

陆面过程模式研发中的问题



作者简介:戴永久,中国科学院院士,教育部“长江学者”特聘教授、中山大学教授。现担任中国气象学会数值预报专业委员会和城市气象专业委员会委员、*Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 副编辑、《气候与环境研究》副主编、《大气科学学报》编委等职。荣获何梁何利科学与技术进步奖、国家杰出青年基金等荣誉。长期致力于陆面过程和数值模式研究,在数值天气、气候和地球系统模式的陆面过程模式领域做出了系统性和开创性贡献。研发了在国际上具有重要影响和广泛应用的陆面过程模式,研发了集模式、资料、参数优化、高性能计算等为一体的陆面模拟系统,为陆面过程机理、陆地表层格局变化等提供了综合的数值模拟研究平台。研究成果在气象、水文、生态环境等领域均得到广泛应用,并有重要影响。

戴永久*

中山大学 大气科学学院,广东 珠海 519082

摘要 陆面过程研究是充分理解天气/气候/地球系统过程不可或缺的重要主题。本文全面梳理了当前用于数值天气/气候/地球系统模式的陆面过程模式研制的问题,建议了当前陆面过程模式研制中需加强和改进完善的关键内容。特别强调在新一代模式研发中建立包含人类活动的高分辨率全球陆面过程模式;特别强调与其他学科相结合,形成不同行业的预报预测系统或研究方法和工具。建议建设中国的集模式发展、数据分析、模拟方法、高性能计算、数据可视化和应用示范为一体的陆面模拟综合集成平台,为天气/气候/地球系统模式提供陆面过程模式,为开展精细化的全球和区域陆面水文-气象-生态的预报预测提供科技支撑。

关键词 陆面过程模式;陆面模拟综合集成平台;全球和区域陆面水文-气象-生态的预报预测

陆面是天气/气候/地球系统的重要组成部分,其物理、化学、生物过程深刻影响着陆地与大气、陆地与海洋之间的能量和物质的交换。陆-气、陆-海界面是人类活动的主要场所,随着人类社会的发展,人类活动导致的地球陆面状况变化,深刻影响了陆-气、陆-海之间物质与能量交换、区域气候和生态环境的变化。这些变化已对自然和人类产生了巨大的影响。准确描述陆面物理、化学、生物过程,准确计算陆面状态以及陆-气、陆-海界面的物质和能量交换通量,对天气/气候数值预报预测业务,以及充分理解全球变化所带来的水安全、粮食安全、生态环境恶化等问题的形成机制,制定相应的对策,具有重要的科学和社会意义。

陆面过程是指发生在陆地表层的所有物理、化学、生物过程,及其与大气、海洋的相互作用过程。陆面过程模式是指定量描述这些过程以及研究人类活动与环境相互作用的数学物理模式,并可通过计算机实现仿真,是数值天气/气候/地球系统模式的核心组成部分。陆面过程模式的发展迄今大概经历了四个阶段:

第一代陆面过程模式(20世纪60年代末到70年代)的标志为“水桶模式”和简单能量平衡模式(Manabe, 1969; Budyko, 1974)。它假定土壤为容水量15 cm的“水桶”,地面温度和陆-气水热通量计算非常简约,如地表反照率和粗糙度采用大尺度范围内均一化的参数。

第二代陆面过程模式(20世纪80年代)中最具代表性的是

* 联系人, E-mail: daiyj6@mail.sysu.edu.cn

2020-01-03 收稿, 2020-01-13 接受

国家重点研发计划项目(2017YFA0604300; 2016YFB0200801); 国家自然科学基金重点项目(41730962)

引用格式:戴永久, 2020. 陆面过程模式研发中的问题[J]. 大气科学学报, 43(1): 33-38.

Dai Y J, 2020. Issues in research and development of land surface process model[J]. *Trans Atmos Sci*, 43(1): 33-38. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200103006. (in Chinese).

BATS (Biosphere Atmosphere Transfer Scheme; Dickinson et al., 1986) 和 SiB (Simple Biosphere Model; Sellers et al., 1986), IAP-LSM-1994 (IAP Land Surface Processes Model version 1994; Dai and Zeng, 1997), NOAH (Chen and Dudhia, 2001), 它们细致地考虑了植被在陆地水、热过程中的作用, 包括对辐射传输、动量交换、蒸腾、降水截流等过程的影响。

第三代陆面过程模式(20世纪90年代)的标志模式有: BATS1e (Dickinson et al., 1993), SiB2 (Sellers et al., 1996), AVIM (Atmosphere Vegetation Interaction Mode; Ji and Hu, 1989; Ji, 1995), 其最显著的一个特点是耦合了光合作用、呼吸作用等关键植被生理与生态系统过程。

第四代陆面过程模式(20世纪90年代末至今)中最具代表性的有: 研制的通用陆面模式(The Common Land Model; Dai et al., 2003), 和后续研制的美国 CLM (The Community Land Model version 4.0-4.5; Oleson, 2010; Lawrence, 2019), 中国 CoLM (Dai et al., 2004; CoLM2014, <http://land.sysu.edu.cn/research/models>), 以及英国 JULES (The Joint UK Land Environment Simulator; Wiltshire et al., 2019), 澳大利亚 CABLE (The Community Atmosphere Biosphere Land Exchange Model; Haverd et al., 2018), 美国 Noah-MP (Noah-Multi-Parameterization Land Surface Model; Niu et al., 2011)。这些陆面过程模式对陆面物理、化学和生物等过程的描述更加精细化, 加入大量新的子模式, 包含的过程更加完备。

当今用于数值天气/气候/地球系统模式的陆面过程模式研究需特别强调向多时空尺度、系统集成的方向发展, 全球性与区域性、宏观与微观、生态系统过程等的结合, 多源观测和数据同化相结合的发展方向; 特别强调学科研究与国家需求、经济和社会可持续发展以及政策决策紧密结合, 使陆面过程模式研究不断向深度和广度发展。

农业生产、城市建设、河网管理等人类活动, 极大改变着陆-气之间的辐射传输、物质和能量交换过程, 陆面水文、生物地球化学、生态系统等的自然过程。上述诸代模式, 对人类活动对陆面过程扰动影响的描述相对缺乏或过于简单。在陆面过程模式中包含人类活动和生态系统过程并实现高分辨率模拟是新一代陆面过程模式发展的战略方向。

模式和观测的进步大大地提高了我们对陆面系统的认识水平。然而, 如何把模式、观测集成为一个系统来解决区域乃至全球尺度的社会需求问题已经成为地球系统科学领域内的一种挑战, 也是国际上竞相研究的前沿学科之一。一个有效的陆面模拟系统能够为我们识别气候变化与人类活动对环境变化的影响、探索水文气象灾害成因并且进行预报与预警、优化水资源配置、保护粮食安全和生态环境提供科学支撑。

本文拟全链条梳理当前用于数值天气/气候/地球系统模式的陆面过程模式研究的问题, 并提出自己对当前陆面过程模式研发中的问题思考。

1 陆面模式研究问题

用于数值天气/气候/地球系统模式的陆面过程模式研发可概括为三方面工作: 一是数学建模, 即物理模型构建(即基于物理原理, 把陆面过程的物理规律用数学语言表达, 用计算机语言表达), 数据集建设(陆面属性数据、陆面参数数据集、状态变量初始数据集等), 模拟结果验证与分析; 二是与数值天气/气候/地球系统模式耦合与应用, 需要解决陆面过程与大气过程的时空尺度问题, 陆面数据同化, 耦合模式系统调优等理论和技术问题; 三是系统集成与平台建设。这三大工作缺一不可。将从以下六个方面阐述(举例)需深入开展的研究。

1.1 陆面过程数学建模

陆面系统包含着复杂的、相互联系且相互反馈的多种(物理、生物、化学)基本过程。受不同空间尺度(分子尺度→全球尺度)和不同时间尺度(微秒→百/千年)的过程作用, 陆地表层格局不断变化, 具有明显的时空差异。实现全球陆面过程的精细化建模, 是气象、水文、生态、环境等多个学科领域的迫切需求。

1) 耦合人类活动的陆面物理过程建模拟重点开展: 地表水与地下水运动、河川径流和洪泛、陆面水体能量平衡、三维植被辐射传输和湍流交换、山地辐射、城市冠层、水利工程对河川水文扰动、土地利用对陆面物理扰动等关键物理过程的建模, 提升陆面过程模式对陆地水文和能量过程的模拟能力。聚焦在人为热源对城市冠层、水利工程对河川水文过程、土地利用对陆面物理过程的扰动过程建模等方面, 以精细刻画重要人类活动(能源使用、人口与经济发展、水利建设等)对关键陆面物理过程的影响。

2)耦合人类活动的陆面生物地球化学与生态系统过程建模拟重点开展:植被生理与生态、碳/氮/磷为主的多种营养元素循环、作物、大气污染对生态系统扰动、全球植被动力学等关键植被生理生态过程的建模,提升陆面过程模式对陆面生态系统过程的模拟能力。聚焦在大气污染对生态系统扰动过程的模式、作物模式等方面,定量描述重要人类活动(温室气体排放、粮食需求和生产、大气污染、人口与经济发展等)对关键陆面生态系统过程的扰动过程。

3)陆面特征数据研究:运行陆面模式必须建立全球的高分辨率陆面特征数据库,需要的数据包括:土壤和植被特征数据,和基于这些数据的陆面参数反演方法等。研究需要考虑如何把站点和遥感数据集成起来,形成陆面模式所需要的数据。基于天-空-地多源观测数据的整理与分析,建立长时间序列的高时空分辨率的陆面模拟系统所需的各类数据集,如,气象驱动数据、土壤属性与植被属性等地表参数、土地覆盖/土地利用、地表通量等。

4)模式评估研究:系统的模式评估或诊断是模式发展中不可或缺的重要一环,它可以帮助全面了解模式的准确度和不确定性,从而为模式的发展与改进提供依据。在实际工作中,模式评估往往需要花费模式发展人员大量的时间和精力。为了提高模式评估的效率,根据模式评估的原理结合计算机技术,需要研发专门用于模式评估的软件工具。

1.2 陆面过程模式集成与模拟技术

陆面过程模式集成是将不同的过程分量模式集成到相互关联的、统一和协调的系统之中。模式集成并不仅仅囿于单纯地建立过程分量模式的简单插拔式连接,而且需要求解过程的连接,需要研究集成分量模式内在联系的基本规律、相容或关联性,需要按照陆面过程的数学物理原理和模式功能目的,将不同的分量模式通过重组而获得具有统一整体功能的新技术和方法,是一项系统整体的寻优研究和多学科综合的系统工程。

陆面过程是多时空尺度的、复杂互馈的,因此求解分量模式的连接研究中需要在模式集成与模拟时重点解决以下关键技术问题:

1)数值适定性,即刻画陆面过程模式存在唯一且随初边值条件连续变化的数学适定解;

2)计算稳定性,即模式离散化后的数值方案应具有较强的可靠性和稳定性,支持长时间的积分运算;

3)尺度适用性,即陆面不同分量模式的时间尺度匹配性和空间尺度匹配性,属性资料与过程匹配及尺度匹配、验证资料与模式输出的物理量配准和尺度匹配;

4)计算机可实现性,即陆面过程建模能够予以编程实现;

5)在系统寻优中,拟探求应用复杂系统多指标优化技术。

1.3 陆面过程模式与天气/气候/地球系统模式的耦合技术

作为天气/气候/地球系统模式的陆面过程模式,需要提供大气下边界的动量、能量(辐射、感热、潜热)和物质(水汽、CO₂、沙尘等)的源汇项;对海洋来说,就是给出陆地通过河流向海洋输送的淡水通量,假定海洋对陆面仅通过大气间接反馈,不考虑直接反馈。在求解大气方程时,由于高度的复杂性,通常采用分离算法,即常说的动力框架和物理过程分别计算。但这种人为的分离,会导致大气方程的源汇项,在时间和空间上存在不匹配、不协调、不守恒等一系列问题。因此,陆面过程模式与大气模式的耦合技术决不是简单的“可插拔”技术,其中既有复杂的科学问题,也有技术难题。概括起来,可归结为3方面问题:

1)时间匹配问题。通常有3种方案:全隐式、半隐式、显式。由于陆面过程模式与天气模式耦合和与气候/地球系统模式的时间离散格式具有明显区别,需要分别研究相应的耦合方案。建议物理量守恒性将是作为优选方案时的第一原则。

2)空间匹配问题。通常陆面过程模式的空间分辨率要高于大气模式的分辨率,为此,我们需要针对具体的大气模式分别研发高分辨率陆面模拟的升尺度技术,以及大气模式对陆面过程模式输出变量的降尺度技术。

3)物理量的配准问题。即陆面过程模式所需大气模式输出的物理量应严格一致,反之亦然。例如,辐射问题:大气模式输送给陆面过程模式的太阳辐射通量,一些大气模式仅输出总辐射量,但陆面过程模式需要分波段、分入射方式(直射和散射)的辐射通量;大气降水问题:需要区分降水相态(雪、雨夹雪、雨)和形成降水的天气系统(大尺度降水、对流性降水);大气模式输出的底层的风、温度、湿度应该位于陆面模式计算湍流通量的常通量层,否则需要基于大气边界层理论重新求解得到这些物理量。

1.4 陆面过程模式不确定性研究

陆面过程模拟不可避免地会有误差,这些误差来自驱动场、边界/初始条件、模式结构、模式参数、观测数据等,需正确地估计陆面模式的预报误差和观测的系统偏差,量化陆面模拟系统中的各类不确定性因素对模式结果的影响。通过对陆面模拟结果的时空误差结构分析,研制新的数理方法来剖析大复杂动力系统的确定性,量化其中的随机不确定性,降低主观不确定性,其手段包括实验设计、因子筛选、统计替代模式、数据同化、全局优化等。

1.5 陆面数据同化方法研究

陆面数据同化方法能够矫正陆面模拟的时空误差,通过融合观测数据对模式中的状态变量进行修正,使其更接近于真实状态。

1.6 高性能计算平台研究和数据可视化系统和发布平台研究

大陆/全球尺度陆面模拟系统需要高性能的硬件和软件系统,如何把海量数据、高分辨率模拟和复杂的数学方法结合起来是构建高性能计算平台的一个挑战。数据可视化平台的建设对陆面模拟系统的推广至关重要,数据发布平台能让公众和管理决策者更好地掌握新的科学依据。

2 建议研究与期望

我国在陆面过程研究、陆面过程观测、陆面过程模式发展等方面具有较强的基础,在过去几十年已开展大量且有一定规模的陆面过程观测试验,在陆面过程模式研制上,我国也有许多成果。我国的计算硬件和软件资源在近十几年有飞跃式发展。这些已为实现高分辨率全球/大陆尺度的陆面模拟提供了重要基础和保障。基于前面的陆面过程模式研发的内容梳理,建议以下6方面的研究工作和思考。

2.1 模式研制

以我国完全自主研发的陆面模式为基础,开展陆面物理、水文、植物生理生态等自然过程的建模,尤其,关注人类活动对陆面关键自然过程的扰动过程建模。开展基于模式网格尺度的陆面过程观测试验,整理与分析现有的相关数据,建立陆面模式所需要的气象驱动和陆面特征数据集。分析各类不确定性因素对模式模拟的影响,提出改善模拟结构和模拟效果的方法,开展大复杂系统(即大陆/全球尺度的陆面过程模式)的不确定性量化研究。利用天空-地观测数据,实现全球/大陆尺度的数据同化。

2.2 系统集成

建立自成体系的集模式、数据集和高性能计算为一体且功能完备的陆地表层格局变化综合模拟与预估平台;建立中国的陆面模拟平台,能让已有的成果能得到充分的发掘并得以推广应用,让正在开展和将来可能开展的相关研究能有一个系统集成平台,让我国从事陆面过程研究的人员在一个高起点上开展他们各自的研究。通过该平台集成国内外科学家的研究成果,吸引国内外陆面研究科学家参与和贡献。开发计算技术、可视化平台与数据发布平台。

2.3 应用研究

实现新研制的陆面过程模式与我国自主数值天气预报系统模式/气候系统模式/地球系统模式的耦合,打破模式研发与业务应用脱节的局面,实现成果直接与国家气象业务平台对接,以服务于国家气象业务。通过建立的全球和区域模拟系统来准确描述和预测气候变化与人类活动对陆面物理、生物、地球化学过程的影响,为天气/气候预报预测、水资源安全、灾害防治、粮食安全、生态系统服务功能等问题提供一个科学支撑和业务平台。

2.4 特别关注

陆面过程模式研究中,需特别关注3个方面:1)自上而下的“down scaling”(降尺度)和自下而上的“up scaling”(升尺度)问题,以及尺度可分辨与不可分辨的陆面过程的动力学或统计表达,不同尺度的陆面过程的耦合,数值适定性、计算稳定性、计算高效性;2)陆面过程模式和其他学科的结合,不仅与传统的气象学科的天气/气候/地球系统数值模式,而且还能水文、生态、环境、灾害、卫星遥感、高能计算、人工智能等相结合,形成的不同行业的预报预测系统或研究方法和工具;3)更多强调“system integration”系统集成,实践“宏微交替、物穷其理”。

2.5 成果审视

我国在陆面过程研究、陆面过程观测、陆面过程模式发展等方面具有较强的基础,在过去几十年已开展大量且有一定规模的陆面过程观测试验,如建立了中国陆地生态系统通量观测研究网络、在内蒙古草原、淮河流域、黑河流域、青藏等地区也开展了大型的野外观测试验。另外中国科研人员开发了高分辨率的陆面特征土壤与植被数据集,并已对全世界开放。在陆面过程模式研制上,我国也有许多成果,如 AVIM、IAP-LSM-94、CoLM 等模式已被不同天

气、气候或地球系统模式所采用。目前的一些研究,由于缺少集成平台,大部分研究成果在发表了论文、或申报了奖项后就束之高阁了,没有能够深入挖掘出观测数据、模式与分析方法的价值。为此,我们需要重新审视或回答,我们的研究是否提供方便可用的数据、方法、模式的等研究工具? 我们的研究发现了什么科学规律? 改变了什么科学认识?

2.6 学科交叉

陆面过程模式研究涉及大气科学、水文学、湖沼学、冰川冻土学、植被生理生态学、生物地球化学、卫星遥感应用、高性能计算、数学、力学、物理学、化学等学科,是一典型的多学科交叉融合的研究领域,我们非常期许不同学科背景的本科生、研究生、科学家们参与这一蓬勃发展的科学与应用研究。

参考文献(References)

- Budyko M I, 1974. *Climate and life*[M]. New York: Academic Press.
- Chen F, Dudhia J, 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity[J]. *Mon Wea Rev*, 129: 569-585.
- Dai Y, Zeng Q C, 1997. A land surface model (IAP94) for climate studies. Part I: formulation and validation in off-line experiments[J]. *Adv Atmos Sci*, 14: 433-460.
- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al., 2003. The common land model[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 84(8): 1013-1024.
- Dai Y J, Dickinson R E, Wang Y P, 2004. A two-big-leaf model for canopy temperature, photosynthesis, and stomatal conductance[J]. *J Climate*, 17(12): 2281-2299.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al., 1986. Biosphere atmosphere transfer scheme (BATS) for NCAR Community Climate Model [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-275+STR: 69.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al., 1993. Biosphere atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to for Community Climate Model [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-378+STR: 72.
- Haverd V, Smith B, Nieradzki L, et al., 2018. A new version of the CABLE land surface model (Subversion revision r4601) incorporating land use and land cover change, woody vegetation demography, and a novel optimisation-based approach to plant coordination of photosynthesis[J]. *Geosci Model Dev*, 11: 2995-3026.
- Ji J J, 1995. A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface[J]. *J Biogeogr*, 22(2/3): 445.
- Ji J J, Hu Y C, 1989. A simple land surface processes model for use in climate study[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 3: 86-95.
- Lawrence D M, 2019. Technical description of version 5.0 of the Community Land Model (CLM). http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm2/land/CLM50_Tech_Note.pdf. [2019-12-26].
- Manabe S, 1969. Climate and the ocean circulation I. the atmosphere circulation and the hydrology of the Earth's surface[J]. *Mon Wea Rev*, 97: 739-774.
- Niu G Y, Yang Z L, Mitchell K E, et al., 2011. The community Noah land surface model with multi-physics options, part 1: model descriptions and evaluation with local-scale measurements[J]. *J Geophys Res*, 116: D12109.
- Oleson K W, 2010. Technical description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM). NCAR Technical Note NCAR/TN-478+STR. [2019-12-26].
- Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al., 1986. A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models[J]. *J Atmos Sci*, 43(6): 505-531.
- Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al., 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs, Part I: model formulation[J]. *J Climate*, 9: 676-705.
- Wiltshire A J, Rojas M C, Edwards J M, et al., 2019. JULES-Gl7: the global land configuration of the Joint UK Land Environment Simulator version 7.0 and 7.2[J]. *Geosci Model Dev*, 13: 483-505.

Issues in research and development of land surface process model

DAI Yongjiu

School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

Land surface process research is the indispensable topic to better understand weather/climate/earth system processes. In this paper, we systematically summarized the issues in the development of land surface process models for use in numerical weather/climate/earth system models. We highly recommend to develop the high-resolution global land surface process model including human activities in the new generation models, and the prediction systems or research methods for different disciplines. We strongly suggest to build a modeling platform that integrate the model development, data analysis, simulation methods, high performance computing, data visualization and application demonstration, and that could provide the land surface models for weather/climate/earth system models and provide scientific and technological support for global and regional hydrological-meteorological-ecological prediction.

land surface process model; integrated land surface simulation platform; global and regional terrestrial hydrological-meteorological-ecological prediction

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200103006

(责任编辑:张福颖)