理化学过程和元素迁移转化的定量刻
100 画,但这些模型只能模拟土壤水分垂直运动引起的水溶性碳、氮、磷在土壤剖面
101 中纵向迁移,而不考虑横向水流及其引起的水溶态与颗粒态碳、氮、磷横向迁移。

102 因此,一维生物地球化学过程模型如此简化的表层系统水文过程不能真实地反映
103 陆地生态系统的碳、氮、磷、水循环复杂耦合机制,在定量刻画陆地区域和流域
104 生态系统碳、氮、磷、水循环相互作用时就遇到了瓶颈。这时,生物地球化学过
105 程与三维水文过程全耦合的水文-生物地球化学过程模型就应当应运而生(彭辉
106 等,2010; Zhang et al., 2018)。然而,由于这类全耦合过程模型的研发工作本
107 身存在高难度,国内外迄今都还缺乏成熟的陆地普适性高分辨率水文-生物地球
108 化学过程三维模型。

国际上目前的主流水文-生物地球化学模型,大多是集总式或基于水文响应 109 单元(hydrological response unit 或 HRU)的准分布式水文模型与生物地球化学 110 过程进行静态或动态耦合,有的是在生态水文模型中简化地耦合进生物地球化学 111 过程。这类模型的代表有 SWAT 系列(如 SWAT-DayCent 和 SWAT-N)、LASCAM、 112 INCA、基于水文响应单元的 DNDC 流域版等(Deng et al., 2013; 冯起, 2014; 113 Ghimire et al., 2020)。Haas et al. (2013) 通过外部耦合器实现分布式流域水文 114 模型 CMF 与一维生物地球化学模型 LandscapeDNDC 的全耦合(双向动态), 115 但可能是由于这种做法显得比较复杂而难以被大多数人熟练掌握, 116 CNM-LandscapeDNDC 耦合模型迄今还仅限于计算机上的虚拟小流域测试,尚未 117 见在真实流域上的双向动态耦合模拟应用或测试报道,现有报道的研究采用的是 118 单向静态耦合方式(如 Schroeck et al., 2019)。因此,地球科学与资源环境领 119 域众多学科的科学工作者们很期待全耦合的水文-生物地球化学过程三维模型能 120

121 够早日研发成功并得到科研及相关业务领域的广泛应用。

经过 20 多年的不断探索,中国科学院大气物理研究所成功构建了高分辨率
水文-生物地球化学过程模型(CNMM-DNDC),实现了对流域碳、氮、磷、水
循环过程全耦合的分布式三维模拟,使上述问题得到初步解决,有望为陆地生态
系统碳、氮、磷、水综合调控和落实减污降碳目标提供先进的虚拟科学实验平台
和决策支持工具。以下将从建模理念、模型功能、初步应用和未来展望五个方面,
综述 CNMM-DNDC 模型的自主研发及应用进展。

128 2 建模理念和核心过程

129 生命元素(碳、氮、磷、氢、氧等)的生物地球化学量(元素丰度或在介质

中的浓度)、群(生命元素耦合/解耦)、流(生命元素循环)、场(驱动元素 130 运动的基本力)概念(李长生,2016)及相关的物理、化学和生物学理论(Zhang 131 et al., 2018),是构建 CNMM-DNDC 模型的理论基础。在该理论指导下, 132 133 CNMM-DNDC 的总体建模理念可以概括为四个建模基本步骤:首先,将模拟对 象(区域、流域或生态系统)的宏观生态环境条件与人类活动要素(即模型输入 134 变量或参数)转化为多维生物地球化学场变量,包括太阳辐射、重力、温度、湿 135 度、酸碱度、氧化还原电位、反应物浓度梯度在内的七维变量场,作为表征自然 136 界三种基本力——作为物质内禀属性的热力和作为物质间相互作用力的电磁力 137 与引力的一组外化物理量,这些变量共同构成的七维力场,将驱动碳、氮、磷等 138 139 元素和水在模拟区域或流域内按特定方向发生物理和化学定向运动;紧接着,将 模拟对象中所关注生命元素(如碳、氮、磷等)的化学运行拆分成基本的化学耦 140 合/解耦反应过程,包括溶解/脱溶、化合/分解、络合/解络、氧化/还原和同化/异 141 化等,将其物理运动拆分成基本的物质相态变化或位移过程,包括熔融/结晶、 142 融化/冻结、吸附/解析、机械运动(如扩散和流动)等;然后,建立联立方程组, 143 使生物地球化学场变量在刻画元素物理、化学、生物运动的基本方程中扮演关键 144 参数或自变量角色,从而驱动元素的化学转化、相态变化和机械迁移;最后,根 145 据所关注元素的每一次物理、化学变化,进行模拟对象各个部分的元素丰度更新, 146 进而由元素丰度变化决定生态系统的结构和功能变化。将这四个步骤涉及的全部 147 数学方程、参数、变量和数据转化成可以在微机或服务器上运行的计算机语言程 148 序软件, 使该软件每运行一次, 都能在计算机上生成一个用一系列数值来描绘的 149 虚拟流域、区域或生态系统,这样就建立起来了整个过程模型。在这种理念下建 150 立起来的水文-生物地球化学过程模型,其建模过程不依赖于实测数据,而仅依 151 赖于人类迄今的理论和知识积累以及模型研发者对这些既有理论和知识的科学 152 逻辑整合与数学表达能力。但已建立起来的模型是否能够较客观地反映模拟对象 153 154 的真实情况,则需要依赖于观测数据进行模拟结果可靠性验证,或对模型的少数 内置参数进行率定。 155

CNMM-DNDC 最初版本(v1.0, windows 运行环境)的构建,是首先将国
 157 际流行一维生物地球化学过程模型 DNDC(Li *et al.*, 1992)采用的土壤碳氮转

158 化过程(包括有机碳氮分解、硝化作用、反硝化作用、发酵作用)源代码重新编
159 写入流域生源要素管理模型 CNMM(李勇, 2017)的 DHSVM 分布式水文框架
(Wigmosta *et al.*, 1994)中,然后在底层源代码层面完成了一系列过程衔接、
2 变量匹配和尺度变换等工作,从而实现了土壤碳氮转化过程与三维水运动过程的
162 无缝耦合。之后,在初级版本基础上,又对该模型进行了多次过程机制改进、模
163 拟功能扩充和版本升级,从而形成了如图1所示的当前版 CNMM-DNDC。



165

164

166 图1 当前版水文-生物地球化学过程模型CNMM-DNDC的基本构架

167 Fig. 1 Basic scientific structure of the current hydro-biogeochemical process168 model--CNMM-DNDC

169

170 在上述建模理念指引下,当前版 CNMM-DNDC 模型(图1)刻画碳氮磷等
171 生命元素生物地球化学循环的主要过程包括:1)土壤-水-空气-植物和微生物复
172 合体系统中碳氮磷元素物理、化学、生物反应过程,主要有粘土矿物吸附和解吸、
173 水解、有机质分解、硝化、反硝化、植物氮磷吸收、根系分泌、酸碱平衡、气体

扩散、光合/呼吸等过程:2)上述过程直接改变碳氮磷元素的不同储库大小和不 174 同形态浓度,其中土壤有机碳氮磷库分为极易分解、易分解和惰性凋落物库,活 175 体和死亡微生物库,易分解和难分解活性腐殖质库,惰性腐殖质库,溶解性有机 176 碳氮磷库,不同无机碳氮磷形态包括铵盐(NH4+)、硝酸盐(NO3-)、亚硝酸 177 $盐(NO_2^-)、一氧化氮(NO)、氧化亚氮(N_2O)、氮气(N_2)、氨(NH_3)、$ 178 二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、磷酸盐(PO₄³⁻)等; 3)这些储库和形态变 179 化的过程受气象条件(气温、降水、风速、相对湿度和辐射)、土壤性质(土壤 180 质地、pH、容重、有机质、水力学参数等)和地形等环境要素以及施肥(化肥 181 类型和用量、有机肥类型和用量、施肥时间)、灌溉、耕作(耕作方式)、耕作、 182 作物类型等人为管理要素驱动。当前版 DNMM-DNDC 基于光合-呼吸机理模拟 183 植物生长,基于一级动力学机制模拟有机质分解,基于能斯特方程、"厌氧气球" 184 假设、米氏动力学机制和 Pirt 方程等模拟作为非均匀介质的土壤中同时发生的硝 185 化、反硝化、发酵作用等,以及基于浓度梯度驱动的扩散过程等机制模拟土壤-186 水-植物体系中的气体排放(Zhang et al., 2018, 2020, 2021; Li et al., 2022, 187 2023) 。 188

当前版 CNMM-DNDC 模拟的水文相关过程包括土壤水分平衡、壤中流的水
纵向和横向运移、地表水运动和径流、浅层地下水运动和补给、河网汇流以及水
平和垂直水流驱动不同形态碳氮磷物质迁移的过程,其中采用 Penman-Monteith
公式模拟生态系统蒸散发,基于运动波近似或扩散波近似理论模拟地表径流和横
向壤中流,根据达西定律模拟土壤水分垂直运动,应用线性槽蓄法模拟河网汇流
过程(Zhang et al., 2018; Li et al., 2023)。

当前版 CNMM-DNDC 可以用于模拟区域或流域尺度的生态系统水分平衡、
能量平衡、氮磷养分平衡和植物生长,实现对区域或流域尺度生态系统生产力、
温室气体(GHG)净排放、氮污染气体排放、水土流失、地表水氮磷负荷等关
键变量的高时空分辨率同步预测评估,为生态系统生产力可持续性、碳氮 GHG
减排和碳中和、含氮大气污染物减排、水体面源氮污染防控等重大可持续发展问
题的解决提供高性能数值模型工具。

201 3 模型功能

202 3.1 模型特点

203 CNMM-DNDC模型由中国科学院大气物理研究所主导研发,其最初版本于
204 2018年在国际学术期刊上刊发(Zhang et al., 2018)。该模型在Windows操作
205 系统下基于C语言编写模型源代码,使用命令提示符 cmd.exe 直接调用模型执行
206 程序并运行。为满足其实际应用中对大规模模拟运算能力和速率的要求,近期已
207 基于当前版本开发了可在大型服务器的Linux操作系统下运行的CNMM-DNDC
208 模型版本,并在多个流域和不同项目中成功应用。

CNMM-DNDC 模型设计目标是普适于不同生物气候带陆地区域或流域,并 209 以高时间、高空间和高过程分辨率,长期模拟生态系统(包括森林、农田、草地、 210 湿地、内陆水体等)的碳氮磷水三维运移、水流驱动的溶解态和颗粒态碳氮磷流 211 失、地气碳氮气体(CO₂、CH₄、N₂O、NO、NH₃等)交换通量和生态系统生产 212 力(包括地上或地下净初级生产力、产草量、木材蓄积量、作物产量等),且时 213 间和空间分辨率均可自定义。其时间分辨率最高可到3小时,空间分辨率最高可 214 到米,过程分辨率精细到生态系统中碳氮磷元素和水的主要物理迁移、化学转化 215 反应、植物及微生物生长过程,模拟土层深度可达4米,用户可自定义土壤分层。 216 当前版 CNMM-DNDC 可输出多时间尺度(3小时、日、月、季节和年)各栅格 217 的各土层不同储库和不同形态碳氮磷浓度动态、土壤温湿度和酸碱度、土壤氧化 218 还原电位和氧气浓度、生态系统生产力、碳氮气体地气交换通量、水分和能量收 219 支、氮磷养分收支和净碳平衡、土壤侵蚀模数、溶解态和颗粒态碳氮磷流失通量 220 以及流域出水口流量与水质要素等(Li et al., 2023)。 221

222 3.2 过程改进和功能升级

CNMM-DNDC模型目前已经注册了6个国家软件著作权版本,分别是:v1.0
版,对DNDC模型(Li et al., 1992, 2002; 李长生, 2016)采用的土壤碳氮转
化过程模拟机制与CNMM模型(李勇等, 2017)采用的分布式三维水文过程模
拟机制建立了全耦合(Zhang et al., 2018); v2.0版,引入了冻融机制,并创建
了山茶科植物铝代谢过程影响茶园土壤酸碱度的pH动态模拟新机制,使该模型
适用于季节性或多年冻土地带(Zhang et al., 2021a),也能够模拟植茶引起的土

壤酸碱度举例变化及其对土壤氮转化和气态氮排放的影响(Zhang et al., 2020); 229 v2.0s 版,对该模型的输入数据制备过程进行了标准化;v3.0 版,构建了有地表 230 水层生态系统(水田或湿地)的氨挥发模拟新机制,并通过考虑降雨影响下植被 231 冠层截留土壤排放的氨等因素,改进了旱地氨挥发的仿一级动力学模拟机制(Li 232 et al., 2022); v4.0 版, 引入土壤侵蚀和颗粒态碳氮磷迁移模拟机制, 使该模型 233 具备了模拟横向水流影响土壤碳氮磷库和地表水颗粒态碳氮磷负荷的功能(Liet 234 al., 2023); Linux v1.0 版, 将该模型的最新 windows 版本 (v1.0 至 v4.0 均是由 235 window 操作系统运行的版本)源代码改写成了能在 Linux 操作系统运行的源代 236 码版本,使该模型能在大型服务器上高效地进行高分辨率三维模拟的大规模运算。 237

- 238
- 3.2.1 引入冻融机制 239

考虑到全球陆地面积的16%分布着冻土,CNMM-DNDC模型的设计目标之 240 一是使其对多年冻土和季节性冻土地带具备普适性。为此, Zhang et al. (2021a) 241 将 Zhang et al. (2003)构建北方生态系统土壤温度模型 (Northern Ecosystem Soil) 242 Temperature,简称 NEST) 时采用的冻融过程机制引入到 CNMM-DNDC 中,使 243 其拥有对中高纬或高海拔地带表层土壤冻融过程的模拟能力。该冻融过程模拟机 244 制的核心是土壤和雪层的热传导。不同土层、雪层或土雪过渡层之间的热传输主 245 要基于辐射能量平衡进行计算,其中在采用的一维热传导方程中,加入了土壤水 246 冻结冰融化或雪层融化而引起的热量变化项,土壤热量下边界由地热能量平衡确 247 定。冻融过程模拟涉及的主要方程如表1中式1-5所示。土壤冻融和雪层融化的 248 临界温度为0℃。依据能量守恒定律,若热传导方程计算得到的温度高于临界温 249 度,则土壤冰或雪层融化,反之则土壤水冻结。 250

- 251
- 表1 CNMM-DNDC 模拟冻融过程的主要方程(Zhang et al., 2021a) 252
- Table 1 Key equations of freeze-thaw process in CNMM-DNDC (Zhang et al., 2021a) 253 编号 公式 说明 热传导函数 式1
 - $C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial T} \left(k \frac{\partial T}{\partial T} \right) + S$

式 2
$$C_l \frac{\Delta T_l}{\Delta t} = (G_{l-1,l} - G_{l,l+1})/D_l + S_l$$

式 3 $G_{l-1,l} = (0.5k_l + 0.5k_{l-1})(T_{l-1} - T_l)/(0.5D_{l-1} + 0.5D_l)$
式 4 $C_l = \sum_{j=1}^5 (C_{l,j} \theta_{l,j})$ 热容量函数
式 5 $k_l = \prod_{j=1}^5 k_{l,j}^{\theta_{l,j}}$ 导热率函数

254 注:公式引自 Zhang *et al.* (2003); *T*为土壤或雪层温度(°C), *k*为导热率(W m⁻¹
255 °C⁻¹), *C*为比热容(J kg⁻¹ °C⁻¹), *S*为土壤冻融或雪层融化的热量变化(J); 关
256 于公式的更详细说明,可参见原文献(Zhang *et al.*, 2003, 2021a)。

257

258 3.2.2 创建土壤酸碱度变化的铝代谢模拟机制

茶叶种植园在全球陆地热带和亚热带区域广泛分布,茶业也是这些地区的主 259 要农业行业之一(http://www.fao.org/faostat/)。茶树属于山茶科,是多年生木本 260 植物,其植株生长过程中通过根系从较深层土壤中大量吸收铝,冠层修剪枝叶和 261 落叶在地表分解又将这部分枝叶中的铝释放到表层土壤中,铝离子(AL³⁺)水解 262 产生大量氢离子(H⁺),导致表层土壤酸度增加,pH下降,改变茶园生态系统的 263 碳氮磷循环过程,特别是植茶所致土壤低 pH 触发化学反硝化(Zhang et al., 2020), 264 引起强烈的土壤 N₂O 和 NO 排放 (Wang et al., 2020; Yao et al., 2018)。为了模 265 拟茶树铝代谢引起的土壤 pH 变化, Zhang et al. (2020) 基于铝离子水解平衡和 266 化学反应动力学原理创建了一个新的模拟机制,其核心方程用于模拟土壤中三价 267 铝离子水解引起的土壤 H+浓度变化 (表 2 中的反应 1 和式 6), 使 CNMM-DNDC 268 能够模拟植茶所致低 pH 触发的茶园土壤 N₂O 和 NO 强排放。此外, Zhang et al. 269 (2020)还基于有机酸电离平衡原理,为CNMM-DNDC新增了植物生长过程中 270 根系分泌有机酸影响土壤 pH 的模拟机制,以及土壤强酸度(低 pH)通过改变 271 植物光合能力而影响生长的过程(表2中的反应2和式7-8)。 272

273

274 表 2 CNMM-DNDC 建立的土壤酸碱度变化新模拟机制(Zhang et al., 2020)

Table 2 New mechanisms for simulating soil pH changes in CNMM-DNDC (Zhang *et al.*, 2020)

	编号	公式	说明
	反应1	$Al^{3+}+3H_2O \leftrightarrows Al(OH)_3+3H^+$	铝离子水解反应
	式6	$K_{\rm w}{}^{3}K_{\rm b}{}^{-1} = \Delta[{\rm H}^{+}]_{\rm res}(c_{\rm H(soil)} + \Delta[{\rm H}^{+}]_{\rm res}){}^{3}(c_{\rm Al(III)} - \Delta[{\rm H}^{+}]_{\rm res}/3)^{-1}$	铝代谢影响 H ⁺
	反应 2	$HR \rightleftharpoons H^+ + R^-$	有机酸离解反应
	式 7	$\triangle [\mathrm{H^+}]_{\mathrm{ex}} = \triangle [\mathrm{H^+}]_{\mathrm{ami}} + \triangle [\mathrm{H^+}]_{\mathrm{org}}$	根分泌物影响 H ⁺
	式8	$f_{\rm ph} = -0.089 \rm ph^2 + 0.94 \rm ph - 1.51$	土壤酸化因子
277	注:关	于表中各个变量或反应式的详细说明,可参见原文献	Zhang <i>et al</i> . (2020).

279 3.2.3 改进生态系统氨挥发模拟机制

改进前的 CNMM-DNDC 模型对生态系统 NH₃ 挥发,无论有无地表水层, 280 都采用了相同模拟机制。但地表有覆盖水的生态系统 NH3 挥发机制实际上与无 281 水层完全不同,采用相同算法显然不合理。特别是,在有地表水层覆盖的水田或 282 湿地,会有水藻大量繁殖,水藻光合作用释放氢氧根离子(OH),使土壤 pH 283 升高,促进 NH4⁺向 NH3转化,同时也降低 NH3在水中的溶解度,该水藻影响导 284 致施氮肥的淹水稻田和旱地 NH3挥发强度相当。但之前的 CNMM-DNDC 或国内 285 外其他模型,都没有考虑藻类生长对湿地 NH3 挥发的影响。针对这个问题, Li et 286 al. (2022) 建立了适用于地表有水层生态系统(如淹水期间的水稻田和湿地等) 287 的 NH₃ 挥发模拟机制,主要是创建了藻类生长调节地表水层 pH 而影响 NH₃ 挥发 288 的新模拟机制及其参数化方案(表 3 中的式 9-11),同时还引入了 Jayaweera 289 和 Mikkelsen(1990) 基于双膜传质理论创建的 J-M 传质机制(表 3 中的反应 3 290 和式 12-14)。基于 J-M 传质机制模拟地表有水层生态系统的 NH₃ 挥发, 需要定 291 量刻画两个过程:一是水中 NH4+与 NH3 的酸碱化学平衡,二是水中 NH3 的挥发 292 过程,即气态NH3通过水-气界面扩散到大气。酸碱平衡过程考虑了田面水的NH4+ 293 浓度、pH 值和水温的影响,挥发过程依据双模传质理论,并考虑了水位和风速 294 等因素的影响。 295

296

278

297 表 3 CNMM-DNDC 采用的湿地(有水层)氨挥发模拟机制(Li et al., 2022)

298 Table 3 Mechanisms of ammonia volatilization from wetlands (with surface water layer)



301

300

对于旱地 NH₃ 挥发的模拟,改进前的 CNMM-DNDC 继承了 DNDC 的仿一 302 级反应动力学模拟机制,其中考虑了风速、土壤温度和土壤深度对 NH3 挥发速 303 率常数的影响。在此基础上, Li et al. (2022)进一步同时考虑了植被冠层、土 304 壤质地(以粘粒含量表征)、土壤湿度和降雨(或喷灌)致植被冠层湿润等因素 305 对 NH3 挥发速率常数的影响。该模拟机制的算法中,每一个影响因素调节 NH3 306 挥发速率常数的作用都被定义为 0-1 之间的无量纲分数,其取值通过多个站点的 307 旱地农田 NH3 挥发通量观测数据予以率定,当前版中对这些参数取值的率定, 308 依据了中国和英国各7个野外站点施肥事件发生后两周左右的逐日 NH3 挥发通 309 量观测数据(Dubache et al., 2019; Li et al., 2019, 2022)。 310 3.2.4 引入土壤水力侵蚀机制 311

312 改进前的 CNMM-DNDC 模型只能模拟地表径流和壤中流引起的水溶性碳

氮磷物质 (包括铵盐、硝酸盐、水溶性磷酸盐和水溶性有机物)的横向和纵向迁 313 移,但缺乏对地表水蚀产沙及其引起的颗粒态碳氮磷横向迁移过程的模拟能力。 314 为了解决该问题,李思琪等(2022)和Li et al. (2023)在该模型的水文框架中 315 316 引入了 Rose(1985)提出的并已得到广泛应用的土壤水力侵蚀物理机制,使 CNMM-DNDC 新增了水土流失模拟功能,为地表水碳氮磷面源污染的科学研究 317 与防控治理提供了一个潜在的先进模型工具。无缝耦合 Rose 机制(Rose, 1985) 318 后, CNMM-DNDC 可以通过模拟降雨剥蚀、地表径流夹带和泥沙沉降三个连续 319 发生的物理过程来估算水蚀产沙强度。地表径流越大(Q),泥沙颗粒也越大, 320 式 15 (表 4) 等号右侧第一项(降水剥蚀项)就比第二项(径流夹带项)越小。 321 实际上,即使在相当弱的侵蚀事件中,忽略降水剥蚀项后仍然是一个较好的近似 322 (式 16),因为这样近似模拟的精度通常会优于观测数据的不确定度。如式 17 323 (表 4) 所示,由地表径流引起的单位面积地表泥沙产量(S) 根据地表径流量 324 (O)、坡度 (G)、植被覆盖度 (C_r) 和地表径流的泥沙携带效率 (η) 进行计算 325 (Rose, 1985),进而采用富集系数法,由地表水蚀产沙量(S)、表层土壤碳氮 326 磷含量(C)和地表径流引起的颗粒态碳氮磷富集比(R),根据表4所列式18-20 327 计算地表水力侵蚀引起的颗粒态碳、氮、磷流失量(Scnp)(李思琪等, 2022; 328 Li et al., 2023). 329

330

331 表 4 CNMM-DNDC 采用的土壤水力侵蚀机制(Li et al., 2023)

Table 4 Mechanisms of water-induced erosion in CNMM-DNDC (Li *et al.*, 2023)

编号	公式			说明
式15	$c(L,t) = \alpha C$	$_{e}P^{2}/(QI)\sum_{i=1}^{I}\left(\frac{1}{\beta_{i}}\right)+$	$ ho gGKC_{ m r}\left(1-rac{x_*}{L} ight)$	水蚀产沙
式 16	$c(L, t) \approx \rho g$ $\approx 2700G$ $\approx 2700G$ $\approx 27 \times 1$	$GKC_{\rm r} \left(1 - \frac{x_*}{L}\right)$ $KC_{\rm r} \left(1 - \frac{x_*}{L}\right)$ $\eta C_{\rm r} \left(1 - \frac{x_*}{L}\right)$ $0^6 G \eta C_{\rm r}$	15	仅考虑径流夹带项 的水蚀产沙

式 17	S = c(L, t)Q	产沙量
式 18	$S_{\rm CNP} = RCS$	颗粒态元素流失量
式 19	$R = R_{\rm CN} = k_1 (S \times 10^{-4})^{-0.2468}$	颗粒态碳氮富集比
式 20	$R = R_{\rm P} = e^{(2.46 - 0.2 \log S)}$	颗粒态磷富集比

333 注: 公式引自 Rose (1985); α为土壤可剥蚀性系数, C_e为在雨滴下土壤暴露分数, P 为降雨量, C_r为无植被覆盖的地表面积百分比, K 为泥沙夹带效率, η为
335 地表径流的泥沙携带效率, C 为表层土壤的颗粒态碳、氮、磷浓度;关于公式中
336 变量和参数及其量纲的详细说明,可参见原文献 (Rose, 1985;李思琪等, 2022;
337 Li *et al.*, 2023)。

338

339 3.3 模型输入和输出

340 3.3.1 输入数据

341 模型的输入数据包括土地利用及农田管理信息、气象信息、地表阴影信息、
342 土壤信息、河流信息和地形信息,分别存放在land, met, shade, soil, stream和
343 topo目录下。x64\Debug目录下还有一个名为***.cnmm的项目文档,用于存放区
344 域或流域模拟相关输入数据路径、模拟时段和土壤分层等信息。

345 气象输入数据包括气象数据文件(***.dat)和站点信息文件Station.dat)。
346 站点信息文件存储气象站名称、坐标、海拔和气象数据文件存储路径信息。每个
347 气象数据文件分别存储模拟区域的各气象站点每3小时的短波辐射、长波辐射量
348 和降水总量,以及气温、风速、相对湿度平均值。

349 土壤输入包括土壤理化性质、初始条件和分层(nodes.dat)等数据文件。土
350 壤理化性质输入文件是ACSII栅格文件,包括不同土壤分层(依据***.cnmm项目
351 文档中定义的土壤分层信息,各个属性文件的数字编号代表土壤层次)的pH、

352 黏粒含量、阳离子交换量、有机质含量、总氮、总磷、速效磷含量、反照率、容
353 重、饱和含水量、田间持水量、萎蔫系数、纵向饱和导水率、表层横向饱和导水
354 率等。土壤初始条件主要包括硝态氮和铵态氮含量、温湿度、秸秆残留量等。土
355 壤分层文件为模型运转过程中土壤分层状况描述,不同于项目文档中的土壤分层
356 信息。

357 地形输入数据包括3个ACSII栅格文件,分别存储着流域数字高程、河流流向358 和流域边界。

359 河流输入数据包括河流分布、初始河道信息、河流分级、河流网络、河流初
360 始水质和地表汇流等信息。河流分布是基于数字高程图获取的流域河流分布
361 ACSII栅格文件。河流分级包括各个级别河道的宽度、深度和水分下渗速率等参
362 数。河流分级是每段河网的级别,即具体是第几级河道。河流信息和河流网络也
363 是基于数字高程图获取的河段栅格位置、长度、切深、坡向、坡度等信息。河流
364 初始水质可由用户根据实际情况自定义和修改。地表汇流信息是模型自查运行中
365 生成的驱动文件。

366 阴影输入数据包括逐日阴影文件和仰视角文件,均是模型自查运行中生成的367 驱动文件。

植被信息和管理输入数据包括农作物等植被的参数、土地利用和管理措施。 368 植被参数信息包括不同植物的生物学参数,如最佳/最低生长温度、植株高度、 369 植株根深、植物不同生长期不同部位的碳氮磷含量和生长积温等。土地利用是区 370 域或流域土地利用类型分布信息,为ACSII栅格文件。管理措施包括农作物播种 371 (时间和作物类型)、农作物收获或草地割草(时间、农作物类型和秸秆还田比 372 例、林地伐木时间和方式等)、施肥(施肥量、肥料种类、施肥方法和氮磷含量 373 等)、灌溉(灌溉水量、灌溉方法和时间)、翻耕(时间和深度)等信息,各种 374 管理措施信息按管理实施前后顺序编号存储于ACSII栅格文件中。 375

376 3.3.1 模型输出

模型运行输出结果包括网格输出、指定格点详细结果和流域出水口结果。网 377 格输出包括蒸散量,作物产量,土壤有机碳(SOC)变化,CH4累积通量,含氮 378 气体(NH₃、N₂O、NO、N₂)累积通量,硝态氮淋溶和地表径流等空间分布特征; 379 模型允许用户通过经纬度指定多个栅格点输出其详细的模拟结果,包括土壤分层 380 381 环境变量(如温度、湿度、pH、厌氧气球大小、SOC及其各组分)、土壤分层 溶质(如硝态氮、铵态氮、尿素和速效磷含量)、地上生物量、作物产量、叶面 382 积指数、植株氮磷含量、CH4通量、含氮气体(NH3、N2O、NO、N2)通量,硝 383 态氮淋溶和地表径流等变量的时间动态:流域出水口结果包括流域出水口的水量 384

385 平衡、流量和水质(如氨氮、硝氮、总氮、总磷、磷酸盐、可溶性有机碳氮磷、386 泥沙和颗粒态碳氮磷)浓度时间动态。

387 4 模型验证和应用

388 4.1 模型验证

389 当前版CNMM-DNDC模型对土壤环境要素、生态系统生产力、蒸散发、水
390 土和氮磷流失、碳氮GHG和含氮污染气体排放以及流域出水口流量和水质要素
391 等变量的模拟结果可靠性,已经通过同步综合观测数据验证。参与验证的多个野
392 外观测站点分布在从热带到寒温带(多年冻土地带)的不同区域(图2),这表明,

- 393 该模型已具备先进的综合模拟性能。
- 394



图2 水文-生物地球化学过程模型CNMM-DNDC已通过观测验证的站点或流域 396 397 及其验证变量。图中,绿色三角形指示11个农田氨(NH3)挥发通量观测验证站 点的位置,深红色圆形指示其他观测验证变量站点或流域的位置,NO3⁻为硝酸 398 盐,NH4⁺为铵盐,COD为化学需氧量,AGB为地上生物量,SOC为土壤有机碳, 399 PN为颗粒态氮,TN为总氮,TP为总磷,PP为颗粒态磷,GLAI为绿叶叶面积指 400 数,GPP为光合作用二氧化碳(CO₂)吸收通量(亦即总初级生产力),Re为生 401 态系统总呼吸 CO_2 排放通量,NEE(=Re-GPP)为生态系统-大气 CO_2 净交换交 402 换通量,NEP(=-NEE)为净生态系统生产力,CH4为甲烷,N2O为氧化亚氮, 403

404 NO为一氧化氮。

405 Fig. 2 Sites (or catchments) and variables validated by hydro-biogeochemical process model--CNMM-DNDC. The green triangles indicate the locations of 11 observation 406 407 sites used for the validation of ammonia (NH₃) volatilization from croplands, while the dark red circles indicate the locations of the other validated sites or catchments. 408 409 NO₃⁻, NH₄⁺, COD, AGB, SOC, PN, PP, TN, TP, GLAI, GPP and Re are referred to nitrate, ammonium, chemical oxygen demand, above-ground biomass, soil organic 410 carbon, particulate nitrogen, particulate phosphorus, total nitrogen, total phosphorus, 411 green leaf area index, carbon dioxide (CO₂) uptake flux by photosynthesis (i.e., total 412 primary productivity) and CO₂ emission flux by total ecosystem respiration, 413 respectively. NEE (= Re - GPP) is referred to net ecosystem-atmosphere exchange 414 flux of CO₂. NEP (= -NEE) is referred to net ecosystem productivity. CH₄, N₂O and 415 NO are referred to methane is nitrous oxide and nitric oxide, respectively. 416

417

418 4.1.1 亚热带农林复合小流域综合观测验证

419 Zhang et al. (2018)采用我国西南川中丘陵区一个典型亚热带紫色土农林复
420 合小流域(四川盐亭截留小流域)内众多变量的综合观测数据,对刚建成的
421 CNMM-DNDC v1.0 版本进行了模拟结果可靠性验证,已经通过了多个连续周年
422 动态观测数据验证的模型输出变量包括:小流域内不同生态系统(谷底平地的稻
423 油轮作、稻麦轮作和单季稻冬水田,坡耕地的玉米-小麦轮作)的作物产量、旱
424 地土壤温湿度、地表径流、NO3⁻流失、NH3 挥发通量和其他碳氮气体(CH4、N2O
425 和 NO)排放通量,以及小流域出水口水流量和河道 NO3⁻流出量动态。

426 近期,李思琪等(2022)和Lietal.(2023)继续采用该小流域的坡耕地径
427 流小区多年连续观测数据开展验证,结果证实了最新版 CNMM-DNDC 能够同时
428 有效模拟水力过程泥沙侵蚀量以及总氮和总磷流失通量。此外,本文作者最近又
429 采用另外两个亚热带农林复合小流域(分别是四川成都天府新区兴隆湖流域的典
430 型农业流域--贾家沟小流域和四川内江石板河流域)的观测数据,进一步验证了
431 最新版 CNMM-DNDC 对地表水面源污染要素的模拟性能,参与观测验证的流域

432 出水口模型输出变量包括河道水流量和 NO₃⁻、NH₄⁺、化学需氧量(COD)、总
433 磷(TP)输出量。验证结果显示,该模型对这些变量表现出较好的综合模拟预
434 测能力。

435 国内外的水文-生物地球化学过程模型发展都还未达到成熟阶段,随着纳入
436 同步观测验证的变量个数增加,这类模型同时通过多个变量长期同步观测验证的
437 难度也随之增大。由于这个原因,国内外的陆地水文-地球化学过程模型通过同
438 步观测验证的输出变量数大多不超过 5 个(如 Ferrant *et al.*, 2011)。尽管如此,
439 在四川盐亭截留小流域,CNMM-DNDC 最新版已通过了 15 个模拟输出变量的长
440 期同步综合观测验证(李思琪等, 2022; Li *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2018)。
441 4.1.2 亚热带茶园生态系统 N₂O 和 NO 排放通量同步观测验证

采用Yao et al. (2018) 对我国华中地区亚热带茶园对不同茶龄茶园的无氮 442 肥对照、单施尿素和单施有机肥(油菜籽饼)处理的N2O和NO排放通量及表层 443 土壤温湿度的两年原位同步观测数据, Zhang et al. (2020) 对新增了茶树铝代谢 444 和根分泌有机酸共同影响土壤酸碱度及低pH影响植物生长模拟机制的 445 CNMM-DNDC模型版本开展了验证。结果显示,模型模拟的NO和N₂O排放日通 446 量动态和年累积量均与观测值具有统计显著一致性。对用于观测验证的茶园, 447 Zhang et al. (2020) 基于CNMM-DNDC模拟的虚拟试验研究发现,其N2O和NO 448 年直接排放因子(即肥料氮当年通过施用地N2O或NO排放所致损失率)都在单 449 施尿素时随肥料氮投入量增加而线性增大,但在单施油菜籽饼肥时却随有机氮投 450 入量增加而呈对数型非线性增长。直接排放因子是采用排放因子-活动水平乘积 451 452 法编制N2O和NO排放清单的必要参数(IPCC, 2006, 2019)。但由于直接观测 难度大、人财物力成本高,实际上很难通过观测获得各种田间条件的直接排放因 453 454 子,实际观测数据对排放发生条件的代表性极其有限。因此,结合可靠过程模型 开展虚拟科学试验来获取不同田间条件下的排放因子数据,是对实际观测缺陷的 455 456 有效补充。Zhang et al. (2020)的初步研究表明,当前版CNMM-DNDC是用于 开展虚拟科学试验而获取不同条件下茶园等生态系统的N₂O和NO直接排放因子 457 的潜在有效工具。 458

459 4.1.3 冻土生态系统的碳氮气体通量和硝酸盐流失观测验证

Zhang et al. (2021a)采用青藏高原东部季节性冻土区三种典型高寒生态系
统的 CH4 和 N₂O 通量及土壤温湿度周年连续观测数据,开展了 CNMM-DNDC
模型验证。结果表明,对于季节性冻土地带的高寒湿地、高寒草甸和高寒森林生
态系统,引入冻融过程模拟机制后的 CNMM-DNDC 模型版本能够有效模拟其土
壤剖面温度、表层土壤湿度和 CH4 与 N₂O 通量及其周年动态变化特征,日尺度
模拟值和观测值均达到统计显著一致性,且一致性指数值为 0.91–1.00 (温度)、
0.49–0.83 (湿度)、0.57–0.88 (CH4)和 0.26–0.47 (N₂O)。

467 采用 Yue et al. (2022)在位于黑龙江省漠河县的多年冻土湿地土壤温湿度、
468 活动层深度和 CH₄、N₂O 通量观测数据,张伟和刘春岩正在对当前版
469 CNMM-DNDC 进行验证,其初步结果也显示出日尺度模拟值与观测值具有统计
470 显著一致性(根据刘春岩和张伟提供的未发表数据)。

Zhang et al. (2021b) 采用位于季节性冻土带的吉林省梨树地区种植玉米的 471 农田温度、湿度和 NO3⁻浓度土壤剖面垂直分布观测数据,进行了当前版 472 CNMM-DNDC 的验证。结果显示,该模型对土壤剖面温度、湿度和 NO₃-浓度的 473 模拟值与观测值均达到统计显著一致性,三个变量模拟值对观测值的统计显著零 474 截距回归方程斜率分别为 1.04、1.04 和 0.86, 决定系数分别为 0.97、0.56 和 0.28。 475 这些验证表明,对于季节性和多年冻土地带森林、草地、湿地和农田生态系 476 统的土壤水热条件、硝酸盐淋失和 CH4、N2O 排放,当前版 CNMM-DNDC 已具 477 有较好模拟能力。 478

479 4.1.4 森林生态系统的碳水通量观测验证

480 张伟等人最近又将Forest-BGC模型的树木生长模拟机制引进到
481 CNMM-DNDC模型,替代了其中的简化树木生长模拟机制,并正在采用中国陆
482 地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的吉林省长白山温带针阔混交林、
483 江西省千烟洲亚热带常绿针叶人工林、广东省鼎湖山亚热带常绿针阔混交林和云
484 南省西双版纳热带常绿阔叶林的观测数据,验证修改后的CNMM-DNDC模型对
485 不同气候带森林生态系统碳水通量的模拟性能。初步验证结果显示,修改后的
486 CNMM-DNDC模型能够较好地模拟从热带到温带的森林生态系统水汽蒸散发

487 (ET)通量、光合作用CO2吸收(GPP)通量、生态系统总呼吸CO2排放(Re)
488 通量和生态系统-大气CO2净交换(NEE)通量(根据张伟提供的未发表数据)。
489 4.1.5 农田生态系统综合观测验证

490 除了上文提及的四川盐亭亚热带水稻田和坡耕地玉米-小麦轮作田以及吉林 梨树温带玉米地的观测验证外,李思琪等人还采用位于华北地区的山西运城典型 491 492 暖温带玉米-小麦轮作田和位于东部非洲肯尼亚西部基苏木(Kisumu)的典型热 带玉米观测数据,对当前版 CNMM-DNDC 的农田综合模拟性能进行验证。运城 493 农田纳入该验证的观测数据变量包括土壤温湿度、作物产量、地上生物量、NEE 494 通量、CH4吸收通量和NH3、NO、N2O排放通量(Cui et al., 2014; Liu et al., 495 2011, 2012, 2013, 2014, 2015; Wang et al., 2013a, 2013b), 基苏木农田纳 496 入该验证观测数据变量有土壤温湿度、NO3⁻和 NH4⁺浓度、SOC 含量、玉米产量、 497 地上生物量、绿叶叶面积指数(LAI)、植株N含量动态、CH4吸收通量和N2O 498 排放通量(Nyawira et al., 2021; Sommer et al., 2016, 2018)。根据李思琪提 499 供的对这些变量的验证结果(未发表数据),该模型的模拟值与观测值都具有统 500 计显著一致性。 501

Li et al. (2022)从文献中搜集了我国温带、亚热带共7个小麦-玉米轮作农 502 田站点的累计 44 个施肥事件和 5 个水稻田站点的累计 19 个施肥事件逐日 NH3 503 挥发通量风洞法或微气象学方法观测数据(其他方法的观测数据被排除在外,主 504 要考虑到其 NH₃挥发通量可能难免较大系统误差),对当前版 CNMM-DNDC 模 505 拟农田 NH3 挥发通量的可靠性进行了全面验证。结果显示,该模型能较好地模 506 拟温带和亚热带区域不同管理措施下的农田氨挥发通量变化特征,施肥事件氨挥 507 发累积量的模拟值与观测值具有显著一致性,其显著零截距线性关系的斜率达到 508 0.94-0.98, 决定系数达到 0.71-0.76(Li et al., 2022)。 509

510 这些验证表明,当前版 CNMM-DNDC 对从热带到温带地区典型农田生态系
511 统的土壤水热条件、植物生长、碳氮循环过程和碳氮气体地气交换等过程,均具
512 有较好模拟性能。

513 4.2 模型应用实例

514 4.2.1 区域或流域应用

515 自从 CNMM-DNDC 的 v1.0 版刊发以来,该模型一直在边发展边进行区域
516 或流域多个目标变量的高分辨率综合模拟测试或实际应用之中,迄今已进行过测
517 试或在环境保护管理实践中得到应用的我国流域或区域已有 15 个,分布在亚热
518 带和温带等气候带(图 3)。

519



520

521 图 3 全国应用高分辨率水文-生物地球化学过程模型 CNMM-DNDC 的 15 个流域522 或区域所在位置示意图。区域或流域名称,详见于图 4 中对应编号子图。

Fig. 3 Locations of 15 catchments or regions in China applying high-resolution hydro-biogeochemical process model--CNMM-DNDC. The definitions of regions or catchments are referred to the corresponding numbered subgragh in Fig. 4.

526

527 其中的省级行政区域有江西省和广西壮族自治区(国土面积分别约 166900
528 和 237600km²),地市级行政区域有山东省济南市和福建省南平市(分别约 10200
529 和 26300km²),县市级行政区域有湖南省南县(约 1320km²),大尺度流域有
530 整个长江流域(流域国土面积约 1800000km²),中尺度流域有横跨北京市与河
531 北省的潮白河流域(约 16500km²),中小尺度流域有内蒙古东部嫩江西岸的欧
532 肯河流域(面积 1600km²),小尺度流域有湖南省长沙县涧山流域(50km²)以
533 及四川省内江市威远县境内的石板河流域(约 35 km²)和成都市天府新区的兴隆

534 湖流域(约 30km²),微尺度流域有四川省盐亭县境内的万安小流域(约 11.9km²)
535 与截留小流域(0.35km²)、辽宁省清原县境内的浑河源头小流域(约 3km²)和
536 青藏高原东部四川省若尔盖县境内的白龙江源头小流域(约 1.89km²),如图 4

537 所示。

538



539

540 图4 高分辨率水文-生物地球化学过程模型CNMM-DNDC的区域或流域测试和
541 应用实例。NPP、NECB、NEGB分别为生态系统净初级生产力、净碳平衡和净
542 温室气体平衡英文缩写。流域出水口水质要素包括硝态氮、铵态氮、总氮、化学
543 耗氧量、总磷等。GHG指温室气体二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化氮(N₂O)。
544 NH₃、NO、ET、SOC和NO₃⁻分别指氨挥发、一氧化氮、蒸散发、土壤有机碳和
545 硝态氮。子图编号索引图3中地图上的位置。

Figure 4 Test and application cases of high-resolution hydro-biogeochemical process 546 547 model--CNMM-DNDC in regions or catchments. Greenhouse gas (GHG) includes carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrogen oxide (N₂O). NPP, NECB and 548 549 NEGB are the abbreviations of net primary productivity, net ecosystem carbon balance and net GHG balance of ecosystem, respectively. The involved variables of 550 551 water quality at the catchment outlet include nitrate, ammonium, total nitrogen, chemical oxygen demand and total phosphorus. NH₃, NO, ET, SOC and NO₃⁻ are 552 referred to ammonia, nitric oxide, evapotranspiration, soil organic carbon and nitrate, 553 respectively. The subgrapph number is indexed to the corresponding location of the 554

555 map in Fig. 3.

556

⁵⁵⁷ 根据这些区域或流域的尺度大小,在 CNMM-DNDC 模拟中采用了不同的水
平空间分辨率。长江流域面积大,其三维模拟应用实施得较早,当时只基于小型
桌面服务器运行模拟测试,考虑到时间成本而采用了较粗的水平空间分辨率
(20km)。其余区域或流域的 CNMM-DNDC 测试或应用则依模拟对象尺度大
小而采用了不同的水平空间分辨率,其中两个省级区域为 1km,中尺度到小尺度
562 区域或流域为 150 到 300m 不等,微尺度流域为 10 到 100m 不等。所有不同尺度
563 区域或流域的模拟,都采用了 3h 时间分辨率。

564 这些区域或流域的模拟目标变量,依当时测试或应用目的不同而有较大差异,
565 有些目标变量比较单一,有些却比较多。所有测试或实际应用中进行模拟预测的
566 目标变量包括生态系统生产力、氮磷流失、GHG 和污染气体排放、流域出水口
567 的水流量和水质要素(NH4⁺、NO3⁻、TN、COD、TP等)以及生态系统净碳平
568 衡等(图 4)。

569 4.2.2 其他应用

570 自 CNMM-DNDC 模型刊发以来,除了上述区域或流域模拟测试和应用,该
模型的其他应用还有:被地方政府构建的水生态决策支持体系平台作为核心模拟
572 计算中枢,被国家大科学装置用于核心模拟计算中枢的分系统模型建设,被GHG
573 足迹定量评估系统用于 GHG 排放和产量的模拟预测工具,被多个国家级研究项
574 目作为核心支撑工具,以及被国际学术组织用作为核心工作模型。

575 在四川省成都市天府新区数字城市建设项目构建的兴隆湖流域水生态实时
576 在线仿真模拟预测平台中, CNMM-DNDC模型被作为核心模拟计算软件直接调
577 用运行,进行上游流域所有三个入湖口的水流量和水质要素(包括 NH4⁺、TN、
578 TP和 COD)通量的 3h 实时在线预测,其预测结果直接提供给平台的湖泊动力
579 学模型调用,以驱动湖水水质及其空间分布的未来 3d 模拟预测,同时提供给平台的流域汇流调度模型,用作调控湖泊水质的流域调水依据,以实现湖水水质达
581 标。

582 在 2022 年 10 月正式建成并投入运行的地球系统数值模拟国家大科学装置一

583 一寰(EarthLab)中,CNMM-DNDC被作为其核心数值模拟软件——中国科学
584 院地球系统模型(CAS-ESM 2.0)的陆地生物地球化学分系统模型。依托该大科
585 学装置提供的算力,CNMM-DNDC已可以10km、3h时空分辨率运行全球陆地
586 生态系统CO₂、CH₄、N₂O、NO和NH₃排放通量的模拟,但以该分辨率运行全
587 球模拟的模型驱动数据的可靠性,尤其生态系统管理数据,还亟待提高。

根据 Zheng 和 Han (2018) 建立的定量方法框架,本文作者构建了农田生态 588 系统温室气体足迹(GHGfp)核算系统。GHGfp是形成单位农产品或作物产量过 589 程发生的 GHG 排放总量,由全生命周期 GHG 排放总量与农产品数量或作物产 590 量之比给出。全生命周期 GHG 排放总量是农田内直接排放量和间接排放量的总 591 和,其中间接排放由种植业生产资料的生产、运输和使用过程中产生的 GHG 排 592 放和发生在农田外的 N₂O 生物源间接排放构成。该 GHG_{fp} 核算系统将 593 CNMM-DNDC 作为模拟作物产量、土壤有机碳库变化、CH4和 N2O 通量的过程 594 模型,并将其与基于排放因子-活动水平乘积法的间接 GHG 排放核算方法进行耦 595 合,从而实现全生命周期 GHG 排放总量和 GHG^{fp} 的核算。该核算系统已经在我 596 国温带和亚热带以及东非热带的玉米种植系统进行了 GHG_{tb}核算测试。 597

598 CNMM-DNDC 已被四个国家重点研发专项项目作为主要工作模型(其中两
599 个"十三·五"计划项目已经结题,两个"十四·五"计划项目正在执行中),被
600 多个国家自然科学基金项目作为核心工作模型,以及被全球农业温室气体研究联
601 盟(GRA)作为农业系统景观管理研究网络的核心工作模型。

602 5 总结与展望

高分辨率水文-生物地球化学过程模型(CNMM-DNDC)自其1.0版本于2018 603 年刊发以来,通过多次科学过程和友好性改进,目前已升级到4.0版本,对于土 604 壤理化条件、生态系统生产力、蒸散、水土流失、水力氮磷流失、碳氮温室气体 605 和污染气体排放等模拟输出变量,当前版已在不同生物气候带主要类型生态系统 606 通过广泛综合观测验证,并在15个区域或流域开展了多个可持续发展目标表征 607 变量的模拟测试或实际应用。显然,该模型的当前版本已经展现出对从热带到寒 608 温带(多年冻土地带)生态系统或流域模拟有较好普适性和可靠性,有望成为服 609 务陆地生态系统碳氮磷水综合调控,特别是支撑多尺度区域或流域减污降碳的虚 610

611 拟科学实验平台和优化管理决策支持工具。

612 当然, CNMM-DNDC 作为一个基于过程的陆地高分辨率水文-生物地球化学
613 过程模型,未来必须广泛验证并应用已有功能,并进一步丰富其科学过程和提升
614 其模拟功能,使其能更好的服务于多尺度区域或流域的可持续发展。该模型拟从
615 以下多个方面推荐其未来应用和发展:

616 首先拟开展其已有模拟功能的全球性广泛验证、优化和应用。具体包括(但617 不限于):

618 1)面向全球不同生物气侯带主要生态系统类型、景观和流域的广泛验证;

619 2)碳氮磷等物质、水文和能量收支与平衡的全面综合验证;

620 3) GHG 和大气或水体面源污染物的高分辨率动态清单编制;

621 4)虚拟科学试验,以揭示碳氮磷水相互作用过程机制,预估长期试验和调

622 控措施的动态结果,筛选区域或流域的环境友好型优化调控对策或方案研究。

623 同时拟致力于其模拟功能拓展与升级。具体包括(但不限于):

624 1)完善磷元素循环过程,进一步全耦合其他元素(如硫和铁等)循环;

625 2)完善地表水生物化学过程和水污染消减机制;

626 3)新增地下水水动力和水质过程,并实现与土壤水物质循环的耦合;

627 4)构建城镇生物地球化学循环模拟模块,并实现与现有碳氮磷水循环过程628 的全耦合;

629 5)构建与现有过程全耦合的废弃物处理系统生物地球化学循环模块;

630 6)新增土壤风蚀过程;

631 7) 实现与大气物理化学过程模型的全耦合。

632

633 参考文献(References)

Deng J, Zhou Z X, Zhu B, Zheng X H, *et al.*, 2011. Modeling nitrogen loading in a
small watershed in southwest China using a DNDC model with hydrological
enhancements. Biogeosciences 8, 2999-3009.

637 Dubache G, Li S Q, Zheng X H, *et al.*, 2019. Modeling ammonia volatilization
638 following urea application to winter cereal fields in the United Kingdom by a

- revised biogeochemical model[J]. Science of the Total Environment, 660:
 1403–1418. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.407.
- Ghimire U, Shrestha N K, Biswas A, *et al.* 2020. A review of ongoing advancements
 in soil and water assessment tool (SWAT) for nitrous oxide (N₂O) modeling[J].
 Atmosphere, 11: 450. doi: 10.3390/atmos11050450.
- Haas E, Klatt S, Fröhlich A, et al. 2013. LandscapeDNDC: a process model for
- simulation of biosphere–atmosphere–hydrosphere exchange processes at site and
 regional scale[J]. Landscape Ecology, 28: 615–636. doi:
 10.1007/s10980-012-9772-x.
- Ferrant S, Oehler F, Durand P, *et al.* 2011. Understanding nitrogen transfer dynamics
 in a small agricultural catchment: Comparison of a distributed (TNT2) and a
 semi distributed (SWAT) modeling approaches[J], Journal of Hydrology, 406,
 1–15.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2006. 2006 IPCC Guidelines for
 National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas
 Inventories Programme, Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, *et al.* (eds).
 Published: IGES, Japan.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2019. 2019 Refinement to the
 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Calvo Buendia
 E, Tanabe K, Kranjc A, *et al.* (eds). Published: IPCC, Switzerland.
- Lal R, Smith P, Jungkunst H F, *et al.* 2018. The carbon sequestration potential of
 terrestrial ecosystems[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 73(6):
 145A–152A. doi: 10.2489/jswc.73.6.145A.
- Li C S, Frolking S, Frolking T A. 1992. A model of nitrous oxide evolution from soil
 driven by rainfall events: 1. model structure and sensitivity[J]. Journal of
 Geophysical Research: Atmospheres, 97 (D9): 9759–9776. doi:
 10.1029/92JD00510.
- Li C S, Qiu J J, Frolking S, et al. 2002. Reduced methane emissions from large-scale

- changes in water management in China's rice paddies during 1980-2000,
 Geophysical Research Letters, 29(20), 1972. doi: 10.1029/2002GL015370
- Li S Q, Zheng X H, Zhang W, et al. 2019. Modeling ammonia volatilization 669 670 following the application of synthetic fertilizers to cultivated uplands with calcareous soils using an improved DNDC biogeochemistry model[J]. The 671 Science of the Total Environment, 660: 931-946. doi: 672 10.1016/j.scitotenv.2018.12.379. 673
- Li S Q, Zhang W, Zheng X H, *et al.* 2022. Update of a biogeochemical model with
 process-based algorithms to predict ammonia volatilization from fertilized
 cultivated uplands and rice paddy fields[J]. Biogeosciences, 19: 3001–3019. doi:
 10.5194/bg-19-3001-2022.
- Li S Q, Zhu B, Zheng X H, et al. 2023. Enabling a process-oriented
 hydro-biogeochemical model to simulate soil erosion and nutrient losses[J].
 Biogeosciences Discussion, 1–51. doi: 10.5194/bg-2022-238.
- Liu C Y, Meng S X, Wang K *et al.* 2011. Effects of irrigation, fertilization and crop
 straw management on nitrous oxide and nitric oxide emissions from a
 wheat-maize rotation field in northern China[J]. Agriculture, Ecosystems and
 Environment, 140: 226–233.
- Liu C Y, Wang K, Zheng X H 2012. Responses of N₂O and CH₄ fluxes to fertilizer
 nitrogen addition rates in an irrigated wheat-maize cropping system in northern
 China. Biogeosciences, 9: 839–850. doi:10.5194/bg-9-1-2012.
- Liu C Y, Wang K, Zheng X H, 2013. Effects of nitrification inhibitors (DCD and
 DMPP) on nitrous oxide emission, crop yield and nitrogen uptake in a
 wheat-maize cropping system. Biogeosciences, 10: 2427–2437,
 doi:10.5194/bg-10-2427-2013.
- Liu C Y, Yao Z S, Wang K, *et al.* 2014. Three-year measurements of nitrous oxide
 emissions from cotton and wheat-maize rotational cropping systems.
 Atmospheric Environment, 96: 201–208.

- Liu C Y, Yao Z S, Wang K, *et al.* 2015. Effects of increasing fertilization rates on
 nitric oxide emission and nitrogen use efficiency in low carbon calcareous soil.
 Agriculture, Ecosystems and Environment, 203: 83–92.
- Maharjan G R, Prescher A-K, Nendel C, *et al.* 2018. Approaches to model the impact
 of tillage implements on soil physical and nutrient properties in different
 agro-ecosystem models[J]. Soil and Tillage Research, 180: 210–221. doi:
 10.1016/j.still.2018.03.009.
- Mekonnen H D, Sintayehu W D. 2018. The Role of Biodiversity and Ecosystem
 Services in Carbon Sequestration and its Implication for Climate Change
 Mitigation[J]. International Journal of Environmental Sciences and Natural
 Resources, 11(2): 555810. doi: 10.19080/IJESNR.2018.11.555810.
- Nyawira S S, Hartman M D, Nguyen T H, *et al.* 2021. Simulating soil organic carbon
 in maize-based systems under improved agronomic management in Western
 Kenya. Soil and Tillage Research 211, 105000.
- Rose C W. 1985. Developments in Soil Erosion and Deposition Models[M],
 Advances in Soil Science. New York: Springer, 1–63.
- Schroeck A M, Gaube V, Hass E, *et al.* 2019. 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]. The Science
 of Total Environment, 665: 275–289.
- Sommer R, Mukalama J, Kihara J, *et al.* 2016. Nitrogen dynamics and nitrous oxide
 emissions in a long-term trial on integrated soil fertility management in Western
 Kenya. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 105: 229–248.
- Sommer R, Paul B, Mukalama J, *et al.* 2018. Reducing losses but failing to sequester
 carbon in soils the case of Conservation Agriculture and Integrated Soil
 Fertility Management in the humid tropical agro-ecosystem of Western Kenya.
 Agriculture, Ecosystems and Environment, 254: 82–91.
- 722 Wang K, Zheng X H, Pihlatie M, et al. 2013a. Comparison between static chamber

- and tunable diode laser-based eddy covariance techniques for measuring nitrous
 oxide fluxes from a cotton field. Agricultural and Forest Meteorology, 171–172:
 9–19.
- Wang K, Liu C Y, Zheng X H, *et al.* 2013b. Comparison between eddy covariance and
 automatic chamber techniques for measuring net ecosystem exchange of carbon
 dioxide in cotton and wheat fields. Biogeosciences, 10: 6865–6877,
 doi:10.5194/bg-10-1-2013.
- Wang Y, Yao Z S, Pan Z L, *et al.* 2020. Tea-planted soils as global hotspots for N₂O
 emissions from croplands[J], Environmental Research Letters, 15(10): 104018.
 doi: 10.1088/1748-9326/aba5b2.
- Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P 1994. A distributed hydrology-vegetation
 model for complex terrain[J]. Water Resources Research, 30(6): 1665–1679. doi:
 10.1029/94wr00436.
- Yao Z S, Zheng X H, Liu C Y *et al.* 2018. Stand age amplifies greenhouse gas and
 NO releases following conversion of rice paddy to tea plantations in subtropical
 China[J], Agricultural and Forest Meteorology, 248: 386–396.
- Yu G R, Li X R, Wang Q F, *et al.* 2010. Carbon storage and its spatial pattern of
 terrestrial ecosystem in China[J]. Journal of Resources and Ecology, 1(2):
 97–109. doi: 10.3969/j.issn.1674-764x.2010.02.001.
- Yue H Y, Liu C Y, Zhang W *et al.* 2022. How to improve cumulative methane and
 nitrous oxide flux estimations of the non-steady-state chamber method?[J]
 Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 127: e2021JG006641. doi:
 org/10.1029/2021JG006641.
- Zhang W, Li Y, Zhu B, *et al.* 2018. A process-oriented hydro-biogeochemical model
 enabling simulation of gaseous carbon and nitrogen emissions and hydrologic
 nitrogen losses from a subtropical catchment[J]. The Science of Total
 Environment, 616–617: 305–317. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.261.
- 750 Zhang W, Yao Z S, Li S Q, et al. 2021a. An improved process-oriented

- hydro-biogeochemical model for simulating dynamic fluxes of methane and
 nitrous oxide in alpine ecosystems with seasonally frozen soils[J].
 Biogeosciences, 18: 4211–4225. doi: 10.5194/bg-18-4211-2021.
- Zhang W, Li S Q, Han S H, *et al.* 2021b. Less intensive nitrate leaching from
 Phaeozems cultivated with maize generally occurs in northeastern China[J].
 Agriculture, Ecosystems and Environment, 310: 107303. doi:
 10.1016/j.agee.2021.107303.
- Zhang W, Yao Z S, Zheng X H, *et al.* 2020. Effects of fertilization and stand age on
 N₂O and NO emissions from tea plantations: a site-scale study in a subtropical
 region using a modified biogeochemical model[J]. Atmospheric Chemistry and
 Physics, 20: 6903–6919. doi: 10.5194/acp-20-6903-2020.
- Zhang Y, Chen W, Cihlar J. 2003. A process-based model for quantifying the impact
 of climate change on permafrost thermal regimes, Journal of Geophysical
 Research: Atmospheres, 108(D22): 4695. doi: 10.1029/2002JD003354.
- Zheng X H, Han S H. 2018. A generic method framework for accurately quantifying
 greenhouse gas footprints of crop cultivation systems[J], Atmospheric and
 Oceanic Science Letters, 11(1): 15–28.
- 768 邓鹏,李致家. 2013. 3 种水文模型在淮河息县流域洪水模拟中的比较[J]. 河海大
 学学报(自然科学版), 41(05): 377-382. Deng P, Li Z J. 2013. Comparison of
 three hydrological models in flood simulation for Xixian Basin of Huaihe
 River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 41(05): 377-382. doi:
 10.3876/j.issn.1000-1980.2013.05.001.
- 773 冯起, 尹振良, 席海洋. 2014. 流域生态水文模型研究和问题[J]. 第四纪研究,
- 34(05): 1082–1093. Feng Q, Yin Z L, Xi H Y. 2014. Review and Issues of
 Eco-Hydrological Models of Watershed Scale[J]. Quaternary Science, 34(05):
 1082–1093. doi: 10..3969/j.issn.1001-7410.2014.05.17.
- 777 江净超,朱阿兴,秦承志,等. 2014. 分布式水文模型软件系统研究综述[J]. 地理
 778 科学进展, 33(08): 1090-1100. Jiang J C, Zhu A X, Qin C Z, *et al.* 2014. Review

- on Distributed Hydrological Modelling Software Systems[J]. Progress in
 Geography, 33(08): 1090–1100. doi: 10.11820/dlkxjz.2014.08.009.
- 781 李长生(著),2016. 生物地球化学:科学基础与模型方法[M],清华大学出版社,
- 1. Li C S 2016. Biogeochemistry: Scientific Fundamentals and Modeling
 Approach[M], Beijing: Tsinghua University Press.
- 784 李思琪, 李勇, 张伟, 等. 2022. 应用 CNMM-DNDC 模拟小流域土壤水力侵蚀和 颗粒态碳氮磷迁移[J],中国生态农业学报(中英文),30(9):1511-1521. LiS 785 Q, Li Y, Zhang W, et al. 2022. Simulation of water-induced erosion and transport 786 of particulate elements in a catchment by extending the CNMM-DNDC model[J]. 787 Chinese Journal of Eco-Agriculture, 30(9): 1511-1521. doi: 788 10.12357/cjea.20210781. 789
- 790 李勇, 沈健林, 王毅, 等. 2017. 分布式栅格流域环境系统模拟模型及应用[M].
- ⁷⁹¹ 北京:科学出版社. Li Y, Shen J, Wang Y, *et al.* 2017. CNMM: a Grid-Based
 ⁷⁹² Spatially-Distributed Catchment Simulation Model[M], Beijing: China Science
 ⁷⁹³ Press.
- 794 刘柯李. 2017. 万安小流域农业景观格局演变的生态系统服务响应研究[D]. 成都
 795 理工大学硕士学位论文. Liu K L. 2017. Response of Ecosystem Services to the
 796 Evolution of Agricultural Landscape Patterns in Wan'an Small Watershed[D]. M.
 797 S. thesis (in Chinese), Chengdu University of Technology.
- 彭辉, 贾仰文, 龚家国, 等. 2010. 陆地生态系统模型及其与流域水文模型耦合的 798 研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 8(03): 208-213. Peng H, Jia Y 799 W, Gong J G, et al. 2010. Research Advance in Terrestrial Ecosystem Models 800 and their Coupling with Hydrological Models[J]. Journal of China Institute of 801 Water Resources and Hydropower Research, 8(03): 208-213. doi: 802 803 10.13244/j.cnki.jiwhr.2010.03.005.
- 石教智,陈晓宏. 2006. 流域水文模型研究进展[J]. 水文, 26(01): 18-23. Shi J,
 Chen X H. 2006. Situation in the Research on Watershed Hydrologic Models[J]
 Journal of China Hydrology, 26(01): 18-23. doi:

- 807 10.3969/j.issn.1000-0852.2006.01.005.
- 808 杨大文, 徐宗学, 李哲, 等. 2018. 水文学研究进展与展望[J]. 地理科学进展,
- 809 37(01): 36–45. Yang D W, Xu Z X, Li Z, et al. 2018. Progress and Prospect of
- 810 Hydrological Sciences[J]. Progress in Geography, 37(1): 36-45. doi:
 811 10.18306/dlkxjz.2018.01.005.
- 于贵瑞,高扬,王秋凤,等. 2013. 陆地生态系统碳氮水循环的关键耦合过程及其
 生物调控机制探讨[J]. 中国生态农业学报, 21(01): 1–13. Yu G R, Gao Y,
 Wang Q F, *et al.* 2013. Discussion on the Key Processes of
 Carbon-nitrogen-water Coupling Cycles and Biological Regulation Mechanisms
 in Terrestrial Ecosystem[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 21(01): 1–13.
 doi: 10.3724/SP.J.1011.2013.00001.
- 于贵瑞, 王秋凤, 方华军. 2014. 陆地生态系统碳-氮-水耦合循环的基本科学问题、
 理论框架与研究方法[J]. 第四纪研究, 34(04): 683-698. Yu G R, Wang Q F,
 Fang H. J. 2014. Fundamental Scientific Issues, Theoretical Framework and
 Relative Research Methods of Carbon-nitrogen-water Coupling Cycles in
 Terrestrial Ecosystems[J]. Quaternary Science, 34(04): 683-698. doi:
 10.3969/j.issn.1001-7410.2014.04.01.

11~