



数理相关领域大科学装置专辑·评述

地球系统科学模拟有关重大问题

王会军, 朱江, 浦一芬

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

*联系人, E-mail: wanghj@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2014-05-12; 接受日期: 2014-06-30; 网络出版日期: 2014-08-27



摘要 从 20 世纪 70 年代开始, 科学家们已经开始把大气、海洋、冰雪和陆面四个圈层作为一个整体来考虑, 既研究各圈层内部的物理过程也研究其间的相互作用, 这实际上是一个物理气候系统. 进入 21 世纪, 人们的视野从物理气候系统扩展到了地球系统, 进一步考虑生态系统、空间天气和固体地球系统, 通过研究圈层内部的物理、化学和生物地球化学过程以及圈层之间的能量、动量和物质交换来了解地球能量过程、生态过程和新陈代谢过程的运行规律. 人们越来越重视诸如碳、氮循环等生物地球化学耦合过程在气候系统中的作用及人类活动对这些循环过程的影响. 地球系统模式基于地球各圈层中的物理、化学和生物过程建立起来的数学方程组, 然后用数值计算方法求解, 编制成一种大型综合性计算程序. 地球系统模式是迄今为止最复杂和最具综合性的科学数值模拟工具, 是地球系统科学理论和知识的集大成. 地球系统模式的先进性, 体现了一个国家在地球系统科学研究的核心竞争力, 是衡量一个国家地球科学研究综合水平的重要指标. 建成国际领先的地球系统模式对大幅度提升我国在地球系统科学领域的水平具有不可替代的作用. 本文概述了地球系统数值模拟研究的科学意义、国家需求、国际发展趋势、我国已经取得的成就和未来的发展目标和任务.

关键词 地球系统, 地球系统模式, 生物地球化学循环, 气候变化

PACS: 05.70.Np, 92.60.Ry, 92.70.Ly, 91.62.La

doi: 10.1360/SSPMA2014-00155

1 地球系统数值模拟研究的重要科学意义

地球系统包含诸如近地空间、大气和海洋、地表层、生物圈、固体地球(包括岩石圈、地幔和地核)等圈层, 作为整体进行研究就叫地球系统科学, 它包含以各分系统为研究对象的各门科学, 也包括各个系统的相互作用. 将该系统用数理化等基础科学作理论表达就是广义的地球系统理论和模式.

地球科学数值模拟研究首始于大气科学, 且最先应用于天气预报. 人们认识到, 大气是斜压流体, 天气的本质是相应的运动系统的演变, 故天气预报可以归结为斜压流体力学方程加入一定的边界条件和初始条件的求解问题, 也就是求解数学物理方程问题. 在 20 世纪初, 这样的斜压流体力学方程组大体上已可列出来, 当然非常复杂. 尤其是还有水汽相变、辐射能传输等各种复杂的和有待探讨的物理过程.

引用格式: 王会军, 朱江, 浦一芬. 地球系统科学模拟有关重大问题. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 1116–1126

Wang H J, Zhu J, Pu Y F. The earth system simulation (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014, 44: 1116–1126, doi: 10.1360/SSPMA2014-00155

对于如此复杂的非线性偏微分方程式组, 没有可公式化的求解方法. 当时的气象学大师 Bjerknes^[1]感叹: 让上帝去积分吧.

待到用数值计算的方法来求解偏微分方程的思想出现后, Richardson 就敏锐而大胆地尝试用有限差分法求解斜压流体力学方程. 他的书(1922 年出版)冠名为“*Weather Prediction by Numerical Process*”^[2], 由此催生了后来的“数值天气预报”(Numerical Weather Forecast). 可惜 Richardson 的最初尝试以失败告终.

后来经过几代科学家们先后提出了“准地转模式”和“斜压原始方程模式”, 才催生了真正的数值天气预报^[3-9]. 世界上首台电子计算机 ENIAC 就曾用于数值天气预报. 此后, 数值天气预报就从纯粹的基础研究转化为业务预报, 而数值模拟研究则成为大气科学学科发展和创新的重要手段, 也是气象预报得以拓广为天气预报和气候预测且水平不断提升的重要途径; 由此也拉开了如今地球系统科学数值模拟的序幕.

1.1 大气科学

先单就大气科学来说, 其研究对象是大气中的各种物理和化学运动过程及其与大气的周围环境的复杂的相互作用. 显然不能单单依靠人类的直接观测和对观测结果的分析而获得深入的有关过程和机理的科学认识. 但是又无法像经典的物理学和化学那样可以用建立实验室进行各种人类可控的实验的方法来进行研究, 于是, 从大气运动服从于物理原则及相应的数理方程出发作数值模拟, 就成为大气科学研究的“实验”手段, 大气环流模式就是这种“实验室”, 或者可以称为“数值实验室”. 有了“数值实验室”, 就可以进行可控试验来研究有关过程和机理, 既可以深刻认识, 发展理论, 又可发展和改进预报理论方法. 再与海洋和陆表过程等模式耦合又可以研究地球系统的演变, 以及人类活动, 例如土地利用、改变地表植被、增减大气中温室气体浓度的影响等. 另外, 将大气中各种气溶胶和污染物质的形成和变化的“气溶胶和大气化学”过程与大气环流模式耦合则可以模拟和预报大气中的污染物分布和变化, 做出精细的云雨等过程模式还可用于人工影响天气、调控大气污染和人工影响天气乃至气候.

1.2 海洋科学

海洋科学大体上与大气科学类似. 以研究海洋的动力学为主的“物理海洋学”是海洋科学的基本学科, 研究大气和海洋的基本动力过程就组成地球流体力学. 海洋观测尤其困难, 从而数值模拟研究更为重要. 特别是大气和海洋有非常重要又很复杂的相互作用, 海洋向大气供给热量和水汽, 大气供给海洋以动量, 它们的耦合, 成就了大气和大洋环流(包括海冰分布)的格局及“气候”的演变, 也形成了经典的 ENSO 循环和全球变暖等问题. 同时, 海洋生物资源(如渔业)和海洋生物地球化学过程(影响地球系统的碳氮循环过程)又与海洋环流密切相关, 这些问题都必须通过数值模拟研究才能弄清楚, 离开了数值模拟是难以想象的.

1.3 陆地表层自然地理过程

陆地表层的地貌和自然的物理过程就是自然地理学研究的对象, 与之密切相关的还有地表生态系统和生物地球化学过程, 这些是人类居处、生息和发展最直接最密切相关的地球环境和资源系统, 是人类的家园. 就物理的观点来说, 地表层的过程虽然复杂和多样, 但都服从于能量和物质传输的物理规律, 是其在由极不均匀的物质成分和极不均匀的相态和形态组成的多相介质中的表达. 用来研究地表层自身的演化(如风化、沙漠化、土壤形成、水土流失、河流、湖泊、湿地等)则是自然地理和全球变化的理论基础. 而它与大气环流及海洋环流模式耦合, 就成为研究气候变化、气候预测的气候系统模式以及数值天气预报模式中的地表过程模式; 它与自然灾害过程如洪水、干旱、滑坡、泥石流等的耦合就是相关的灾害过程模式; 而与河流、水循环和水资源问题相结合则成为“水文学”分系统的模式中的重要部分.

1.4 陆地生态系统和生物地球化学过程

陆地表层自然过程最具特色的是有生命的过程, 这里面包括生态系统和生物地球化学过程(系统), 把它从自然地理学中分出来, 是因为它不能简单地归结为纯粹的物理和化学过程. 除了将生命现象还原为基础的物理的和化学的过程外, 还须将竞争、分配、繁衍、演替、自控等行为抽象成数学规律. 专门针对植被系统的就叫做植被生态动力学模式; 专门

针对碳、氮循环和温室气体变化的就叫做陆表层生物地球化学过程模式. 它们成为研究全球气候和环境变化问题的“地球系统模式”的两个分系统模式.

农、林、牧、养殖业以及环境、生态和资源的安全、保护和合理利用都离不开自然地理过程和生态系统相关的模式. 而可持续发展问题、防灾、减灾问题以及病虫害和传染病预防和控制问题则还须与管理调度和调控模式相结合, 而成为控制论的新分支——自然控制论的范畴. 这里因调度和调控的对象本身是随时间而变的自然环境, 预测和调控问题要联合求解. 现代国际上热议的所谓保护气候、调控大气中 CO_2 含量的问题, 则与植被生态动力学模式和生物地球化学模式有很大的关系. 现代的百年期气候变化预测尚不能说是完整的和科学的, 因为其中大气中 CO_2 含量是各种“情景”(Scenarios)的设定, 而不是由模式计算出的. 其次, 现代热炒的用各种“地球工程”(Earth Engineering)来减排 CO_2 或增汇(吸收 CO_2)等站不论其技术可行与否, 至少都缺少定量的风险分析. 要变成可行的工程, 应该把用模式进行的预测和调控及效果评价结合起来, 即求解相应的自然控制论问题.

1.5 水文学

水资源是最重要的一种资源, 水循环也是联系地球系统岩石圈-生物圈-大气圈的纽带之一, 使得大气、地表水、土壤水及地下水等相互作用构成了一个完备耦合系统. 正确认识气候、地表水地下水-人类活动的非线性相互作用及其对水文循环过程与水资源格局的影响, 减少全球变化对水资源影响预估的不确定性, 是当代地学和资源环境领域的难点和亟待解决的重大课题. 水资源是时空四维空间的资源, 对其合理利用必须进行合理有效的调配和管理, 因此必须用模式预测和调控, 这也是典型的自然控制论问题. 我国淡水资源缺乏, 区域地理环境空间差异很大, 水文地质及气候条件复杂多变, 洪水及干旱、滑坡与泥石流等自然灾害和环境事故频发. 水资源同时受着较大的自然气候变异、不利的人为局地气候和环境变化及高强度人类活动等三方面的制约. 为此, 需要有高分辨区域陆地水循环数值模式, 充分考虑地形、地理环境、土壤植被、水文地质以及土地利用土地覆盖变化空间变异性这些复杂因素, 并和全球

地球系统模式嵌套耦合, 作为解决上述科学问题的重要手段.

1.6 固体地球

地表层以及海底以下, 就是固体地球, 其中有岩石圈、地幔对流和板块构造运动等动力学问题, 这些基本科学问题也必须用数值模式及相应的数值模拟进行研究, 并与十分有限的钻探和遥感方法的观测相验证, 帮助我们理解地壳形变、大陆形成和漂移、海底扩张、地震火山活动等地质活动. 固体地球作为气候和环境生态系统的下边界, 地核又是高压高温, 很难想象它对气候等的变化不产生影响, 因此也必须将它包括在地球系统模式之中. 科学界已经考虑到它的一些要素, 如, 全球变化对大陆冰盖如格陵兰冰盖、南极冰盖等有重要影响. 而大陆冰盖的融化将对海平面的上升具有重大影响, 有一些不完整的研究, 表明如果格陵兰冰盖全部融化, 将造成全球海平面上升 6–7 m, 而南极冰盖全部融化将造成全球海平面上升 50–60 m. 数值模拟方法是研究这些紧密耦合过程的必要手段. 此外, 在资源勘探开发方面, 如油气、矿物形成和矿脉分布等, 从定性到定量、从粗估到精算, 也都需要建模和模拟研究.

1.7 空间科学

近地空间是地球系统的上边界, 是地球系统与外界进行能量和物质交流之所. 并组成太阳辐射和物质流、行星际空间和地球空间(磁层、电离层和中高层大气)相互作用的耦合系统. 近地空间状态随时间的演变就叫做空间天气过程, 对它的研究要求把不同过程作为一个整体来研究. 空间天气数值预报能力是对空间天气的规律的认识能力、监测能力以及在此基础上的建模能力和预报技术多方面的综合. 当前空间天气预报的水平与航天和宇航事业的实际需求还有较大差距. 一方面要大力开展空间探测和进行监测; 另一方面需要进行理论研究和建立相关的预报模式. 迄今为止, 针对典型的空灾害性天气事件, 从太阳表面太阳风暴驱动源出发, 贯穿日地空间, 最终到地球空间的基于物理规律的整体集成预报模式, 在国际上正处于起步阶段. 目前我国科学家正致力于建立达到国际一流水平、有自主知识产权的我国第一代日地复杂系统的空间天气预报集成模式.

2 发展地球系统科学模拟可以更好地解决国家有关重大需求

将地球系统模式和超级计算机及数据系统有机结合即为地球系统科学数值模拟装置(或称地球模拟器),它是应对气候变化、精细化天气预报、气象灾害的防灾减灾、水资源的规划与管理、大气污染综合治理、生态安全预测和评估、地震减灾等问题不可替代的科学工具,下面举例说明.

2.1 应对气候变化

气候与生态环境变化问题是关乎我国可持续发展的重要因素,也是国际气候环境外交的核心问题之一.利用地球系统模式阐明全球气候和环境变化的机理和进行预测,已经成为当今国际地球系统科学研究的重要内容,同时也为国际上就气候与环境变化问题进行协商和制定协议的科学问题提供关键的科学依据.因此,地球系统科学数值模拟技术是我国制订应对气候变化措施的不可缺少的科学支撑.

2.2 精细化天气预报

数值预报是天气预报最为重要的手段之一,而云分辨模式是深入模拟和研究引发暴雨和强对流等灾害性天气的中小尺度系统的有力手段.为了提高灾害性天气的精细化预报水平,为国家实施防灾减灾应急措施提供技术支撑,发展云分辨数值模式对提高我国灾害性天气预报水平具有重大价值,已受到气象、航空航海、环保和军事等部门的高度重视,并开始获得巨大的经济效益和社会效益.

2.3 气候灾害及次生灾害的高分辨模拟与预测

现有全球气候模式一般分辨率较粗,对区域尺度的局地气候灾害及次生灾害事件的模拟和预测能力薄弱,亟需构建适合我国气候特点的高分辨率、高效能的气候灾害及其引发的次生灾害的模拟和预测系统.建成一个包含适合我国气候特点的统计降尺度模型和高分辨率、多物理过程区域气候集合模拟预测软件系统可以对暴雨、暴雪等气候灾害进行科学有效预测.在此基础上,还可以考虑滑坡泥石流的动力学原理,构建滑坡泥石流动力预测模型,可实现对气候灾害及其引发的次生灾害的科学有效预测,提高我国气候灾害预测和防治能力,为包括气象、水文、

民政及国土资源等多部门决策提供科学依据.

2.4 水资源的规划与管理

研制包含水循环及其伴生的水沙、水环境、水生态等过程的流域水文模型、地下水模型、水土侵蚀模型、水质水量联合模型、生态水文模型等,对于水资源的规划和管理具有非常重要的价值.研发大型的水循环综合模拟软件系统,可以满足不同时空尺度和适应不同自然与人文环境的大规模数值模拟的需要,并为流域水资源科学评价、合理利用和有效保护提供重要的技术支撑平台.

2.5 区域大气污染的协同控制和综合治理

我国城市群的区域大气污染问题日益突出,大气污染类型也正从煤烟型污染转变为一次污染、二次污染并存的复合型污染,灰霾、光化学烟雾、酸沉降等多种问题并存,呈现出煤烟型与氧化型污染共存、局地污染与区域污染相叠加、污染物之间相互耦合的复合型大气污染.近年来我国东部严重的大气污染对人体健康带来很大威胁.因此,研制建立高性能的大气污染预报预警系统是目前我国环境保护的重要组成部分.大气污染数值模式可以解析不同过程和来源相对贡献的时空分布,还可以实现对灰霾天气的预报预警,方便进行各种污染控制措施的效果评估,并可协助制定污染协同控制方案.

2.6 区域生态安全评估与预测

生态系统长期的开发利用和巨大的人口压力,使我国生态系统及生态系统服务功能严重退化.由此引起的水资源短缺、水土流失、沙漠化、生物多样性减少等生态问题持续加剧,已对我国生态安全构成严重威胁.区域生态过程及其与气候的耦合模拟与预测区域生态安全状况、变化和趋势评估具有重要意义.

3 国内外现状及发展趋势

3.1 从国家层次组织研发地球系统模式

国际上第一个海气耦合模式在 20 世纪 60 年代末由美国地球流体力学实验室(GFDL)建立,主要用于气候变化研究.随后,国际上很多研究机构陆续开展大气模式、海洋模式、陆面模式、海冰模式及其耦合

模式的研发和应用。早期的分量模式和耦合模式典型的空间分辨率是几百公里, 其中的物理过程也相对简单。因此, 当时一个研究小组就能独立发展耦合气候模式。到了 20 世纪 90 年代, 气候模式的分辨率不断提高, 其包含的各种物理过程不断增加、并且更加复杂, 所需要的计算资源也呈几何级数不断增长。因此, 耦合气候模式的发展逐渐变成了一个巨大的系统工程, 需要来自数学、物理、化学、大气、海洋、生态和计算机各个学科的科学家和工程师通力合作才有可能完成。为了应对气候模式研发的复杂化和工程化, 科学界开始认识到必须自上而下、特别是从国家层面上统一组织模式研发。当前在气候/地球系统模式研发及其模拟研究领域占据国际前沿位置的研究机构, 分别来自美国、英国、德国、日本和法国。

美国国家大气研究中心(NCAR)由美国国家自然科学基金会资助。NCAR 在 1994 年和 2000 年两次提出《通用气候系统模式研究计划》未来五年计划, 美国各主要大学和研究机构参与了该计划, 并建立了完整的管理机构和研究实体。该计划的目标是: 在一个统一的灵活而协调的框架内, 将性能优良的气候系统各分量模式实现耦合, 从而发展一个优秀的耦合的气候系统模式, 一方面使各方面科学家更方便、更容易地参与模式发展, 另一方面, 针对气候变率和全球变化等问题进行高水平科学研究, 为国际和国内决策提供科学依据。除美国国家自然科学基金会外, 美国国家海洋和大气局(NOAA)、能源部(DOE)、国家航空航天局(NASA)等单位, 也支持发展气候系统模式。2001 年, 在 NASA、国防部和国家自然科学基金会的共同资助下, 美国启动了“地球系统模拟框架(ESMF)”, 有 19 个实力雄厚的研究机构投入到该计划的实施中。在 IPCC 第四次科学评估报告之后, 国际上开始认识到发展地球系统模式的重要性。因此, NCAR 在 2009 年进一步提出了《通用地球系统模式(CESM)科学计划(2009-2015)》, 目标是发展一个包括完整地球生物化学过程的地球系统模式, 用于研究地球系统各种时空尺度变化的内在规律和机制, 并利用 CESM 预估未来的气候和环境变化。

欧洲各国联合提出了欧洲地球系统模拟网络(ENES)计划, 包括地球系统模拟集成(PRISM)和气候资料存储与分发两个计划。PRISM 自 2001 年启动以来, 欧洲各国的 22 个研究机构投入了该计划的实施。其目标是建立一个高效的欧洲地球系统模拟和气候

预测系统以及超级计算机平台, 选用 10 个优秀的耦合气候模式进行集成模拟研究。

日本提出了两个气候研究计划, 一是从 1997 年开始的“全球变化前沿研究系统(FRSGC)”计划, 目标是预测异常气候、全球变暖和生态破坏等灾害。与此同步启动了“地球模拟器”计划, 于 2002 年研制成功当时世界上最快的超级计算机系统——地球模拟器。并在国际上率先开展了超高分辨率的全球气候系统模式的发展和模拟研究。日本的地球模拟器不仅用于长期气候变化的数值模拟研究, 而且还用于跨季度的短期气候预测试验并实时发布预测结果。

澳大利亚、加拿大、挪威、韩国等国也都提出了各自的气候系统模式发展计划。全球参加最新的国际耦合模式比较计划(CMIP5)的气候/地球系统模式已经达到 40 余个。

总之, 世界发达国家都优先考虑建立一个可供地球系统模式持续发展的总体体系结构技术平台。基于这个平台, 来自地球科学不同领域的学者可以针对不同的科学问题开展相关研究, 从而推动整个地球系统模式的发展。另外, 上述计划都是一种国家或跨国家的地区性行为, 有专门的机构来协调和组织计划的实施, 有持久、稳定的经费支持, 并且有很多相关的研究机构和学者利用上述公共技术平台参与协作, 这样既有效地保障了在人力和财力资源上的集中投入, 又使得来自不同领域的学者能够利用该平台专注发挥自己的特长、研究所关心的科学问题。

3.2 研发区域环境模拟系统服务重大应用

地球系统模式空间分辨率有限(主要是由于计算机资源的限制), 其科学内涵在区域尺度上也经常是粗糙的, 全球单一的物理、化学表征难以体现区域差别, 因而对区域模拟问题其不确定性太大, 不同的模式经常给出不同、甚至完全相反的结论。全球模式不可能满足所有区域高精度环境模拟的需要, 为细致描述诸如土地利用、城市化等区域尺度地表过程变化、污染排放等对气候和环境的影响, 必须开发区域高分辨率模式, 目前发达国家在其本国的区域模拟和预测系统可以达到 5–10 km 的空间分辨率甚至更高。

中国气象局致力于发展区域天气预报模式 GRAPES, 中国科学院大气物理研究所(大气所)发展了我国自己的嵌套网格空气质量模式 NAQPMS 以及

区域环境系统集成模式(RIEMS). 大气所还发起了有十个国际优秀区域气候模式参加的“亚洲区域模式国际比较计划”. 中科院大气所还发展了一个“灵活的区域海洋-大气-陆面过程模式”FROALS, 用于季风区海气相互作用过程研究, 并参加 CORDEX 国际区域气候模拟比较计划. 伴随着计算机和计算技术的飞速发展, 区域环境模拟系统在高精度方向上加速发展, 集成度越来越强.

4 我国地球系统科学模拟研究的成就

我国是世界上在地球科学中应用数值模拟研究方面最早提出、开展和很有成就的国家之一. 中国科学院地球物理研究所(即大气所等几个研究所在 1966 年前的名称)所长赵九章(两弹一星元勋)早在 20 世纪 50 年代就旗帜鲜明地提出大气科学和整个地球科学必须“数理化 and 工程化”, 大力推动与数理科学的交融和合作; 其后, 顾震潮、叶笃正(国家最高科技奖获得者)和曾庆存等人, 都大力推动、落实和发展这些思想, 使大气所既重本门科学相应的实际问题和观测试验, 又重理论和数值模拟, 蔚成风气. 期间顾震潮参加了世界上数值天气预报的创立工作(1949–1963 年间)和提出应用“控制论”观点. 后来曾庆存则是世界上推动世界数值天气预报和建立数值气候预测的主将之一^[8–15], 他本人深入研究了数值天气预报和气候预测的数理基础问题(曾庆存, 1979)^[9], 卓有成就; 在 20 世纪 80 年代初提出应该大力开展地球科学应用数值模拟研究, 指出未来地球科学的突破必定是以有限的观测为基础通过大规模数值模拟研究而达到的^[10]; 在大气所建立了气候系统模式(当时虽不很完整)并在世界上最早用它做出短期数值气候预测^[11]. 之后, 他又相继先后提出了“气候和环境生态动力学”模式的建立和模拟^[12,13], 和建立了作为控制论的一个分支的“自然控制论”框架及其相应理论方法(1995–1996 年发表)^[14,15], 以及进一步推进“气候与环境预测和调控的数学问题”的研究(2000 年提出, 2002 年正式发表). 这些可说是“地球系统模式和模拟研究”的最早来源之一和最初阶段中的一批成就.

4.1 研制了气候系统模式

自 20 世纪 80 年代初起, 大气所的科学家首先开始研发中国的气候系统模式, 并在完整考虑气候系

统模式的动力学框架和整体协调性的基础上, 于 20 世纪 80 年代初建成我国第一个大气环流模式—IAP2L AGCM^[17], 并参与国际大气环流模式比较计划(AMIP); 随后, 又研制出具有我国独创特性的我国第一个海洋环流模式^[18]. 1990 年, 曾庆存等人^[16](1990)完成了国际上首个跨季度气候距平数值预测试验. 基于 IAP2L AGCM, 建立了和混合层海洋模式的耦合, 完成了我国首个全球变暖数值模拟试验(王会军等人, 1992)^[19], 并首次参与第一次 IPCC 报告评估(1992 年补充报告); 第一个陆面过程模式 IAP94 完成于 1995 年(Dai et al, 1996)^[20], 并参加国际 PILPS 计划, 并成为 NCAR 通用陆面过程模式 CLM 的三个蓝本模型之一. 大气所还发展了考虑植被动态变化的植被大气相互作用模式、动态植被模式及其火干扰模式^[21–25].

中国科学院的科学家还发展了不同版本的 IAP 气候系统各分量模式及其耦合模式, 包括: 大气环流模式 IAP AGCM, GAMIL, SMAIL, 海洋环流模式 LICOM, 以及耦合气候系统模式 GOALS 和 FGOALS 等及其不同版本, 并广泛应用于气候科学的研究. 特别是耦合模式 GOALS 和 FGOALS 参与了历次国际耦合模式比较计划(CMIP), 结果被几次 IPCC 科学评估报告所引用^[26–33]. 在上述物理气候系统模式的基础上, 中国科学院大气物理研究所的科学家正在海洋模式和陆面模式中分别引进碳循环过程, 逐步构建地球系统模式.

大气所是我国唯一参加了全部 5 次 IPCC 报告的模式结果评估的研究机构, 模式具有鲜明的自主设计和研发特色, 形成了我国自己的气候系统模式体系, 其中大气和海洋模式已发展到第四代. 完整的气候系统模式可较好地模拟出当代气候状况, 尤其是能很好地模拟出东亚季风气候的平均状态和变化, 如亚洲季风雨带的结构和随月份的推移, 甚至季节突变现象等. 作为世界上最早开展气候模式研制的研究群体之一, 其率先提出的一些模式研制关键技术(如: 标准层结扣除、自由起伏海面等), 已为国际上一些著名大气科学研究机构(如欧洲中期数值天气预报中心)所采用. 利用所研制的气候系统模式, 大气物理研究所开展了人类活动对气候变化影响的数值模拟, 并将结果向全世界公开. 其预估结果不仅被历次 IPCC(政府间气候变化专门委员会)科学评估报告(1992, 1995, 2000, 2007, 2013)所引用, 而且参加了

古气候模式比较计划(PMIP)、大气模式比较计划(AMIP)、20 世纪气候模拟比较计划(C20C)、大气模式水球比较计划(APE)、气候预测与社会应用计划(CliPAS)等一系列国际模式比较计划。目前, 大气所的海冰模式已应用于国家海洋环境预报中心的海冰数值业务化预报系统。

进入 21 世纪, 除大气所之外, 国内其他研究和业务机构也开始发展气候系统模式。国家气候中心参加了最近两次的 IPCC 报告的模式结果评估并被两次报告所引用。对于 2013 正式出版的 IPCC 第一工作组第 5 次科学评估报告, 我国共有 5 家研究单位提供了数值模拟结果。总体说来, 国内虽然已经建立了不同复杂程度的气候系统模式, 但是完整的地球系统模式的研制在我国还没有完全开展(例如至少缺少生态系统动力学和地球生物化学过程的模式这一环)。鉴于地球系统模式研究的重要性, 中国科学技术协会于 2005 年召开了主题为“地球系统模式研制及其应用”的中国科协青年学者论坛, 此后, 在 2007 年 CNC-WCRP, CNC-IGBP, CNC-IHDP 和 CNC-DIVER SITAS 联合学术大会上, 发展地球系统动力学模式的重要性得到了广泛的关注。随后, 中国科学院、国家科技部和国家自然科学基金委员会等机构相继支持研制地球系统模式。目前, 我国学者已经初步建立起地球系统动力学模型的框架, 包括新一代高分辨率大气-海洋-陆表面过程耦合模式、流域水文和陆表过程模式、全球植被生态系统动力学模式、气溶胶与大气化学过程模式、陆地和海洋生化过程模式等。

4.2 建立了地球系统模式的雏形

自 2007 年启动中国科学院地球系统模式平台(CAS-ESM)的研发以来, 除更新改进气候系统模式外, 在“生态和环境系统”各模式分系统方面也有许多独创特色。例如全球植被动力学模式 IAP-DGVM 能够正确模拟出灌木林及其分布并给出正确的植被类型与气候因子的关系, 能够合理模拟出全球火焚毁植被的强度和分布, 特别是给出合理的火灾导致的 CO_2 等的排放(是世界上第一个能够做到这点的模式), 从而都被国际所采用。又如气溶胶与大气化学模式能正确描述像沙尘和海盐气溶胶等的发射和进入大气边界层过程, 以及正确模拟出我国是世界沙尘净输入和主要的沉降积聚地区。而区域环境系统

集成模式(RIEMS)则是国际上突出人类影响(土地利用、工业排放)和模拟能力最强的模式之一。

研制的地球系统动力学模式由 7 个分系统模式(国际上也是如此)及它们间相互耦合组成, 这 7 个分系统为: 大气环流模式、大洋环流模式(含海冰模式)、陆表过程模式、(全球)植被动力学模式、气溶胶和大气化学模式、海洋生物地球化学模式、陆表生物地球化学模式。这些分系统模式均为我国自创特色。在物理过程参数化研究上, 与美国 UIUC 大学水文勘探研究中心合作, 一起研制了云-气溶胶-辐射数值集合系统。该系统基本涵盖了当前国际上几个大研究机构(如美国 NCAR, NASA, NOAA, 欧洲 ECMWF 以及加拿大 CCCMA)使用的气候/天气模式中的各种云以及辐射参数化方案, 其中云型包括所有可能的高、中、低云及各相水含量和滴谱分布、云的重叠和云在次网格的不均匀性等。全球大洋模式在 IAP-LICOM 的基础上做了进一步的改进, 在海洋上混合层原有的太阳短波辐射穿透的基础上增加了淡水盐度混合方案, 使盐份上边界条件变为适定的。陆面过程模式以由我国科学家为主研制的 CoLM 和其修改版 CLM 为蓝本, 加入了一系列改进, 主要包括引入植被高度季节变化的影响、植被凋落物对辐射、温度、蒸散发、渗流等的影响等。试验证明在许多地区的模拟结果都得到了改善。

4.3 研发了区域环境系统集成模式

在研制全球模型的同时, 大气物理所还研发了突出人类影响的区域环境系统集成模式(RIEMS), 构建了区域主要自然和人为强迫的区域气候-环境系统定量模拟平台。该模式的创新点或特色体现在: (1) 强调了人类活动影响下的多圈层相互作用, 实现了大气动力过程, 辐射过程、陆面物理和水文过程、化学过程和生物过程之间的连接和耦合, 并通过这些过程引入土地利用和工业排放两类重要人类活动的影响; (2) 建立并双向耦合了对流层大气化学输送模块、水文过程模块、和动态植被-大气相互作用模式; (3) 基于野外站点观测和卫星遥感数据改进了陆面参数化方案; (4) 通过多学科的交叉和集成模拟深化了东亚季风驱动下的气候变化机理研究, 提高了未来区域气候变化预测能力, 模拟结果显示大规模人类活动甚至可以通过影响季风系统导致东亚区域气候的变化。

4.4 研发了空气污染数值模式系统

中国科学院大气物理研究所国家重点实验室率先在全国研制成功了城市空气污染数值预报模式系统. 该模式系统主要由污染源模式、生态下垫面参数化模式、天气尺度气象模式、城市尺度气象模式、高分辨对流层化学模式等组成. 其中有两个主要部分: 一个是中尺度 β 气象模式, 这是一个流体非静力的动力学模式, 可以很好地模拟复杂下垫面非均匀性对边界层结构的影响以及复杂地形条件下局地环流的基本特征; 另一个是高分辨率大气化学模式, 它的特点是求解物质守恒方程组(包括平流、扩散、化学转化和干湿沉积过程及源排放率)、具有高分辨的垂直分层, 能很好地反映边界层湍流垂直结构、源高的贡献及其冠层垂直结构对沉积过程的影响, 并考虑了云过程(包括次网格尺度再分配、液相化学和湿清除三个过程). 该模式能预报 24–48 小时的多种污染物质的浓度分布, 在济南、广州、杭州和北京等大城市开展了应用试验, 二氧化硫、氮氧化物、总悬浮颗粒物和臭氧等的预报浓度指标均达到或超过国家规定的要求, 取得了良好的社会效果, 受到国家和地方环保部门的高度评价. 利用该模式系统与北京市气象局和南京大学大气科学系合作, 在北京市 2008 奥运会场馆环境评估中发挥了重要作用. 大气所与防化学院合作并以后者为主, 建立了以自然控制论为基础的化学和核污染的扩散和处理, 以及化学灾害事件应急处理和传染病的传播预测和调控模式.

另外, 大气所还发展了区域酸雨模式, 通过数值模式量化了沙尘输送对于东亚酸雨分布的影响, 结果表明沙尘及其土壤粒子的碱化(中和)作用可使得中国北方降水的 pH 值增加 0.8–2.5, 韩国增加 0.5–0.8, 日本增加 0.2–0.5. 深入开展了大气酸沉降对我国典型土壤长期影响的数值模拟研究, 通过数值模拟结果发现, 仅考虑 SO_2 排放量的削减或增加而忽略盐基离子沉降量的变化很可能达不到保护生态环境的预期目的.

4.5 研发了一系列气候和天气模拟、预测技术

我国是开展数值天气预报研究较早的国家之一, 从 20 世纪 50–60 年代就已经开展起来了. 但是数值天气预报的业务却是始于 1980 年代, 先后建立起了

欧亚区域短期天气预报模式、北半球及亚洲区域数值天气预报模式、以及引进消化后建立起来的全球数值天气预报模式. 目前正在业务化实时运行新一代自行研发的中尺度数值天气预报模式. 与此同时, 军队也开展了数值天气预报研究和业务工作, 并取得了很好的进展.

近些年来, 大气所提出了一系列气候预测新方法和新技术, 特别是年际增量新预测方法、统计降尺度方法、模式和统计相结合的方法等等, 分别建立了我国季节性降水、气温、西北太平洋台风活动、我国北方冬春季沙尘活动等的预测方法和模型, 不同程度地提高了预测的准确度. 利用热带相似的理论改进了欧洲耦合模式对东亚夏季降水的预测能力. 利用年际增量方法改进欧洲多耦合模式对东亚季风的预测. 发表了大批的高水平学术论文和专著.

我国科学家还利用动力降尺度的方法, 检验了模式系统对我国气候的模拟能力, 结果显示动力降尺度可以显著提高对温度和降水的模拟能力; 同时, 还利用动力降尺度方法对包括江淮地区暴雨、东北地区暴雪进行模拟研究; 还进行了我国中世纪暖期的动力降尺度模拟研究. 另外, 将分布式水文模式用于滑坡泥石流统计和动力学模型中, 并模拟验证了中国、美国、印度尼西亚等多国的多次滑坡泥石流灾害事件, 证明了高分辨率滑坡泥石流模型的可行性和有效性.

发展了气溶胶和云粒子全分档模式. 在总体微物理参数化和 WRF 的耦合模式中加入了各类粒子碰撞并合引起的云中电荷分离机制, 为模拟云中闪电、云地闪电, 以及因闪电而引起的电荷中和与四维电磁场变化打下了良好的基础. 同时将雷达观测资料同化到模式中改善模式初始场.

在灾害性天气研究中提出了波作用密度, 湿热力平流参数, 水汽螺旋度, 热力螺旋度, 水平散度通量, 水汽散度通量和热力切变平流参数等动力预报因子, 建立了集合动力因子暴雨预报系统. 从 2008 年 5 月至今进行了该系统的自动业务化运行, 对北京地区夏季暴雨和强对流等局地灾害性异常天气进行实时动力临近预测; 目前该系统已经在北京军区空军气象中心, 北京市气象台, 贵州和江苏省气象台和吉林省人影办以及济南市气象局等多个省市气象台推广使用, 为暴雨预报水平的提升做出了贡献.

把卫星、多普勒雷达和加密雨量站的观测资料同

化到中尺度数值模式中,建立了典型天气背景下积层混合云的三维立体结构概念模型,定量地分析积层混合云降水机制、冷云过程和暖云过程、催化-供给效应、人工增雨潜力和作业效果评估,开发了以 ARPS 模式为基础,同时结合卫星和雷达观测的积层混合云作业潜力区识别系统,提供积层混合云人工增雨潜力区的指导产品。

4.6 我国地球系统模式研发方面的不足

总之,我国的气候/地球系统模式研发工作起步较早、基础好,但是我国的模式的自主创造性和先进性仍然十分不足,这也使得我国的模式的性能仍然在总体上落后于世界领先水平。在模拟发展的组织方面,缺乏系统的管理和组织,缺乏国家层次的协调和持续的经费支持,有限的模式研制队伍分散在不同研究单位,各自独立申请项目、独立研发模式,低水平重复研究的现象比较严重,严重制约模式的发展。地球系统模式需要高性能计算机平台来支撑。对比国外的超级计算机计算性能,我国现有的计算能力远远不能满足地球系统模式研发的需要。

由于地球科学有众多的学科,观测手段和实验方法不尽相同,因此地球科学的数据从种类、格式、时空分辨率等都存在巨大差别,而随着各类遥感手段的应用,数据量呈现出爆炸式增长。如何将这些纷杂的数据有效收集、整编和管理,并与全球或者区域的地球系统模式相结合,是未来地球系统科学和模式研制方面的一个重大任务。

5 未来 5–10 年我国地球系统科学模拟研究的发展目标和任务

首要的任务是研制具有我国独创优势的具有较高分辨率的全球地球系统模式,全球地球系统模式包括完整的物理气候系统与生态环境及生物地球化学过程耦合的地球系统模式,主要包括大气、海洋、海冰、陆面、大气化学和气溶胶、生态、水文、碳循环、地球生物化学等子系统模式或分量模块并通过一个通量耦合器实现它们之间的完整耦合,同时还将拓展包括空间天气、固体地球、大陆冰盖等过程模块,模式水平分辨率应该达到 5–10 km。

同时,我国应抓紧研制建立我国的区域高精度环境模拟系统,其空间分辨率达到 1 km 左右,形成

对我国主要环境要素的模拟和预测能力,主要功能包括:区域气候及其次生灾害的模拟预测;区域云可分辨数值天气预报及集合预报;区域水循环模拟与水资源模拟预测;区域大气污染模拟预测;区域作物生产模拟预测;区域生态安全评估与预测;区域地震和地震波模拟等。

另外,为了形成强大的预测能力,还要建成基于同化分析及反演理论,有效应用多源观测资料(包括各种常规及遥感观测资料,特别是卫星观测资料),我国的周边区域环境(主要包括大气、陆地、海洋环境等)高精度、高分辨率分析数据集。还要包括大气资料同化、海洋资料同化、陆面资料同化、多源资料融合、大气化学及污染资料同化、关键环境参数反演及地球观测系统模拟子系统和若干应用示范。当然,超级计算机系统的设计和建设上也必须考虑地球系统科学模拟的需要,成为专用的地球模拟计算系统,才能最大效率地提供地球系统科学模拟计算,这一点极其重要。

6 小结

由大气圈、水圈、岩石圈、生物圈(包括人类)以及地幔与地核组成的地球系统,其中的物理、化学和生命过程及其演化规律异常复杂。阐明地球系统的各圈层之间相互作用机制及演化规律和机理,对全球环境变化预测具有重要科学意义和现实应用意义。描述上述复杂系统的动力数值模式,即地球系统模式,是地球系统科学研究和有关预测的主要手段,它可使地球系统科学研究像物理和化学那样在实验室中设计和进行各类可控的科学试验,细致区分和理解各圈层及其相互作用的因子和规律。

地球系统科学数值模拟装置是由地球系统模式、超级计算机和数据系统组成的有机整体,是现代地球系统科学研究的重要科学平台,可为科学新发现、新突破提供不可替代的机遇。同时对国家社会经济发展具有重大意义,是解决应对气候变化、气象灾害的防灾减灾、水资源的规划与管理、大气污染综合治理、生态安全预测和评估等问题不可替代的科学工具。因此,我国目前非常紧迫的任务是:集中我国地球科学和计算科学研究力量,发挥学科交叉、资源共享优势,注重原始性创新与集成创新相结合,建成具有一系列我国独创优势的地球系统模式和区域环境模拟系

统, 并建设软硬件指标、装置规模及综合技术水平国际先进的地球系统科学数值模拟装置. 从而最大程度地满足多学科前沿发展对地球系统科学数值模拟实验条件的强烈需求, 力争使我国此领域研究尽早

达到国际一流水平, 极大提高解决国家重大需求的科学能力, 还可建成包括我国地球环境站点观测和卫星雷达等遥感观测资料的高精度、高分辨率数据库和格点分析数据和同化数据集.

致谢

本文部分素材基于中国科学院组织的有关地球系统模拟研究的众多研讨及其文字资料, 许多学者为此做出了贡献, 包括曾庆存、张明华、俞永强、林朝晖、周广庆、周天军、廖宏、范可、王自发、曾晓东、郑循华、徐永福、马柱国、王斌、毕训强、刘海龙、沈学顺、李俊、张凤、戴永久、宋连春、冯学尚、胡永云、吴炳芳、石耀霖、王水、陈运泰、张木兰等等, 在此一并致谢!

参考文献

- 1 Bjerknes V, Bjerknes J, Solberg H, et al. *Physikalische Hydrodynamik mit Aufwendung anf die Dynamische Meteorologic*. Berlin: Springer-Verlag OHG, 1933
- 2 Richardson L H. *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge: Cambridge University Press, 1922
- 3 Кибель И А. Приложение к метеорологии уравнений механики баро-клинной жидкости. - Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 1940, М5: 627-638
- 4 基别尔. 短期天气预报的流体力学方法引论. 北京: 科学出版社, 1959
- 5 Rossby C G, and Collaborators. Relation between variations in the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. *J Mar Res*, 1939, 2: 38-55
- 6 Charney J G. On a physical basis for numerical prediction of large-scale motion in the atmosphere. *J Meteorol*, 1949, 6: 371-385
- 7 Charney J G, Fjörtoft R, Neumann J V. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 1950, 2: 237-254
- 8 ЦЭЭН ЦИН-ЦУНЬ. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ К КРАТКОСРОЧНОМУ ПРОГНОЗУ ПОГОДЫ В ДВУХУРОВЕННОЙ МОДЕЛИ. *Sci China-Math*, 1963, 6(3): 403-424
- 9 曾庆存. 数值天气预报的数学物理基础. 北京: 科学出版社, 1979
- 10 曾庆存. 大气科学中的数值模拟研究——理论研究和实用相结合. *大气科学*, 1985, 9(2): 186-194
- 11 Zeng Q C, Zhang B L. On the seasonal variation of atmospheric general circulation and the monsoon. *Chin J Atmos Sci*, 1998, 22(3): 211-220
- 12 曾庆存. 气候和环境生态系统的动力学问题. *大气科学*, 1993, 17(1): 121-125
- 13 Zeng Q C. Silt sedimentation and relevant engineering problem-an example of natural cybernetics. In: *The proceedings of ICIAM (invited lectures)*. Berlin: Mathematic Research, Akademik Verlag, 1995
- 14 Zeng Q C. Natural cybernetics. *Bull Chin Acade Sci*, 1996, 10(1): 16-21
- 15 曾庆存. 气候与环境预测和调控中的数学问题. *气候与环境研究*, 2002, 7(1): 1-6
- 16 曾庆存, 袁重光, 王万秋, 等. 跨季度气候距平数值预测试验. *大气科学*, 1990, 14(10): 14-25
- 17 Zeng Q C, Zhang X H, Liang X Z, et al. Documentation of IAP (Institute of Atmospheric Physics) Two-level Atmospheric General Circulation Model. DOE/ER/60314-H1, 1989, 383
- 18 Zhang X H, Liang X Z. A numerical world ocean general circulation model. *Adv Atmos Sci*, 1989, 6(1): 44-61
- 19 王会军, 曾庆存, 张学洪. 大气中 CO₂ 含量加倍引起的气候变化的数值模拟研究. *中国科学 B 辑*, 1992, 6: 663-672
- 20 Dai Y J, Zeng Q C. A land surface model (IAP94) for climate studies. Part I: Formulation and validation in off-line experiments. *Adv Atmos Sci*, 1997, 14: 433-460
- 21 Ji J J. A climate-vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface. *J Biogeogr Chem*, 1995, 22: 2063-2068
- 22 Zeng X D. Evaluating the dependence of vegetation on climate in an improved dynamic global vegetation model. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27: 977-991
- 23 Zeng X D, Li F, Song X. Development of the IAP dynamic global vegetation model. *Adv Atmos Sci*, 2014, 31: 505-514
- 24 Li F, Levis S, Ward D S. Quantifying the role of fire in the Earth system-Part 1: Improved global fire modeling in the Community Earth System Model (CESM1). *Biogeosciences*, 2013, 10: 2293-2314

- 25 Li F, Zeng X D, Levis S. A process-based fire parameterization of intermediate complexity in a Dynamic Global Vegetation Model. *Biogeosciences*, 2012, 9: 2761–2780
- 26 Guo Y F, Yu Y Q, Liu X Y, et al. Simulation of climate change induced by CO₂ increasing for East Asia with IAP/LASG GOALS model. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18: 53–66
- 27 Yu Y Q, Zhang X H, Liu H. A flexible coupled ocean-atmosphere general circulation model. *Adv Atmos Sci*, 2002, 19(1): 169–190
- 28 Yu Y Q, Zhang X H, Guo Y. Global coupled ocean-atmosphere general circulation models in LASG/IAP. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21(3): 444–455
- 29 Yu Y Q, Zhi H, Wang B, et al. Coupled model simulations of climate changes in the 20th century and beyond. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25(4): 641–654
- 30 Yu Y Q, Zheng W P, Wang B, et al. Versions g1.0 and g1.1 of the LASG/IAP Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28(1): 99–117
- 31 Li L J, Lin P F, Yu Y Q, et al. The flexible global ocean-atmosphere-land system model, Grid-point Version 2: FGOALS-g2. *Adv Atmos Sci*, 2013, 30(3): 543–560
- 32 Wu G X, Liu H, Zhao Y, et al. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance. *Adv Atmos Sci*, 1996, 13: 1–18
- 33 Bao Q, Wu G X, Liu Y M, et al. An introduction to the coupled model FGOALS1.1-s and its performance in East Asia. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27: 1131–1142

The earth system simulation

WANG HuiJun^{*}, ZHU Jiang & PU YiFen

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

From 1970s, the climate system has been studied as a whole by considering the coupled atmosphere-ocean-cryosphere-land surface physical system. Beginning from early 2000s, coupling between the physical climate system processes and biogeochemical processes has been one of the most important research focuses. This is because that the biogeochemical processes such as the carbon cycle and nitrogen cycle plays very important roles on the climate and environmental changes. Therefore, there have been great efforts to develop numerical models to simulate the above processes in the coupled earth system. There numerical models are the so-called earth system models. The simulations are performed by numerical integrations in the supercomputers. The earth system model is the most complex one in natural science numerical models, reflecting the comprehensive expressions of the earth system knowledge, and is the pacemaker of the earth science advances in different countries and groups. The earth system model is the most important tool for the earth system science development. This paper discusses the scientific background, application demands, the scientific achievements in China, and the future objectives and tasks.

earth system, earth system model, biogeochemical cycle, climate change

PACS: 05.70.Np, 92.60.Ry, 92.70.Ly, 91.62.La

doi: 10.1360/SSPMA2014-00155