

地理系统模型研究进展

彭书时^{1*}, 朴世龙¹, 于家烁¹, 刘永稳¹, 汪涛², 朱高峰³, 董金玮⁴, 缪驰远⁵

(1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101;
3. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
5. 北京师范大学地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:地理系统是多圈层交互的复杂巨系统。地理系统模型是理解和预测不同尺度地理系统格局和过程变化最重要的研究方法。地理系统模型作为可持续发展科学决策必需的工具,是自然地理学重要的研究方向。过去几十年来,在全球变化等全球性重大环境问题和人类科学决策需求的推动下,地理系统模型虽然发展迅速,但还不足以准确地模拟和预测复杂人地耦合系统。本文分别从模型原理、框架和尺度等方面回顾与梳理了地理系统模型从单要素到多要素、从统计到过程、从静态到动态、从单点到区域和全球尺度模拟等发展历程,并总结了地理系统模型对发展人类—自然耦合系统以及模型—数据融合系统的趋势。发展中国的地理系统模型将有助于中国和全球可持续发展的科学决策。

关键词:地理系统模型;过程模型;人地耦合系统;可持续发展;模型—数据融合

1 引言

“地理系统”一词源自科钱学森先生1988年提出的“地理科学必须用系统科学的方法”,“地理系统是一种复杂巨系统,开放的复杂巨系统”。在此基础上,1991年陈述彭先生提出,“地理系统把地理环境看作是一个运动着的发生和发展中的世界,包括人类赖以生存和生活并强加影响的整个自然环境和社会经济环境。”(陈述彭,1991)。地球在长期演化过程中,形成了典型的圈层结构,如岩圈、水圈、大气圈和生物圈。相比于部门地理学比较侧重其中某一圈层的机制、形成过程和区域分异等,地理系统则更多地着眼于圈层之间的界面及其物质流、能量流与信息流的关系,更多关注人地关系高度复合地带和生态环境脆弱地带。整体上看,地理系统是由多层次嵌套组成的循环系统与开放系统,

每个子系统进行各自的物质迁移、能量转换与信息传输的内部循环;同时通过高层次的外部循环与其他圈层发生关联。地理系统具有非线性、多层次、多尺度、突变性、随机性、自组织、自相似等复杂系统特点,地理学家需要用复杂理论和方法来进行研究(蔡运龙,2000)。

全球变化、环境和资源利用等地理系统中正在发生的全球性重大环境问题与人类发展密切相关。鉴于此,学界对耦合自然系统和人类活动的地理系统进行了深入研究,并试图为人类未来的可持续发展提供科学决策。地理系统模型是从地理系统的整体出发,以多个角度对地理要素进行分析,对地理整体的结构和功能进行分析,在此基础上进行模拟系统的构建,是融合了数学模型和计算机技术等多种技术手段对地理系统进行空间上的虚拟,达到实验、观察和研究的目的。通过这些模拟,地

收稿日期:2017-12-21;修订日期:2018-01-13。

基金项目:国家自然科学基金项目(L1624026);中国科学院学部学科发展战略研究项目(2016-DX-C-02);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0500203) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.L1624026; Research Project on the Development Strategy of Chinese Academy of Sciences, No.2016-DX-C-02; National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC0500203]。

作者简介:彭书时(1986-),男,湖北武穴人,研究员,研究方向为全球变化与陆地生态系统,E-mail: speng@pku.edu.cn。

引用格式:彭书时, 朴世龙, 于家烁, 等. 2018. 地理系统模型研究进展[J]. 地理科学进展, 37(1): 109-120. [Peng S S, Piao S L, Yu J S, et al. 2018. A review of geographical system models[J]. Progress in Geography, 37(1): 109-120.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.012

理学家实现了对地球系统的时空变化及其相互作用的模拟,促进了地理研究从状态与格局研究发展到过程模拟与系统预测研究。这些为理解和解释地理系统的特征、预测和控制地理系统的行为提供了科学的方法,形成了以方程为基础的算式计算模型,因而也进一步促进了地理研究的科学水平(周成虎等, 2009)。

地理系统模型是理解和预测不同尺度地理系统格局和过程变化最重要的研究方法。经过几十年的迅速发展,地理系统模型已成为人地关系科学决策时必不可少的工具,也是自然地理学未来重要的研究方向。回顾地理系统模型的发展历程,不仅有助于了解地理学是如何逐渐着重于模拟和预测复杂的人地系统,而且有助于理解地理学在定量化和综合化方向上的发展趋势和研究重点。本文梳理了地理系统模型从单要素到多要素、从统计到过程、从静态到动态、从单点到区域和全球尺度模拟等发展历程,并总结了在当今地球系统科学蓬勃发展之际,人类—自然耦合系统以及模型—数据融合系统的发展趋势(图1)。

2 地理系统模型的发展历程

地理系统模型的发展历程与地理学走向模型模拟和预测密不可分(傅伯杰, 2017)。地理系统模型的发展符合地理学的发展规律,总体来说是逐步走向综合和定量的趋势。从模型的原理、框架、尺度等方面出发,本文回顾和梳理了地理系统模型的具体发展历程。

2.1 从统计到过程

统计模型是采用观测资料,选取影响因变量的相关因素,或根据预测变量的时间序列,基于数理统计方法建立统计模型,继而对变量进行模拟和预测。即使对地表过程和机理了解不足,或无法定量描述复杂的地表过程及其相互作用,统计模型仍可通过观测数据和简单的因果关系定量模拟和推测变量的动态变化,因此被广泛应用于地理过程模拟。例如,水文统计(如频率分析、回归和相关性分析、水文资料生成、随机模型和水文时间序列分析等)可用于水文事件的分析和预测(徐乾清, 2004),如年洪峰流量、年径流量、各种雨量、泥沙、水位等水文特征。在植被生产力估算方面,1971年, Lieth提出了经典的生产力统计模型—Miami模型(Lieth, 1975)。该模型利用全球53个样点的观测数据,以多年平均年降水量和年均温作为自变量,用最小二乘法建立了植被净初级生产力(NPP)的回归方程,从而基于全球年均温和年降水量气候数据得到了全球NPP空间分布图。

统计模型虽然简单易行,但由于缺乏对内在机理和过程的刻画,难以进行定量归因分析和预测未来(Bonan, 2016)。而基于地表过程的机理模型解决了这一难题,被广泛应用于地理学归因、预测和决策。例如,朱再春等(Zhu et al, 2016)使用TRENDY模型的输出结果,定量分析了全球尺度多种环境因子对植被叶面积指数(LAI)上升的贡献,发现了CO₂施肥效应贡献了约70%,氮沉降、气候变化及土地利用变化分别贡献了9%、8%和4%。过程模型也常

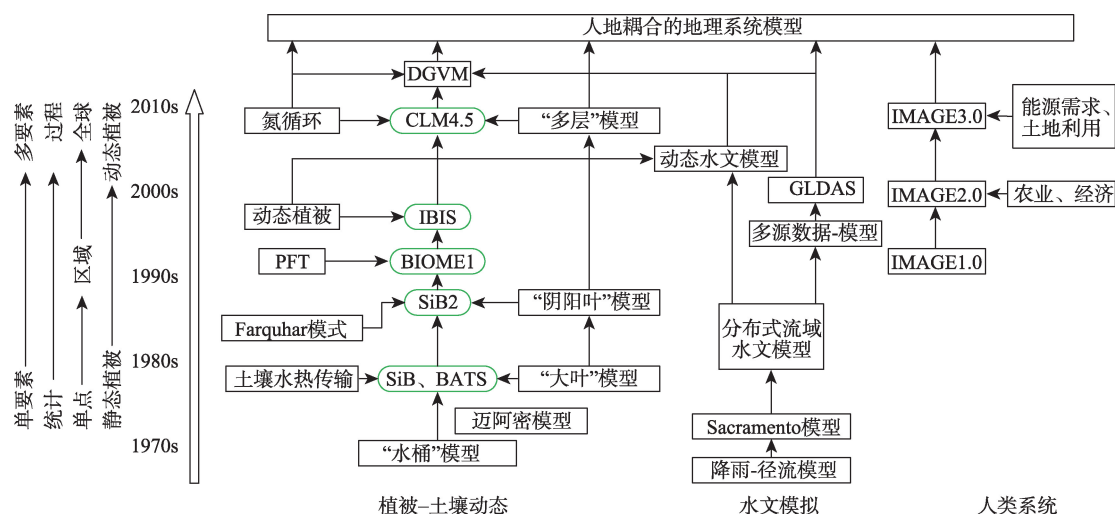


图1 地理系统模型发展历程

Fig.1 Evolution of geographical system models

应用于水文预报和水资源管理(Arnold et al, 2012)、生态系统生产力变化(Piao et al, 2013)和植被动态对气候系统反馈作用(Zeng et al, 2017)等地理学研究。ISIMIP 模型比较计划(The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, ISIMIP, <https://www.isimip.org/>)基于过程模型探讨全球变化对地表过程和人类社会影响,其研究结果已经成为政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change)报告中模拟过去和预测未来全球变化对地表和人类社会影响的主要依据(Stocker et al, 2013; Warszawski et al, 2014; McSweeney et al, 2016; Frieler et al, 2017)。ISIMIP 的部分结果可参见 2014 年《美国科学院院刊》第 111 期题为“Global Climate Impacts: A Cross-Sector, Multi-Model Assessment Special Feature”的专辑(http://www.pnas.org/cgi/collection/global_climate)。目前,参与 ISIMIP 的过程模型已经完成对未来不同典型浓度路径情景下(Representative concentration pathways, RCPs, 人为碳排放由低到高分别为 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5)水资源、洪涝灾害、生物圈、冻土、农业影响的预测。这有助于深入理解气候变化和人类活动下地表关键过程的内在机理和过程,并为决策者制定相关政策提供了科学依据(Ricke et al, 2015; McSweeney et al, 2016; Frieler et al, 2017; Veldkamp et al, 2017)。

2.2 从单要素到多要素

为解决水资源管理、洪水预测、土壤侵蚀估算、植被物候和生产力等科学和管理问题,单要素模型早就应用于水文、土壤、植被等各个部门地理学研究领域,以解决水资源管理、洪水预测、土壤侵蚀估算、植被物候和生产力等科学和管理问题(Wischmeier et al, 1978; Morgan et al, 1998; 王中根等, 2003; Stöckli et al, 2008;)。单要素模型的主要特点是简化复杂的地表过程,只模拟相对单一的地表过程。例如,降水-径流过程水文模型,模拟和预测径流时主要利用简化和易于处理的水文过程,却简化或忽略植被影响蒸腾等相对复杂的过程。1973 年, Burnash 等提出萨克拉门托(Sacramento Soil Moisture Accounting, SAC-SMA)模型,利用概念化的储水库来近似实际的土壤水分,并模拟径流的生成,刻画了在一个地表系统中降水后,水分的迁移和运动情况(Singh, 1995),这是现代水文模型的雏形。现代发展的流域水文模型和分布式水文模型,包括新安江模型、Sacramento 模型、Tank 模型、SHE 模

型、IHDM 模型、SWAT 模型等(王中根等, 2003),皆以水循环过程为核心,逐步考虑其它地表过程,更为准确的进行水文预测,从而更好地为水文预报和水资源管理服务。土壤流失模型(Revised Universal Soil Loss Equation)已广泛应用于土壤侵蚀估算(Renard et al, 1997; Nyakatawa et al, 2001)。此外,单因素模型在模拟植被物候和生产力等方面也有很多应用,例如生长季指数(GSI)模型考虑了已知外界因子包括温度、昼夜和饱和水汽压,得到 GSI 的季节动态,用于定量预报物候事件(Jolly et al, 2005; Stöckli et al, 2008);光能利用效率模型考虑了植被最大光能利用效率(LUE_{max})、环境因子(如温度、水分条件等)对 LUE 的限制作用、可吸收的有效光合辐射,模拟植被总初级生产力或净初级生产力(Zhao et al, 2010)。

地球表层系统是由岩石圈、土壤圈、水圈、大气圈、生物圈和人类圈所构成的地表自然社会综合体。地表过程之间紧密耦合,单要素模型难以模拟复杂的地表过程耦合,因此,多要素综合模型的发展是地理系统模型的必然之路(Bonan, 2016)。例如,为了更准确地模拟和预测地表过程,水文模型模拟蒸腾作用时须考虑植被光合作用过程,而植被碳循环模型需考虑土壤水分等水循环过程。预测未来全球气候变化亦得益于地表多要素综合模型的发展,例如碳-氮-水等多要素耦合(Stocker et al, 2013)。碳-氮-水耦合模型有助于深入理解陆地生态系统对全球变化的响应和适应规律,更准确地评估和预测陆地生态系统碳汇功能的变化(Stocker et al, 2013)。纵观目前国际主流模型的发展历程,例如 CLM1.0 到 CLM4.5(Oleson et al, 2004; Lawrence et al, 2007; Oleson et al, 2010; Lawrence et al, 2011), ORCHIDEE 到 ORCHIDEE-MICT、ORCHIDEE-CNP 等(Krinner et al, 2005; Goll et al, 2017; Guimberteau et al, 2017),地理系统模型的发展越来越趋向于多要素综合模型。

2.3 从静态到动态

早期在水文模型和大气环流模式(GCM)中,下垫面均被设置为静态,如:静态植被(Manabe, 1969; Henderson-Sellers et al, 1993; 梁顺林等, 2013)。然而,现实中,下垫面并非一成不变。土地利用和覆盖、植被过程及植被属性、土壤属性等变化均会改变下垫面,并因此影响能量平衡、碳水循环过程以及其它陆地大气耦合过程。模型中假设的静态植被或土地覆盖难以准确模拟历史和预测未来变化

(Carson et al, 1981; Bonan, 2016)。随着植被生理生态过程和植被动态研究的逐渐深入,以及IGBP等计划强调碳循环对气候系统影响的重要性,植被动态过程模型应运而生,用于研究陆地碳循环过程和土壤—植被—大气的相互作用关系。

早期植被动态模型主要包括:生物地理模型(Biogeography Models)、生物地球化学模型(Biogeochemistry Models)、生物物理模型(Biophysical Models)和森林林窗模型(Forest Patch or Gap Models)等(Foley et al, 1996; Hurtt et al, 1998; Levis et al, 2004; 毛留喜等, 2006; 车明亮等, 2014; 陈报章, 2017)。生物地理模型基于生态生理约束和资源限制理论(Prentice et al, 1991; 车明亮等, 2014),根据植被生理、生态特性及气候因素,通过统计方法将植被类型归并为植被功能型(Plant Functional Types, PFTs),继而模拟全球潜在PFT分布,如BIOME1和MAPSS模型。早期生物地球化学模型主要基于气候和土壤特征设计,通过输入静态的全球植被、土壤分布类型,模拟全球植被生产力和碳储量等,其代表性模型为TEM、CENTRUY、CASA、BIOME-BGC。生物物理模型同样基于静态的植被、土壤类型分布,但可与气候模式耦合,模拟陆—气交互作用,其代表性模型为BATS、SIB、LSM、CoLM、EASS等。以上模型虽然都引入了植被过程,但输入的植被覆盖空间分布是静态的,并不具有模拟植被动态变化的功能。森林林窗模型(例如JABOWA、FORGAR、ED等)能在林窗尺度上模拟树木在环境变化下的生长、死亡和物种更替等动态变化。但,该类模型由于计算量过大,只适用于小尺度生态系统演替研究,而不适用于全球植被动态研究(车明亮等, 2014; 陈报章, 2017)。

随着全球变化和陆地生态系统研究领域的发展,为深入研究陆地生态系统对全球变化的响应及其反馈,全球植被动态模型(Dynamic global vegetation models, DGVMs)迅速发展(Prentice et al, 2007)。DGVM可以模拟陆地生态系统中植被生长、竞争及随气候演变等过程,动态地模拟植被分布和陆地生态系统的能量、碳、水循环过程(Prentice et al, 2007; Zhu et al, 2015)。当前国际上广泛应用的DGVMs包括IBIS(Foley et al, 1996), CLM(Lawrence et al, 2011), JULES(Clark D B et al, 2011), LPJ(Sitch et al, 2003; Le Quéré et al, 2015), LPJ-GUESS(Lindeskog et al, 2013; Le Quéré et al, 2015), LPX-Bern(Stocker et al, 2011), OCN(Zaehle

et al, 2010), ORCHIDEE(Krinner et al, 2005)等。国内研发的代表性DGVM包括IAP-DGVM(Zeng et al, 2014)和DLM-DGVM(陈报章, 2017)等。这些DGVM的框架设计有所不同,但都以气候数据、大气CO₂浓度和土壤数据等为驱动数据,模拟了植被的生理过程、植被动态、植被物候和营养物质循环等(Prentice et al, 2007; 王旭峰等, 2009; 车明亮等, 2014)。DGVM是模拟和预测地表能量平衡、碳氮水循环等过程的有效工具,动态植被模型的发展、改进和应用也是目前多个国际项目(Future Earth, CMIP5, MsTMIP, TRENDY, ISIMIP, C4MIP等)的主要目标之一。

2.4 从单点到区域和全球

地表过程模拟的空间尺度包括:单点尺度、区域尺度、全球尺度。在单点或特征相似的区域模拟时,模型所需输入数据的可获取性和质量通常较好,且模型参数化工作也相对比较简单。但是,随着近几十年来全球变化问题日益突出,为了回答区域和全球性相关科学问题,需要开展区域和全球尺度地表过程模拟。与此同时,全球陆地观测系统(GTOS)、全球气候观测系统(GCOS)、世界气候研究计划(WCRP)和国际地圈生物圈计划(IGBP)等国际计划和研究项目的广泛实施,一方面为全球尺度模拟提供了观测数据和理论支持;另一方面,全球尺度的模型研究也是众多计划和项目的重要分析和研究工具(Bonan, 2016)。

目前,水文模型和碳循环模拟都存在空间尺度扩大的需求和发展趋势(Bonan, 2016)。早期,农作物蒸散、水量平衡模型都在田间和小流域尺度得到了很好的模拟(Mohan et al, 1995; 胡和平等, 2004; 汤秋鸿等, 2004)。当前,国内外田间尺度的水文模拟研究在观测和物理过程的模拟精度方面已达到较高水平(中国科学院, 2016)。自20世纪70到80年代以来,地理信息系统(GIS)和遥感(RS)等技术的发展,描述流域下垫面空间分布信息的技术以及模型所需的大尺度数据日益完善,为流域尺度上的分布式数字水文模拟奠定了基础(任立良, 2000),例如SHE模型、Susa流域模型、CASC2D模型、SWMM模型、SWAT模型等(吴险峰等, 2002; 中国科学院, 2016)。近几十年来,全球水资源问题日益突出,加之许多国际观测与研究项目的实施,推动了全球尺度上水文模拟的研究。与水文模型类似,碳循环模拟也随着遥感和GIS等技术的发展,从单点模拟发展到区域和全球尺度模拟(Cramer et al, 2001; Mc-

Guire et al, 2001; Huntzinger et al, 2013; Raczka et al, 2013; Sitch et al, 2015)。模型通常在单点尺度上基于观测数据校准参数,然后再基于校准好的参数,模拟区域和全球尺度的格局和过程。区域和全球尺度碳水循环过程的模拟对评估陆地生态系统碳源汇、水资源可持续利用、粮食安全和生态系统服务功能等研究都具有重要意义(Gerten et al, 2004; Harris et al, 2006; Schmidhuber et al, 2007; Sitch et al, 2015),可为国家和全球减缓和应对气候变化、资源利用等环境问题的政策制定提供科学依据。

3 地理系统模型的发展趋势

目前,地理系统模型仍然比较偏重自然过程,对人类活动和人类社会的刻画不足,还难以准确地模拟复杂人地系统和预测未来的人地系统。因此,在可持续发展的框架下,人类—自然系统耦合是地理系统模型的主要发展趋势之一。另外,模型和数据融合也是地理系统模型通向精确预测之路的主要发展趋势之一。

3.1 人类—自然系统耦合

自工业革命以来,人类活动深刻地改变了地表环境、气候系统以及生态系统结构和功能(Stocker et al, 2013)。人类所排放的CO₂等温室气体是全球变暖最主要的驱动因素(Grace, 2005; Stocker et al, 2013)。另外,土地利用与覆盖变化也是人类活动影响地表系统的重要形式。过去300年中,地球陆地表层42%~68%的面积受人类活动影响(Hurt et al, 2006)。农业用地(包括耕作和放牧用地)是受人类活动影响最强烈的用地类型之一,约占全球土地面积的40%(Foley et al, 2005, 2011)。此外,人为管理和干扰活动也会对生态系统物质能量循环产生影响。例如,约20%~30%的可利用地表水用于作物灌溉(Millennium Ecosystem Assessment, 2005),显著影响局部土壤水分及地表径流;人工施肥和作物种植导致输入生物圈的活性氮增加,这部分增加量甚至超过了自然固氮量(Galloway et al, 1995; Smil, 1999)。对自然系统的人为干扰,例如对火灾频率的改变会影响植被的演替和物种组成,也会对生态系统结构和功能产生影响(Rabin et al, 2017)。

人类活动对地表系统的影响日益加剧的同时,人类的发展也依赖于地表系统所提供的水、土、气、生物等各类资源。目前,为了应对人类社会可持续

发展所面临的严峻挑战,准确模拟和预测复杂的人地系统至关重要。因此,在自然地表系统模型中耦合人类活动是地理系统模式发展的必然方向。自上世纪80年代以来,耦合自然系统和人类社会经济模型概念被提出后,全球开发出超过20个Integrated Assessment Models(IAMs),为气候变化政策提供科学依据。其中,荷兰环境评估局(PBL Netherlands Environmental Assessment Agency)所开发的全球环境评估整合模式框架(Integrated Model to Assess the Global Environment Framework, IMAGE)是全球IAMs的代表性模型之一。IMAGE框架考虑人口密度变化、资源可得性、地形和农业生产率,使用适宜性评估和迭代分配的方法来评估农业用地的扩张、分配各土地利用类型面积对环境造成的影响;根据能源系统、工业、农业和土地利用变化等方面的活动强度以及减排力度,可评估人为排放的温室气体和污染物等政策的有效性(Stehfest et al, 2014)。IMAGE主要用于评估土地利用变化和人为排放两个方面政策对气候变化的影响(Stehfest et al, 2014)。

IMAGE的最新版本V3.0(Stehfest et al, 2014)定义了不同的经济—社会发展情景下(van Vuuren et al, 2012),人类活动(如人口变化、经济发展、生活方式、政策及技术发展等)对未来全球环境变化的影响。IMAGE模型内部加入的人类活动包括能量供需和农业系统;其中能源供需部分使用能量区域模型(The IMAGE Energy Regional model, TIMER)(De Vries et al, 2001),通过人口、收入及消费水平模拟能源需求,并使其与终端能源载体相匹配,同时考虑了技术发展、煤炭及多种替代能源的供应情况,用于综合描述能量系统的动态。此外,IMAGE还考虑了木材需求和森林管理等对经济和环境的影响。农业系统部分使用农业—经济软联结模型MAGNET(Woltjer et al, 2011)或IMPACT(Component Agricultural economy)模型(Rosegrant et al, 2012),主要通过考虑技术和生物物理条件,评估区域农作物和畜产品产量水平。具体而言,农业系统部分是通过设置不同的假设情景,输入土地供应和潜在作物产量,并考虑全球和区域贸易过程,模拟未来区域农作物生产水平和强度及多个畜牧业生产系统的产量。

总之,IAMs的框架将人类社会经济系统的模拟和自然系统进行耦合,探究了人类发展对自然系统和自身生存环境的影响和反馈,是研究人地关系

和人类可持续发展的重要工具。然而,现有的IAMs中自然系统和人类社会—经济活动的过程仍比较简单,如何耦合复杂的人类活动和地表过程模式依然是目前人地关系模拟研究的重要发展方向(Liverman et al, 2013)。

3.2 模型和数据融合

近数十年来,模型作为地球系统科学研究的基本方法之一,取得了十分显著的进步。但是,由于模型自身的缺陷、模型参数误差和观测数据误差等原因,不同模型的模拟结果差异较大,导致陆地生态系统关键过程(碳循环、水循环等)的模拟和预测还存在很大的不确定性(方精云等, 2011)。“数据—模型融合(Model-data Fusion)”方法将模型与实验和观测数据有效融合,并定量表达不同尺度过程的不确定性,是当前地球系统科学的研究热点(Clark et al, 2006b; Zhu et al, 2014)。“数据—模型融合”的基本思想为:充分利用已有观测数据,通过数学方法调整模型的参数或状态变量,使模拟结果与观测数据之间达到一种最佳匹配关系,从而更准确地认识和预测系统状态的变化(Scholze et al, 2007; 张黎等, 2009)。目前,数据—模型融合方法的实现途径主要包括:“参数估计”、“数据同化”和“模型—参数同步估计”(Trudinger et al, 2007)。

参数估计主要通过优化模型参数达到提高预测效果的目的(Richardson et al, 2010; Pokhrel et al, 2012)。当模型结构一定时,模型参数成为刻画系统特征的核心变量。只有合理确定了模型参数,才能得到合理的模拟结果,并对模型参数和结构存在的问题有清晰的认识(Williams et al, 2009)。因此,参数估计方法一直是地球系统科学“数据—模型融合”领域的研究热点,并得到有关研究组织和团体的高度重视。例如,全球碳计划(Global Carbon Project)就陆地碳循环和生物地球化学模型参数估计问题设立了“参数优化方法比较专项”(Optimization Inter-comparison Project)(Trudinger et al, 2007);英国谢菲尔德大学Fox教授领导的“区域通量估计实验”(Regional Flux Estimation eXperiment, REFLEX)旨在利用通量数据估计碳循环模型参数(Fox et al, 2009);中国科学家段青云教授领导的国际模型参数估计实验(Model Parameter Estimation Experiment; MOPEX)的主要目标是发展新的水文/大气模型参数估计方法(Duan et al, 2006)。纵观这些研究,参数估计方法主要包括:梯度方法、卡尔曼滤波方法、遗传算法、模拟退火方法、复形洗牌算

法、蒙特卡洛方法、马尔科夫蒙特卡洛方法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)和顺序蒙特卡洛(sequential Monte Carlo; SMC)等。其中,马尔科夫蒙特卡洛方法具有融合多源观测数据、多尺度过程,调和不确定性影响的优势,是一种反演模型参数、评估由参数引起的模拟结果不确定性的有效方法(Zhu et al, 2014)。多源数据(涡度相关通量数据、生物计量数据和卫星遥感数据)在模型参数不确定性较少和估计参数的维数较单源数据具有明显优势(Richardson et al, 2010)。值得注意的是,模型与观测数据之间误差分布形式的选择对参数估计结果影响比较大(Trudinger et al, 2007)。尽管参数估计方法已取得了很大的进展,但是,这种基于模型与观测达到最佳匹配的数据—模型融合方法在定量表述输入数据误差、观测误差和模型结构误差方面还存在明显的不足。

数据同化主要通过依靠观测数据不断调整模型运行轨迹,优化状态变量的模拟结果(李新等, 2010)。目前,各种数据同化方法可归纳为2类:一类是建立在控制论基础上的全局拟合(Li et al, 2004);另一类是建立在估计论基础上的顺序同化(Sequential Data Assimilation)(李新等, 2010)。全局拟合数据同化方法以变分方法为代表,基于最优控制理论,在一个同化的时间窗口内,构建模拟值与观测值以及背景场之间偏差为目标函数,通过全局优化算法寻求目标函数的全局最小,从而获得整个同化时段的最优同化值(王文等, 2009)。顺序同化方法是指在系统运行过程中,当有观测时刻,利用观测信息在观测和模型误差分别加权的基础上对模型状态进行更新,从而获得模型状态的后验优化估计;状态更新后,模型利用新的状态重新初始化,继续向前积分,直到获得新的观测信息(李新等, 2010)。这种方法能显式地表达输入数据误差、模型结构误差和观测误差,以达到模型模拟结果和观测之间的最优融合(Vrugt et al, 2005)。传统上,顺序同化方法以针对线性系统的卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF; Kalman, 1960)和针对非线性系统的扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)为代表,但EKF需要计算模型算子和观测算子的切线性算子。为了更好地应对非线性问题,以集合卡尔曼滤波(Ensemble Kalman filter, EnKF; Evensen, 2003)为代表的蒙特卡洛顺序同化方法,是将观测数据(如站点数据或卫星反演数据)同化到模型中,不断地调整模型状态变量,以消除模型初始场不确定性对模

拟结果的影响(Williams et al, 2005)。这种方法已经在大气环流模型、海洋动力模型等领域得到广泛应用。

模型—参数同步估计是采用一定的方法力求实现模型状态变量和参数的同步估计(Moradkhani et al, 2005; Nagarajan et al, 2011; Noh et al, 2011; Vrugt et al, 2013)。纵观国内外进展,模型—参数同步估计的研究思路主要有二:①状态空间扩展方法(state augmentation method),即将模型参数扩展到状态变量空间中,从而把参数优化问题转化状态变量的滤波问题,再利用数据同化方法(如EnKF、粒子滤波等)进行模型参数和状态变量的同步估计。对于地表植被模型,参数一般会随着植被的生长发育过程而表现出一定的时变(Time-Variant)特性,但其变化过程远远慢于模型状态变量变化过程(Liu et al, 2007)。不同于植被模型,水文模型的大多参数代表着流域的水文特性,是非时变、静态的(static)。因此,利用模型参数直接扩展到状态变量空间进行模型参数和状态变量同步估计的同化方法取得的参数估计结果往往不太可靠,而且也会引起模型的不稳定性;②组合方法,即将数据同化方法与参数估计方法相结合,利用数据同化方法定量表达模型的输入数据误差、模型结构误差及观测误差的分布形式,量化误差的动态演进,进而应用优化方法寻求最优参数,使得模型同化结果与观测的达到最佳拟合,以实现模型参数与状态变量的同步估计(Vrugt et al, 2005)。

近10年来,随着统计学和计算机技术的发展,层级贝叶斯方法(Hierarchical Bayesian Approach)为多源数据—模型融合方法的研究提供了新的框架和工具(Clark et al, 2006a; Clark M P et al, 2011b)。这方面最具代表性的人物是杜克大学的James S. Clark教授。他指出,层级贝叶斯方法能有效地融合多源数据、多尺度过程、自适应不确定性影响,并合理推断模型参数和难于直接测量的状态变量。例如,Clark等(2004)通过层级贝叶斯方法将多源数据(如森林种子数据、树木大小数据和树木状态数据)与多个生态过程模型(种子扩散模型、繁殖力(fecundity)模型和树木发育(maturation)模型进行有机融合,实现了多个模型参数和难于观测状态变量的合理估计。较之于传统的参数估计方法,层级贝叶斯方法强调将所有与研究有关的数据全部用于分析,并通过更高层次的参数使得不同来源的数据能交换信息。Norros等(2017)研究表明,这种信息交

换特点使得层级贝叶斯方法在参数估计方面优于传统方法。层级贝叶斯方法在大气、海洋、环境科学领域的动态时空模型(dynamic spatio-temporal models)中也得到了广泛应用(Wikle, 2003; Cressie et al, 2011)。但是,随着模型复杂程度的提高,模型参数和状态变量维数将显著增加,会导致计算负担过重和后验分布估计不合理,这是层级贝叶斯方法目前面临的主要挑战。因此,发展高效的贝叶斯统计推断方法仍是亟待解决的前沿科学问题。

4 结语

如何在全球环境变化下实现人类可持续发展,是人类面临的严峻挑战。为应对这一挑战,国际上组织了未来地球(Future Earth)计划,旨在增强全球可持续性发展的能力。模拟和预测复杂人地关系是人类可持续发展决策的核心,也是地理系统模型发展的必然趋势。地理系统模型不仅需要综合自然要素和人类经济社会要素,更需要综合自然和人类社会,才能解决人地关系这一地理学核心问题。

改革开放以来,中国经历了经济快速发展和资源大量消耗,土地利用急剧变化,生态和环境问题日益严重。一系列的城市化、气候变化、生态退化、环境污染等成为关系到国家可持续发展的关键问题,对于这些问题的完整准确刻画和预警需充分发挥地理系统模型的作用,为中国地理学工作者提供了难得的历史机遇。此外,发展适合中国的地理系统模型,并用于解决中国现在的环境问题和未来的可持续发展问题,可为中国生态文明建设提供保障。面对中国的实际,地理系统模型需要考虑以下几个方面的改进:一是中国快速发展驱动下的地表格局改变的速度和强度可能远高于全球其它地区,因此,许多国际模型在中国区域的应用需要充分考虑地表下垫面急剧变化的特点;二是地理系统模型的应用可更多地聚焦于全球变化和关键带等重大科学前沿问题和重点生态脆弱区等重大应用问题,如农牧交错区、黄土高原、喀斯特地区等典型生态脆弱区和生态工程实施区域;充分考虑国家宏观政策因素和生态工程措施等人类活动影响,在模型中应体现自然和人类活动的影响;三是面向中国最近提出的生态、生产和生活三生空间统筹优化的战略,应该充分发挥地理模型综合性的优势,从农业生产、城市建设和生态保护等多角度综合模拟和优化中国可持续发展的路径。

参考文献(References)

- 蔡运龙. 2000. 自然地理学的创新视角[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 36(4): 576-582. [Cai Y L. 2000. Perspectives on innovation in physical geography[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 36(4): 576-582.]
- 车明亮, 陈报章, 王瑛, 等. 2014. 全球植被动力学模型研究综述[J]. 应用生态学报, 25(1): 263-271. [Che M L, Chen B Z, Wang Y, et al. 2014. Review of dynamic global vegetation models (DGVMs) [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 25(1): 263-271.]
- 陈报章. 2017. 陆地表层系统模型模拟与分析[M]. 北京: 科学出版社. [Chen B Z. 2017. Ludi biaocong xitong mofa yu fenxi[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 陈述彭. 1991. 地理系统与地理信息系统[J]. 地理学报, 46(1): 1-7. [Chen S P. 1991. Geo-system and geo-information system[J]. Acta Geographica Sinica, 46(1): 1-7.]
- 方精云, 朱江玲, 王少鹏, 等. 2011. 全球变暖、碳排放及不确定性[J]. 中国科学: 地球科学, 41(10): 1385-1395. [Fang J Y, Zhu J L, Wang S P, et al. 2011. Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties[J]. Science China Earth Sciences, 54(10): 1458-1468.]
- 傅伯杰. 2017. 地理学: 从知识、科学到决策[J]. 地理学报, 72(11): 1923-1932. [Fu B J. 2017. Geography: From knowledge, science to decision making support[J]. Acta Geographica Sinica, 72(11): 1923-1932.]
- 胡和平, 汤秋鸿, 雷志栋, 等. 2004. 干旱区平原绿洲散耗型水文模型: I 模型结构[J]. 水科学进展, 15(2): 140-145. [Hu H P, Tang Q H, Lei Z D, et al. 2004. Runoff-evaporation hydrological model for arid plain oasis: 1, the model structure[J]. Advances in Water Science, 15(2): 140-145.]
- 李新, 摆玉龙. 2010. 顺序数据同化的 Bayes 滤波框架[J]. 地球科学进展, 25(5): 515-522. [Li X, Bai Y L. 2010. A Bayesian filter framework for sequential data assimilation [J]. Advances in Earth Science, 25(5): 515-522.]
- 梁顺林, 李新, 谢先红, 等. 2013. 陆面观测、模拟与数据同化[M]. 北京: 高等教育出版社. [Liang S L, Li X, Xie X H, et al. 2013. Land surface observation, modeling and data assimilation[M]. Beijing, China: Higher Education Press.]
- 毛留喜, 孙艳玲, 延晓冬. 2006. 陆地生态系统碳循环模型研究概述[J]. 应用生态学报, 17(11): 2189-2195. [Mao L X, Sun Y L, Yan X D. 2006. Modeling of carbon cycling in terrestrial ecosystem: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 17(11): 2189-2195.]
- 任立良. 2000. 流域数字水文模型研究[J]. 河海大学学报, 28(4): 1-7. [Ren L L. 2000. A study on digital hydrological modeling[J]. Journal of Hohai University, 28(4): 1-7.]
- 汤秋鸿, 田富强, 胡和平. 2004. 干旱区平原绿洲散耗型水文模型: II 模型应用[J]. 水科学进展, 15(2): 146-150. [Tang Q H, Tian F Q, Hu H P. 2004. Runoff-evaporation hydrological model for arid plain oasis: 2, applications of the model[J]. Advances in Water Science, 15(2): 146-150.]
- 王文, 寇小华. 2009. 水文数据同化方法及遥感数据在水文数据同化中的应用进展[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 37(5): 556-562. [Wang W, Kou X H. 2009. Methods for hydrological data assimilation and advances of assimilating remotely sensed data into rainfall-runoff models[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 37(5): 556-562.]
- 王旭峰, 马明国, 姚辉. 2009. 动态全球植被模型的研究进展[J]. 遥感技术与应用, 24(2): 246-251. [Wang X F, Ma M G, Yao H. 2009. Advance in dynamic global vegetation models[J]. Remote Sensing Technology and Application, 24(2): 246-251.]
- 王中根, 刘昌明, 吴险峰. 2003. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述[J]. 自然资源学报, 18(2): 168-173. [Wang Z G, Liu C M, Wu X F. 2003. A review of the studies on distributed hydrological model based on DEM[J]. Journal of Natural Resources, 18(2): 168-173.]
- 吴险峰, 刘昌明. 2002. 流域水文模型研究的若干进展[J]. 地理科学进展, 21(4): 341-348. [Wu X F, Liu C M. 2002. Progress in watershed hydrological models[J]. Progress in Geography, 21(4): 341-348.]
- 徐乾清. 2004. 中国水利百科全书: 水文与水资源分册[M]. 北京: 中国水利水电出版社. [Xu Q Q. 2004. Zhongguo shuili baikequanshu: Shuiwen yu shuiziyuan fenben[M]. Beijing, China: China Water & Power Press.]
- 张黎, 于贵瑞, Luo Y Q, 等. 2009. 基于模型数据融合的长白山阔叶红松林碳循环模拟[J]. 植物生态学报, 33(6): 1044-1055. [Zhang L, Yu G R, Luo Y Q, et al. 2009. Carbon cycle modeling of a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain of China using the model-data fusion approach[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 33(6): 1044-1055.]
- 中国科学院. 2016. 中国学科发展战略: 环境科学[M]. 北京: 科学出版社. [Chinese Academy of Sciences. 2016. Zhongguo xueke fazhan zhanlüe: Huanjing kexue[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 周成虎, 欧阳, 马廷, 等. 2009. 地理系统模拟的 CA 模型理论探讨[J]. 地理科学进展, 28(6): 833-838. [Zhou C H, Ou Y, Ma T, et al. 2009. Theoretical perspectives of CA-based geographical system modeling[J]. Progress in Geography, 28(6): 833-838.]
- Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the ASABE, 55(4): 1491-1508.
- Bonan G. 2016. Ecological climatology: Concept and applications[M]. New York: Cambridge University Press.
- Carson D, Sangster A. 1981. The influence of land-surface albedo and soil moisture on general circulation model simulation[M]//Rutherford I D. Research activities in atmospheric and oceanic modeling. Numerical Experimentation

- Program Report No. 2.
- Clark D B, Mercado L M, Sitch S, et al. 2011. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description-Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics[J]. *Geoscientific Model Development*, 4(3): 701-722.
- Clark J S, Gelfand A E. 2006a. A future for models and data in environmental science[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(7): 375-380.
- Clark J S, Gelfand A E. 2006b. Hierarchical modelling for the environmental sciences: Statistical methods and applications[M]. New York: Oxford University Press.
- Clark J S, LaDeau S, Ibanez I. 2004. Fecundity of trees and the colonization - competition hypothesis[J]. *Ecological Monographs*, 74(3): 415-442.
- Clark M P, Kavetski D, Fenicia F. 2011. Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling [J]. *Water Resources Research*, 47(9): W09301.
- Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, et al. 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: Results from six dynamic global vegetation models[J]. *Global Change Biology*, 7(4): 357-373.
- Cressie N, Wikle C K. 2011. Statistics for spatio-temporal data [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- de Vries H J M, van Vuuren D P, den Elzen M G J, et al. 2001. The timer image energy regional (Timer) model[M]. Bilthoven, The Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment (RIVM).
- Duan Q, Schaake J, Andréassian V, et al. 2006. Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops[J]. *Journal of Hydrology*, 320(1-2): 3-17.
- Evensen G. 2003. The Ensemble Kalman Filter: Theoretical formulation and practical implementation[J]. *Ocean Dynamics*, 53(4): 343-367.
- Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. 2005. Global consequences of land use[J]. *Science*, 309: 570-574.
- Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, et al. 1996. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(4): 603-628.
- Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. 2011. Solutions for a cultivated planet[J]. *Nature*, 478: 337-342.
- Fox A, Williams M, Richardson A D, et al. 2009. The REFLEX project: Comparing different algorithms and implementations for the inversion of a terrestrial ecosystem model against eddy covariance data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(10): 1597-1615.
- Frieler K, Lange S, Piontek F, et al. 2017. Assessing the impacts of 1.5 °C global warming-simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP2b) [J]. *Geoscientific Model Development*, 10(12): 4321-4345.
- Galloway J N, Schlesinger W H, Levy II H, et al. 1995. Nitrogen fixation: Anthropogenic enhancement- environmental response[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(2): 235-252.
- Gerten D, Schaphoff S, Haberlandt U, et al. 2004. Terrestrial vegetation and water balance—hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model[J]. *Journal of Hydrology*, 286(1-4): 249-270.
- Goll D S, Vuichard N, Maignan F, et al. 2017. A representation of the phosphorus cycle for ORCHIDEE (revision 4520) [J]. *Geoscientific Model Development*, 10(10): 3745-3770.
- Grace J. 2005. Role of forest biomes in the global carbon balance[M]//Griffiths H, Jarvis P G. The carbon balance of forest biomes. Abingdon, UK: Taylor and Francis Group: 19-48.
- Guimberteau M, Zhu D, Maignan F, et al. 2017. ORCHIDEE-MICT (revision 4126), a land surface model for the high-latitudes: Model description and validation[J]. *Geoscientific Model Development Discussions*, doi: 10.5194/gmd-2017-122. (in Press)
- Harris J A, Hobbs R J, Higgs E, et al. 2006. Ecological restoration and global climate change[J]. *Restoration Ecology*, 14(2): 170-176.
- Henderson-Sellers A, Yang Z-L, Dickinson R E. 1993. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(7): 1335-1349.
- Huntzinger D N, Schwalm C, Michalak A M, et al. 2013. The North American carbon program multi-scale synthesis and terrestrial model intercomparison project-Part 1: Overview and experimental design[J]. *Geoscientific Model Development*, 6(6): 2121-2133.
- Hurt G C, Frolking S, Fearon M G, et al. 2006. The underpinnings of land-use history: Three centuries of global gridded land-use transitions, wood-harvest activity, and resulting secondary lands[J]. *Global Change Biology*, 12(7): 1208-1229.
- Hurt G C, Moorcroft P R, Pacala S W, et al. 1998. Terrestrial models and global change: Challenges for the future[J]. *Global Change Biology*, 4(5): 581-590.
- Jolly W M, Nemani R, Running S W. 2005. A generalized, bioclimatic index to predict foliar phenology in response to climate[J]. *Global Change Biology*, 11(4): 619-632.
- Kalman R E. 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. *Journal of Basic Engineering*, 82(1): 35-45.
- Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, et al. 2005. A dy-

- namic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere- biosphere system[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1): GB1015.
- Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. 2011. Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the community land model[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 3(1): M03001.
- Lawrence P J, Chase T N. 2007. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0)[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G1): G01023.
- Le Quéré C, Moriarty R, Andrew R M, et al. 2015. Global carbon budget 2015[J]. *Earth System Science Data*, 7(2): 349-396.
- Levis S, Bonan G B, Bonfils C. 2004. Soil feedback drives the mid-Holocene North African monsoon northward in fully coupled CCSM2 simulations with a dynamic vegetation model[J]. *Climate Dynamics*, 23(7-8): 791-802.
- Li X, Koike T, Pathmathevan M. 2004. A very fast simulated re-annealing (VFSA) approach for land data assimilation [J]. *Computers & Geosciences*, 30(3): 239-248.
- Lieth H. 1975. Modeling the primary productivity of the world [M]//Lieth H, Whittaker R H. *Primary productivity of the biosphere*. New York: Springer Verlag.
- Lindeskog M, Arneth A, Bondeau A, et al. 2013. Implications of accounting for land use in simulations of ecosystem carbon cycling in Africa[J]. *Earth System Dynamics*, 4(2): 385-407.
- Liu Y Q, Gupta H V. 2007. Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework[J]. *Water Resources Research*, 43(7): W07401.
- Liverman D, Rockström J, O'Brien K, et al. 2013. *Future earth initial design*[R]. Paris, France: The Science and Technology Alliance for Global Sustainability.
- Manabe S. 1969. Climate and the ocean circulation: I. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface[J]. *Monthly Weather Review*, 97(11): 739-774.
- McGuire A D, Sitch S, Clein J S, et al. 2001. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the Twentieth Century: Analyses of CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(1): 183-206.
- McSweeney C F, Jones R G. 2016. How representative is the spread of climate projections from the 5 CMIP5 GCMs used in ISI-MIP[J]. *Climate Services*, 1: 24-29.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: Current state and trends*[M]. Washington, D.C.: Island Press.
- Mohan S, Arumugam N. 1995. *Forecasting weekly reference crop evapotranspiration series*[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 40(6): 689-702.
- Moradkhani H, Sorooshian S, Gupta H V, et al. 2005. Dual state - parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter[J]. *Advances in Water Resources*, 28(2): 135-147.
- Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. 1998. The european soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(6): 527-544.
- Nagarajan K, Judge J, Graham W D, et al. 2011. Particle Filter-based assimilation algorithms for improved estimation of root-zone soil moisture under dynamic vegetation conditions[J]. *Advances in Water Resources*, 34(4): 433-447.
- Noh S J, Tachikawa Y, Shiiba M, et al. 2011. Applying sequential Monte Carlo methods into a distributed hydrologic model: Lagged particle filtering approach with regularization[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(10): 3237-3251.
- Norros V, Laine M, Lignell R, et al. 2017. Parameterization of aquatic ecosystem functioning and its natural variation: Hierarchical Bayesian modelling of plankton food web dynamics[J]. *Journal of Marine Systems*, 174: 40-53.
- Nyakatawa E Z, Reddy K C, Lemunyon J L. 2001. Predicting soil erosion in conservation tillage cotton production systems using the revised universal soil loss equation (RUSLE)[J]. *Soil and Tillage Research*, 57(4): 213-224.
- Oleson K W, Dai Y J, Bonan G, et al. 2004. Technical description of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-461+STR. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research.
- Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. 2010. Technical description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM)[R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-478+STR. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research.
- Piao S L, Sitch S, Ciais P, et al. 2013. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO₂ trends[J]. *Global Change Biology*, 19(7): 2117-2132.
- Pokhrel P, Yilmaz K K, Gupta H V. 2012. Multiple-criteria calibration of a distributed watershed model using spatial regularization and response signatures[J]. *Journal of Hydrology*, 418-419: 49-60.
- Prentice I C, Bondeau A, Cramer W, et al. 2007. Dynamic global vegetation modeling: Quantifying terrestrial ecosystem responses to large-scale environmental change[M]//Canadell J G, Pataki D E, Pitelka L F. *Terrestrial ecosystems in a changing world*. Berlin, Heidelberg, German: Springer.

- er: 175-192.
- Prentice I C, Sykes M T, Cramer W. 1991. The possible dynamic response of northern forests to global warming[J]. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 1(5): 129-135.
- Rabin S S, Melton J R, Lasslop G, et al. 2017. The Fire Modeling Intercomparison Project (FireMIP), phase 1: Experimental and analytical protocols with detailed model descriptions[J]. *Geoscientific Model Development*, 10(3): 1175-1197.
- Raczka B M, Davis K J, Huntzinger D, et al. 2013. Evaluation of continental carbon cycle simulations with North American flux tower observations[J]. *Ecological Monographs*, 83(4): 531-556.
- Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[M]. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture.
- Richardson A D, Williams M, Hollinger D Y, et al. 2010. Estimating parameters of a forest ecosystem C model with measurements of stocks and fluxes as joint constraints[J]. *Oecologia*, 164(1): 25-40.
- Ricke K L, Moreno-Cruz J B, Schewe J, et al. 2015. Policy thresholds in mitigation[J]. *Nature Geoscience*, 9(1): 5-6.
- Rosegrant M W, The IMPACT Development Team. 2012. International model for policy analysis of agricultural commodities and trade (IMPACT): Model description[R]. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute.
- Schmidhuber J, Tubiello F N. 2007. Global food security under climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(50): 19703-19708.
- Scholz M, Kaminski T, Rayner P, et al. 2007. Propagating uncertainty through prognostic carbon cycle data assimilation system simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D17): D17305.
- Singh V P. 1995. Computer models of watershed hydrology [M]. Littleton, CO: Water Resources Publications.
- Sitch S, Friedlingstein P, Gruber N, et al. 2015. Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide [J]. *Biogeosciences*, 12(3): 653-679.
- Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model[J]. *Global Change Biology*, 9(2): 161-185.
- Smil V. 1999. Nitrogen in crop production: An account of global flows[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(2): 647-662.
- Stehfest E, van Vuuren D, Bouwman L, et al. 2014. Integrated assessment of global environmental change with IMAGE 3.0: Model description and policy applications[M]. The Hague, The Netherlands: Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Stocker B D, Strassmann K, Joos F. 2011. Sensitivity of Holocene atmospheric CO₂ and the modern carbon budget to early human land use: Analyses with a process-based model[J]. *Biogeosciences*, 8(1): 69-88.
- Stocker T F, Qin D, Plattner G-K, et al. 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Stöckli R, Rutishauser T, Dragoni D, et al. 2008. Remote sensing data assimilation for a prognostic phenology model[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G4): G04021.
- Trudinger C M, Raupach M R, Rayner P J, et al. 2007. OptIC project: An intercomparison of optimization techniques for parameter estimation in terrestrial biogeochemical models [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G2): G02027.
- van Vuuren D, Kok M, van der Esch S. 2012. Roads from Rio+20: Pathways to achieve global sustainability goals by 2050 [R]. The Hague, The Netherlands: Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Veldkamp T I E, Wada Y, Aerts J C J H, et al. 2017. Water scarcity hotspots travel downstream due to human interventions in the 20th and 21st century[J]. *Nature Communications*, 8: 15697.
- Vrugt J A, Diks C G H, Gupta H V, et al. 2005. Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: Combining the strengths of global optimization and data assimilation [J]. *Water Resources Research*, 41(1): W01017.
- Vrugt J A, Sadegh M. 2013. Toward diagnostic model calibration and evaluation: Approximate Bayesian computation [J]. *Water Resources Research*, 49(7): 4335-4345.
- Warszawski L, Frieler K, Huber V, et al. 2014. The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI - MIP): Project framework[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9): 3228-3232.
- Wikle C K. 2003. Hierarchical bayesian models for predicting the spread of ecological processes[J]. *Ecology*, 84(6): 1382-1394.
- Williams M, Richardson A D, Reichstein M, et al. 2009. Improving land surface models with FLUXNET data[J]. *Biogeosciences*, 6(7): 1341-1359.
- Williams M, Schwarz P, Law B, et al. 2005. An improved analysis of forest carbon dynamics using data assimilation[J].

- Global Change Biology, 11: 89-105.
- Wischmeier W H, Smith D D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A Guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook No. 537[M]. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture.
- Woltjer G, Bezlepikina I, van Leeuwen M, et al. 2011. The agricultural world in equations: An overview of the main models used at LEI[M]. The Hague, The Netherlands: Project Manager Sustainability Measurement.
- Zachle S, Friend A D. 2010. Carbon and nitrogen cycle dynamics in the O-CN land surface model: 1. Model description, site-scale evaluation, and sensitivity to parameter estimates [J]. Global Biogeochemical Cycles, 24(1): GB1005.
- Zeng X D, Li F, Song X. 2014. Development of the IAP dynamic global vegetation model[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 31(3): 505-514.
- Zeng Z Z, Piao S L, Li L Z X, et al. 2017. Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades[J]. Nature Climate Change, 7(6): 432-436.
- Zhao M S, Running S W. 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. Science, 329: 940-943.
- Zhu D, Peng S S, Ciais P, et al. 2015. Improving the dynamics of northern hemisphere high-latitude vegetation in the ORCHIDEE ecosystem model[J]. Geoscientific Model Development, 8(7): 2263-2283.
- Zhu G F, Li X, Su Y H, et al. 2014. Simultaneously assimilating multivariate data sets into the two-source evapotranspiration model by Bayesian approach: Application to spring maize in an arid region of northwestern China[J]. Geoscientific Model Development, 7(4): 1467-1482.
- Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, et al. 2016. Greening of the earth and its drivers[J]. Nature Climate Change, 6(8): 791-795.

A review of geographical system models

PENG Shushi^{1*}, PIAO Shilong¹, YU Jiashuo¹, LIU Yongwen¹, WANG Tao²,
ZHU Gaofeng³, DONG Jinwei⁴, MIAO Chiyuan⁵

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. College of Earth Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 5. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The geographical system is a complex system including multiple spheres and their interactions. A geographical system model is a coupled human and environmental system model for understanding and predicting changes in patterns and processes of the system. Geographical system models are important tools for supporting sustainable development policy making, and thus is a key scientific research area. During the past decades, geographical system models have been developed to examine global environmental problems such as global change and sustainable development. However, the existing geographical system models have limited ability to simulate and project changes in the complex coupled human-environmental system. This study reviewed the history of development of geographical system models, which is characterized by transitions from single process to multiple process, statistics-based to process-based, static to dynamic, and site level to regional and global scale simulations. We also summarized two important development trends of geographical system models: toward coupled human and natural processes and their interactions, and model-data synthesis. To support policy making for sustainable development in China and globally, developing geographical system models is urgent for the Chinese physical geography research community.

Key words: geographical system model; process-based model; coupled human and environment system; sustainable development; model-data synthesis