

区域气候模拟研究及其应用进展

刘鸿波^{1,2} 张大林³ 王 斌¹

- 1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029
2 中国科学院研究生院, 北京 100039
3 美国马里兰大学气象系, 马里兰 20742-2425

摘要 区域气候模拟研究在过去十几年里取得了显著的进步。经过广泛的发展和不断的检验, 区域气候模式现在已经成为气候研究和业务预报的重要工具。目前已经发表了很多令人鼓舞的结果, 其中包括过去极端气候事件的模拟, 当前气候发展演变和未来气候变化的预测, 特别是对月和季节尺度气候的模拟与预测。通过对高分辨率和动力连续的区域气候模式结果的分析, 人们对于周-季节时间尺度的各种物理过程, 包括陆面和水文过程、边界层、云和降水、云-辐射相互作用的认识也在不断的深入。然而, 区域气候是多尺度扰动(如中尺度、天气尺度、行星尺度扰动)和多圈层系统(如大气圈、生物圈、水圈、冰雪圈、陆面)相互作用的结果, 同时物理过程本身具有不确定性, 人们对一些复杂的物理过程, 特别是土壤湿度作用以及云-气候反馈过程也缺乏深刻的理解, 因此该领域的研究还面临着很多挑战。作者重点总结并评述了区域气候模式对现在和未来区域气候模拟、极端天气和气候事件模拟、物理过程研究、短期气候预测几方面应用的研究进展, 最后讨论了区域气候模式发展在上述各方面, 特别是周-次季节时间尺度区域天气和气候的模拟与预测所面临的挑战和前景。

关键词 区域气候模式 气候模拟与预测 极端气候事件 物理过程 周-次季节天气和气候

文章编号 1006-9585 (2006) 05-0649-20 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Recent Advances in Regional Climate Modeling and Applications

LIU Hong-Bo^{1,2}, ZHANG Da-Lin³, and WANG Bin¹

- 1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*
2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*
3 *Department of Meteorology, University of Maryland, Maryland 20742-2425, USA*

Abstract Significant advances have been made in regional climate modeling research during the past decades. Numerous regional climate models (RCMs) have now become an important tool for climate research and operational prediction after extensive model developments and verifications. Many encouraging results have been published in simulating historic extreme climate events and predicting our future climate, particularly in the monthly to seasonal climate variables. By analyzing the high-resolution, dynamically consistent model datasets, remarkable improvements have been made in understanding various physics processes, such as land-surface and hydrological processes, the planetary boundary layer, clouds and precipitation, cloud-radiation interaction at the weekly to seasonal scales. However, RCMs still face many challenging issues due to the complicated scale interaction over a large-range temporal and spatial scales (e.g., from mesoscale to synoptic and planetary scale disturbances), the interaction of individ-

收稿日期 2005-04-25 收到, 2006-03-10 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40475044

作者简介 刘鸿波, 女, 1981年出生, 博士生, 主要从事区域气候模拟和分析方面的研究。E-mail: hongboliu@mail.iap.ac.cn

ual climate sub-systems (e. g., atmosphere, biosphere, water, ice-snow, land-surface), and the lack of understanding of some complex physical processes, especially clouds and soil moisture. This article summarizes the recent progress in the present and future climate simulation, the extreme weather and climate studies, and in understanding various physics processes as well as the short-term climate prediction using RCMs. The prospects of RCMs related to the above subjects, especially the weekly to subseasonal regional climate simulation and prediction, will also be discussed.

Key words regional climate models, climate simulation and prediction, extreme climate events, physics processes, weekly to subseasonal weather and climate

1 引言

随着人们对未来全球气候发展演变以及由于人类活动,特别是温室气体排放所引起的全球变暖等气候问题的重视,科学家们也将目光集中到了全球气候变化背景下区域气候的响应。20世纪90年代,月-季节尺度的短期区域气候问题受到广泛关注。这一问题主要是在给定的全球气候变化背景下了解大气辐射、云、雨、蒸发和淡水在区域性短期气候变化中的作用,它已作为世界气象组织的全球能量和水分循环计划(GEWEX)来实施。而以全球环流模式提供侧边界条件的区域气候模式在以上两方面发挥了重要作用。在20世纪80年代末期, Giorgi 和 Bates^[1], Dickenson 等^[2]首次成功地进行了区域气候的数值模拟实验,此后区域气候模式(RCM)不断的发展起来并广泛应用于科研领域,而且逐步向业务预报单位推广。

然而在区域气候研究中,“区域”的时空尺度尚没有明确的界定,往往是根据作者的研究需要而有所不同。依据模式分辨率以及天气系统的空间尺度,政府间气候变化委员会(IPCC)第三次评估报告(AR3)^[3]所定义的“区域”为次大陆尺度($10^4 \sim 10^7 \text{ km}^2$),时间尺度可以由半天(平均意义)至几十年不等,具体因模式应用领域的不同而有差异。一般来说,对区域气候未来发展演变的模拟可达十年至几十年^[4,5],对过去极端气候事件的模拟多为月-季节尺度^[6-10],短期气候预测则可以针对季节或年际尺度气候的预测^[11-13]。由于区域气候是在一定的大尺度环流背景下发生的,包含了小尺度、中尺度、天气尺度以及行星尺度扰动系统的相互作用过程,同时受到气候系

统内部各子系统(大气圈、生物圈、水圈、冰雪圈、陆面)的相互制约,这种多尺度、多要素相互作用的复杂过程决定了区域气候研究的难度和复杂性。Giorgi^[14]分别就区域气候模拟中不同尺度扰动以及气候系统内部各子系统的相互作用进行了描述,指出区域气候的研究本质上就是“尺度相互作用”问题。

与全球环流模式相比,区域气候模式的分辨率有了很大的提高,模式能够模拟出更为合理的区域性强迫作用,如地形、河流/湖泊、城市建筑等。目前大部分区域气候模式都采用了数值天气预报模式的动力框架,如美国国家大气研究中心(NCAR)第二代区域气候模式(RegCM2),意大利国际理论物理中心区域气候模式(RegCM-ICTP),中国气象局国家气候中心区域气候模式(RegCM-NCC),西北太平洋国家实验室区域气候模式(PNNL-RCM),中国科学院大气物理研究所区域环境系统集成模式(RIEMS)均采用了滨州大学/美国国家大气研究中心(PSU/NCAR)的中尺度数值天气预报模式MM4或MM5的动力框架,其动力结构更为准确合理,从而较传统的统计方法更显其动力连续的特性。此外区域气候模式中的物理过程也更加详细,包含了陆面和水文过程、边界层、云和降水、云-辐射相互作用,部分还包含了大气化学过程。模式能够在一定程度上再现出地表温度和降水的平均日变化特征^[8,9],这是粗分辨率的全球环流模式无法比拟的。特别是由于选取的空间区域小,区域气候模拟省时的经济效益尤其突出,计算量也比全球环流模式有所减少。

像其他中尺度数值天气预报模式和全球环流模式的发展过程一样,区域气候模式经历了初期的调试发展以后,通过开展一系列模式比较计划的检验,如亚洲区域模式比较计划(RMIP)^[15]、

北美地区区域模式比较计划 (PIRCS)、北极区域气候模式比较 (ARCMIP) 等, 正在逐步走向实际应用阶段。由于区域气候模式是基于全球气候变化研究中大气环流模式分辨率不足的基础上发展起来的动力降尺度方法, 因此通过与大气环流模式的耦合, 可以进行未来气候的自然演变、不同情景下平均气候以及极端气候事件变化趋势的模拟^[3-5,14,16,17]。而为了验证、评估模式结果, 以及采用区域气候模式高分辨率的特性对过去的气候事件进行研究, 也可以在合理的大尺度再分析资料 (如 NCEP 和 ECMWF) 或大气环流模式强迫下单独应用区域气候模式对当前的气候状况和极端气候事件进行模拟分析, 探讨其形成和发展的机理^[8,9,18-23]。随着区域气候模式不断的发展, 已经有相当一部分气象和水文学家采用区域气候模式、耦合的区域-陆面模式、区域-水文模式来研究不同的物理过程以及其对区域气候、降水和能量收支的影响, 研究边界层云特征^[24-26]和陆气、水气之间的相互作用等^[27-30]。50 年前, 全球数值模式的出现使得大气科学的两个不同分支“气候”和“大气环流”合二为一, 而今, 区域气候模式在实践中的应用也为“天气”与“气候”的统一提供了一定的基础, 并逐渐将传统意义上的天气过程与气候发展演变联系起来。

目前, 已经发表的关于区域气候模式发展和模拟应用研究的文章有很多。其中, IPCC 2001 评估报告最为详细地描述了区域气候模式的研究进展和模拟预测结果^[3]。赵宗慈和罗勇^[31]较早地分析了全球环流模式对区域气候模拟的可靠性和不确定性, 对 20 世纪 90 年代国内外区域气候的模拟结果作了阶段性总结并展望了区域气候模式的发展趋势和前景。陆其峰等^[32]全面回顾了区域气候模式的分类以及在气候模拟方面的应用, 并重点指出了国内区域气候模式发展所面临的问题和可能的发展趋势。近期, Wang 等^[33]也综述了动力降尺度方法, 特别是区域气候模式的发展过程, 细致地描述了区域气候模式在气候模拟, 短期气候预测方面的应用, 并探讨了区域气候的可预报性问题。因此本文将在上述工作的基础上, 重点阐述区域气候模式在区域气候 (当代和未来) 和极端气候事件的模拟、物理过程研究、短期气候预测等方面的研究进展和发展中所存在的不足,

最后分别指出了上述四个领域所面临的挑战并展望其未来的发展前景。

2 区域气候模拟

在气候模拟研究中, 区域气候模式可以视为全球环流模式的补充。在给定的大尺度强迫条件下, 凭借其分辨率高和动力、物理过程准确、细微的特性来研究更小范围的气候特征, 以及全球气候变化背景下区域气候的响应。在这里, 我们将分别从当代平均气候特征和未来气候变化两方面综述区域气候模式在区域气候模拟中的应用。

2.1 当代平均气候特征

对多年平均气候特征的模拟不仅能够检验模式对区域平均气候态的模拟能力, 同时对模拟结果的诊断分析还能够揭示出特定地区气候的形成机理, 以及区域气候对陆面特征和物理过程的敏感性。通过模拟结果与实测资料的对比, 可以揭示出区域气候模式自身的不足, 特别是地形的处理和物理过程方案的选取^[34], 可以查找出模式的系统性误差源, 从而为改进模式提供一定的基础。

通常在进行平均气候特征模拟时, 由于研究目的的不同, 区域气候模式的侧边界条件可以有两种资料来源, 即再分析资料和全球环流模式的模拟结果。再分析资料中包含了很多新的观测信息, 因此在给定合理的大尺度强迫条件下, 区域气候模拟结果可以用来解释地表不均匀性对区域气候的影响以及各种物理过程决定区域气候发展演变的工作原理。而以全球环流模式驱动区域气候模式进行实验不仅能够检验区域气候模式再现平均气候特征的能力, 同时还便于将两种模式的模拟结果进行对比查找两者在区域尺度上模拟能力的差异, 为将来进行短期气候预测也提供了一定的参考依据。

为了检验模式对东亚夏季季风区气候特征的模拟能力, Lee 和 Suh^[21]采用 NCAR RegCM2 和 NCEP/NCAR 的再分析资料作为侧边界条件对 1987~1996 年 10 年的夏季 (6 月 1 日~8 月 31 日) 进行了模拟。试验结果表明, RegCM2 能够很好的再现与东亚夏季风相联系的大尺度环流特征, 如副热带高压、东北地区的低槽和高低空急流等, 同时东亚季风雨带的演变也很合理。图 1

分别给出了 RegCM2 模拟和全球降水气候计划 (GPCP) 观测的 10 年夏季平均降水量和垂直累计水汽输送。可以发现, 模拟的两个变量在形势分布上相似, 但模拟结果与观测资料偏差还是比较大的, 这可能是模式自身模拟能力不足与观测资料分辨率相对粗糙的结果。除了对 10 年平均气候变量的分析, 图 2 给出了 1993 和 1994 年夏季 500 hPa 位势高度相对于 10 年平均的距平。1993 年模拟距平场虽然在形势上与再分析资料一致, 但负距平值却远远低于实况, 1994 年的模拟效果则接近实况分析。

与上述对东亚夏季风的模拟分析相似, 中国气象局国家气候中心应用 RegCM_NCC 模式也进行了 5 年的连续气候模拟实验, 模式基本上能够再现东亚地区主要雨带的季节性演变, 因此为后期的模式发展和业务动力预报提供了很好的经验^[12]。上述实验研究已经证明了区域气候模式再现平均气候特征的能力, 但受到局地强迫和各种物理过程的限制, 区域气候模式对平均气候的模拟仍具有一定的局限性 (图 1)。

除了对自然状态下区域气候平均状态的模拟以外, Leung 和 Ghan^[20], 以及高学杰等^[35]还在温室气体加倍的情景下对过去的区域气候响应进

行了模拟, 以此来研究温室气体增加对于不同地区气候的影响。整体来看, 在温室气体增加的情况下大部分地区的气温和降水均有增加的趋势, 增幅有着明显的季节性特征, 而且还有部分地区的气温会有所降低, 降水的变化也因具体的地区而有所不同。此外, 气温升高造成的雪盖减少也引起地表感热, 潜热, 径流以及下游气候的一系列变化 (雪盖、径流变化将在 4.1 节详细分析), 这些现象在区域模式中表现得更为“地区化”, 反映了大的环流背景下细微的区域气候变化信息。上述气候平均态对温室气体敏感性的模拟实验, 将温室效应在空间上更为具体化, 并为模拟未来气候变化建立更加合理的气候情景提供了一定的参考。

2.2 未来气候变化

对未来气候变化的模拟或预测研究已经不再限于气象领域, 而是集合了环境、水文、农业等各方面的研究力量。温室气体浓度增加和气溶胶排放量增大引起的全球气候变化, 对区域水利资源管理、农业生产规划和植被覆盖状况等的影响评估, 为动力降尺度区域气候模式提供了很好的发展空间。IPCC AR3^[3]、Giorgi^[14]、Wang 等^[33]

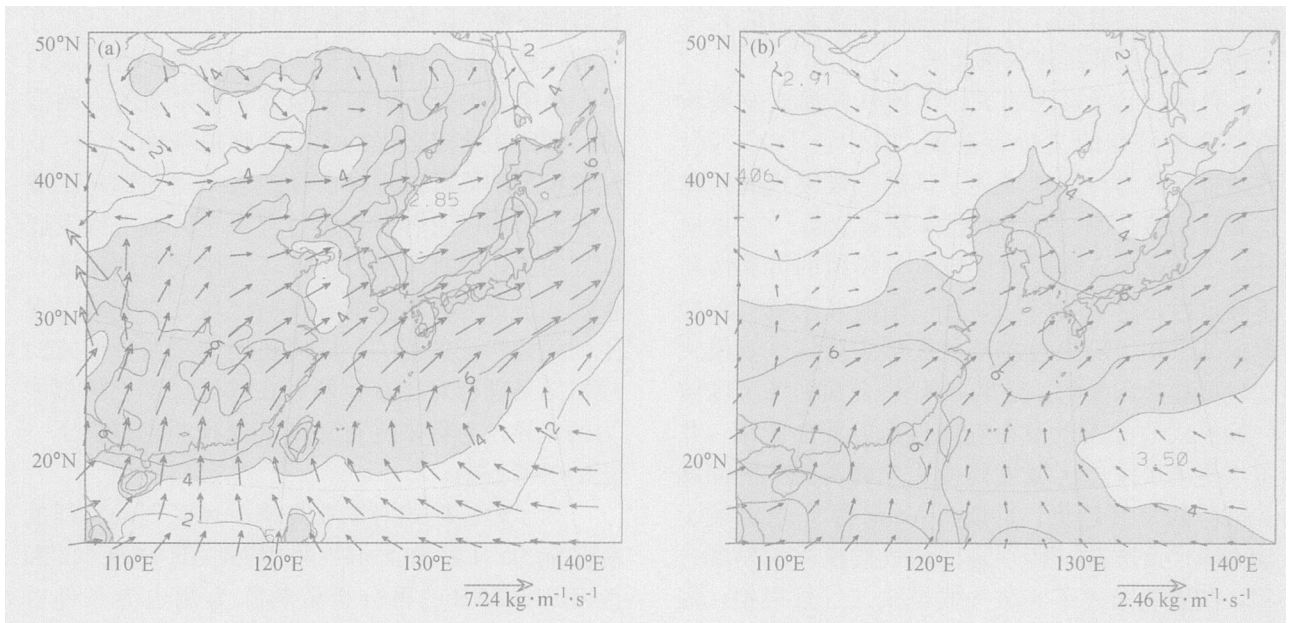


图 1 RegCM2 模拟 (a) 和 GPCP 观测 (b) 的 10 年夏季平均降水量 (等值线, 单位: mm) 和垂直累计水汽输送 (矢量线)。阴影区日降水量大于 4 mm^[21]

Fig. 1 Ten-summers averaged precipitation (contoured, units: mm) and vertically integrated moisture transport (in vectors) from (a) the RegCM2 simulation, and (b) the GPCP data. Precipitation areas more than 4 mm · d⁻¹ are shaded^[21]

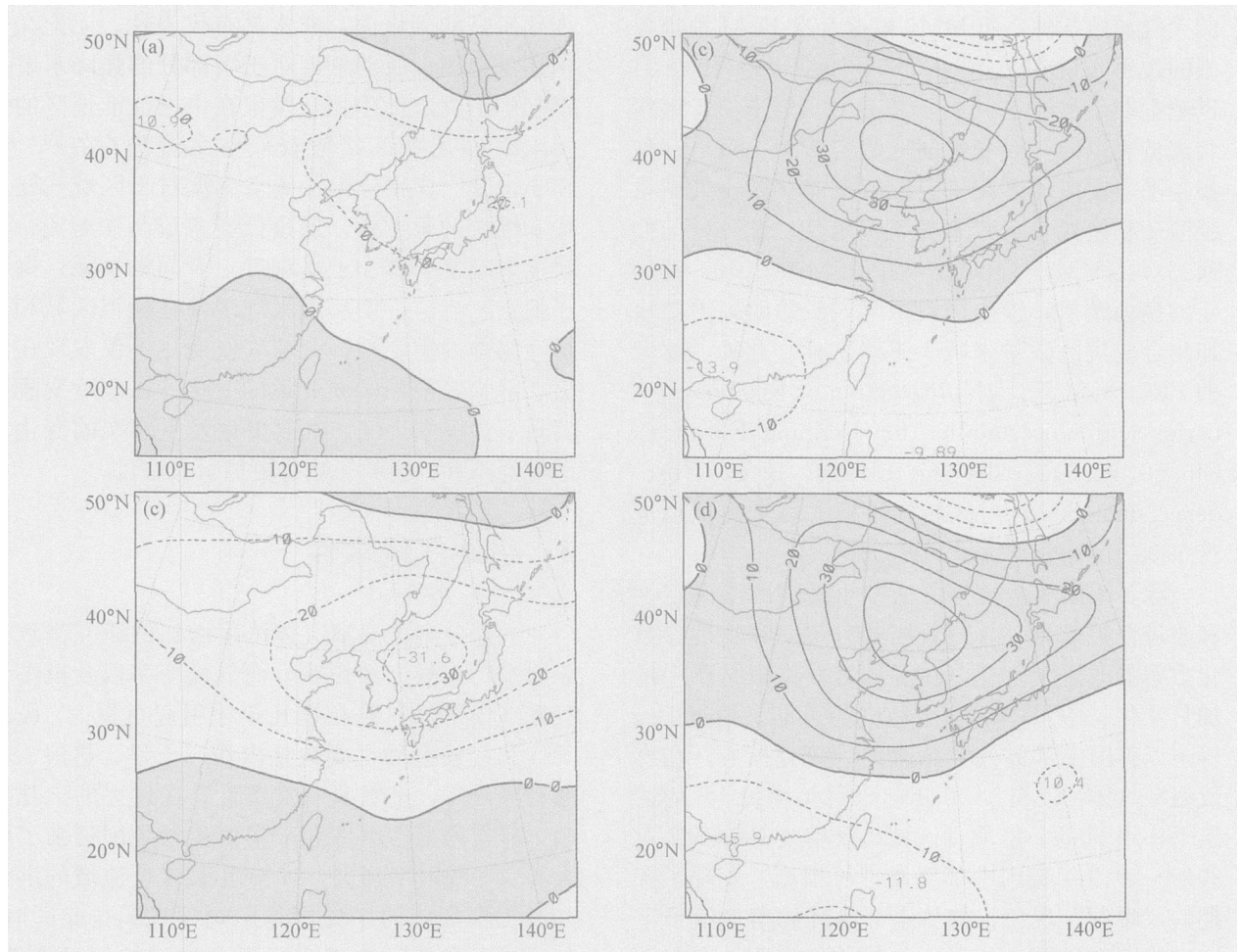


图2 1993 (a)、(c) 和 1994 (b)、(d) 年夏季 500 hPa 位势高度相对于 10 年平均的距平 (单位: m)。(a)、(b) 为模拟值, (c)、(d) 为 NCEP/NCAR 再分析资料, 阴影区为正距平值^[21]

Fig. 2 500 hPa geopotential height anomalies (units: m) for the summer of 1993 (a), (c) and 1994 (b), (d) with respect to the 10-year average from the simulation (a), (b) and the NCEP/NCAR reanalysis (c), (d). Positive anomalies are shaded^[21]

已经对区域气候模式模拟或预测未来气候变化做了阶段性的总结, 客观地指出了模式发展过程中所取得的进步和存在的不足, 包括模式分辨率偏低, 物理过程尚不完善等等。

采用区域气候模式模拟或预测未来的气候变化, 需要由全球环流模式提供底边界和侧边界条件。全球环流模式在给定的气候情景强迫下进行积分, 在所关注的时段内为区域气候模式提供边界条件, 由此决定区域内部的大尺度环流形势^[36]。由于未来的气候情景是根据历史信息人为制定出来的, 而气候系统本身包含了多尺度模态、多天气系统相互作用, 加上两种模式 (GCM, RCM) 的分辨率和物理过程不同, 因此在模式传输信息和积分过程中, 在未来气候情景、气候系

统和模式三方面增添了很多不确定性^[37]。

为了减少上述气候模拟过程中模式的不确定性, 很多研究采用了集合预报的方法。Leung 等^[36]在模拟 21 世纪中期美国西部沿海和山区区域气候变化的实验中, 便采用了 GCM (NCAR/DOE PCM) 与 RCM (MM5) 集合的方法。控制实验中, CO₂和硫化物的含量维持在 1995 年的水平, PCM 从 1995 年开始, 共积分 80 年。MM5 则只积分前 20 年, 代表当前的气候状态。敏感性实验采用 3 组成员集合的办法, 除 CO₂外 (CO₂的浓度 (体积分数) 1995 年为 358 × 10⁻⁶, 2050 年增长至 505 × 10⁻⁶), 其他温室气体、硫化物的浓度在 1995 ~ 2100 年间按经济正常发展情景变化。为了获得比较真实的气候状态, 3 组成员采用不同

的大气初始条件, 而 MM5 根据 3 次 PCM 预报提供的边界条件在 2040 ~ 2060 年间积分, 代表 21 世纪中期气候状态。由于积分时段较长, 3 组集合成员模拟的气候变量演变趋势较为一致, 这种集合平均模拟结果在一定程度上能够减小气候系统演变和模式自身带来的不确定性。此外, 他们通过对比 MM5 与区域谱模式 RSM 在 2040 ~ 2050 年的模拟结果, 指出当模拟时段较短时, 需要增加集合成员的数量来减少不确定性。此外, 欧洲的 PRUDENCE 计划 (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects, <http://prudence.dmi.dk>) 针对区域气候模式集合模拟也进行了专门的研究, 这里不再赘述。

除了采用集合模拟方法减小模式的不确定性和改进模拟效果外, 随着模式分辨率和物理参数化方案的改进与优化, 在区域气候模拟结果中增加日变化、中尺度信息已经成为可能。最近 Pan 等^[51]以美国中部的低空急流作为研究核心, 在有效温室气体浓度自 1990 年起以每年增长 1% 的情景下, 用 HadCM2 驱动区域气候模式 RegCM2 对 2040 ~ 2049 年美国中部气候进行预测, 发现了有趣的“暖洞”现象, 并从水分循环的角度给予了一定的理论解释 (图 3)。模拟结果表明, 在有效温室气体增加的情况下, “暖洞”南侧的低空急流频率有所增加, 而北侧的则减少, 这种南 - 北方向急流梯度增加的形势增强了美国中部低层水汽辐合, 有利于云和中尺度对流辐合体的发展, 降水也相应地增多^[51]。但是白天云量的增加减少了到达地表的太阳短波辐射, 由于地表感热通量降低和水汽蒸发作用减弱了地表对大气的加热, 从而在夏季形成了美国中部的“暖洞” (图 3a 中方框所示区域)^[51]。该区域 20 世纪 90 年代到 21 世纪 40 年代的温度增长在 0.5 ~ 1.0 °C, 而美国其他地区的温度增长则大于 1.0 °C。土壤作为水分的储存库, 在一定程度上对气候信息起到了“缓存”作用, 后期持续的蒸发冷却使得在 10 月份“暖洞”仍然维持, 这与郑益群^[38]对土壤湿度扰动和后期温度关系的研究结果是相似的。

Pan 等^[51]的模拟和分析结果将地形、大尺度环流形势、中尺度天气现象和水分循环过程之间复杂的反馈作用联系在一起, 并引入到未来气候

变化研究的领域内, 非常具有代表性。无论在美国还是中国, 低空急流对于大部分的强降水事件都起到了决定性作用, 发生在中国江淮地区的强降水事件几乎都伴随着低空急流的存在^[39~41]。Stensrud^[42]详细分析了低空急流对于区域气候形成和维持的重要性, 通过低空急流与深对流、中尺度对流复合体、土壤湿度三者间的关系, 揭示了低空急流这一中尺度大气现象在模拟区域和全球气候中的重要性。全球气候变化不仅表现在温度、降水等平均气候变量的变化。在全球变暖的背景下, 极端天气、气候事件发生频次的变化对区域经济和社会的影响将更加引人注目。

3 极端气候事件

大部分有关温室气体浓度增加的研究都致力于对平均气候态的影响, 而气候变率以及极端天气和气候事件只是在近几年才引起重视^[3]。极端天气和气候事件主要包括洪涝、干旱、热浪、春寒和风暴等, 多数具有灾害性。在过去的十几年中, 异常的洪涝事件和干旱气候给中国带来了巨大的生命和财产损失, 1998 年长江全流域的洪水和近几年华北的旱灾更是影响深远。与此同时, 其他国家和地区也遭受了很多异常的气候事件, 全世界热浪、风暴、洪水和干旱发生的次数明显增加, 特别是 2004 年夏季欧洲的热浪导致约 3 万人丧生。因此, 极端气候事件潜在的变化对人类活动以及自然环境的影响要远大于气候平均态的变化^[43]。

作为对气候平均态的扰动, 极端气候事件往往是异常大尺度强迫和区域内部气候系统各分量相互作用的结果。以强降水事件为例, 这种灾害多发生在地形比较有利 (一般指有利于气流辐合的区域, 如盆地、喇叭口地形区和丘陵地区) 且地理范围相对较小的区域。大范围的环流形势异常导致大量的水汽集中, 并且在局地产生不稳定, 因此决定了洪涝灾害发生的可能性以及降水的空间分布, 而区域内部的水汽条件、土壤、植被覆盖状况也在一定程度上决定了灾害发生的强度。根据上述各种极端气候事件的形成和发展特点, 目前区域气候模式的研究主要是针对强降水事件, 因此下面的分析将重点总结区域气候模式在这方

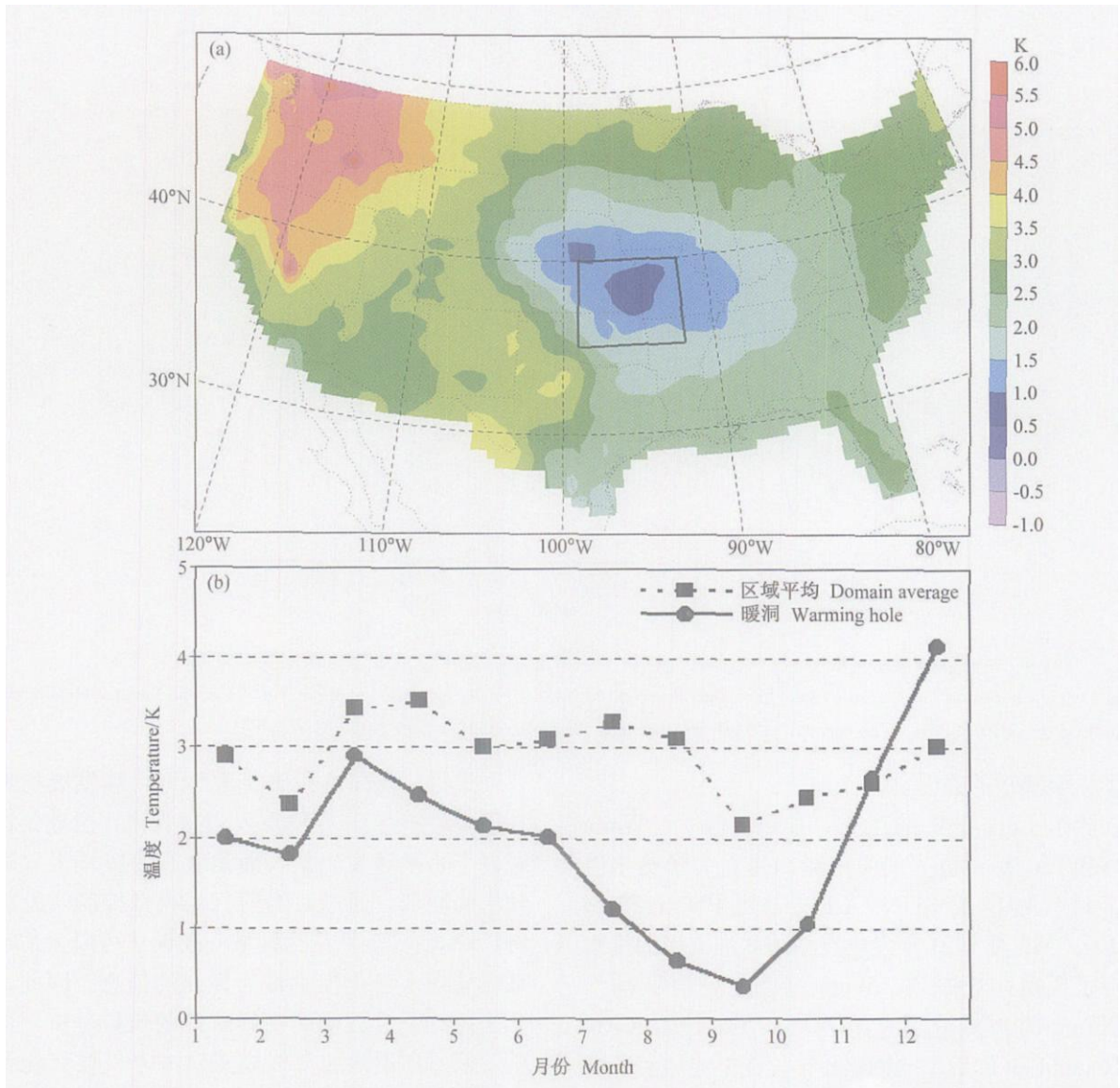


图 3 (a) RegCM2 模拟的未来 (21 世纪 40 年代) 与过去 (20 世纪 90 年代) 夏季日最高气温的变化; (b) 21 世纪 40 年代“暖洞”和美国陆地月平均日最高气温变化的时间序列^[5]。(a) 中方框所示区域 (35 ~ 40°N, 99 ~ 92°W) 为“暖洞”

Fig. 3 (a) Climate change in daily maximum surface temperature during the summer months simulated by RegCM2. The climate change is defined here as the difference between the future decade (the 2040s) and past decade (the 1990s). (b) Time series of the climate change in monthly-mean daily maximum surface temperature (dTmax) averaged over the warming hole (solid) versus the U. S. continent (dotted)^[5]. The inner frame denotes the coverage of the warming hole

面的研究进展。

就中国长江流域的洪涝灾害来说，东亚季风、西太平洋副热带高压、青藏高原热力和动力状况以及中高纬度的波动系统，都对降水的落区和强度起到了决定性作用，当这 4 个系统达到有利的配置并锁相 (phase lock) 便会引发江淮地区以及长江流域的洪涝灾害。针对 1991、1998 年江淮和长江全流域的洪涝事件，国内外很多科学家都采

用区域气候模式进行了模拟研究。Luo 等^[44]利用 RegCM2 模拟了 1991 年江淮流域的强降水事件，既检验模式模拟逐日降水过程的能力，同时还利用模拟结果分析了造成这场持续性强降水的主要物理过程。图 4 给出了模拟和观测的江淮流域区域平均的降水时间序列。与观测相比，尽管 5 月 11 日和 7 月 12 ~ 23 日模拟的降水量偏高，但 RegCM2 还是再现了强降水发生的频次，且模拟

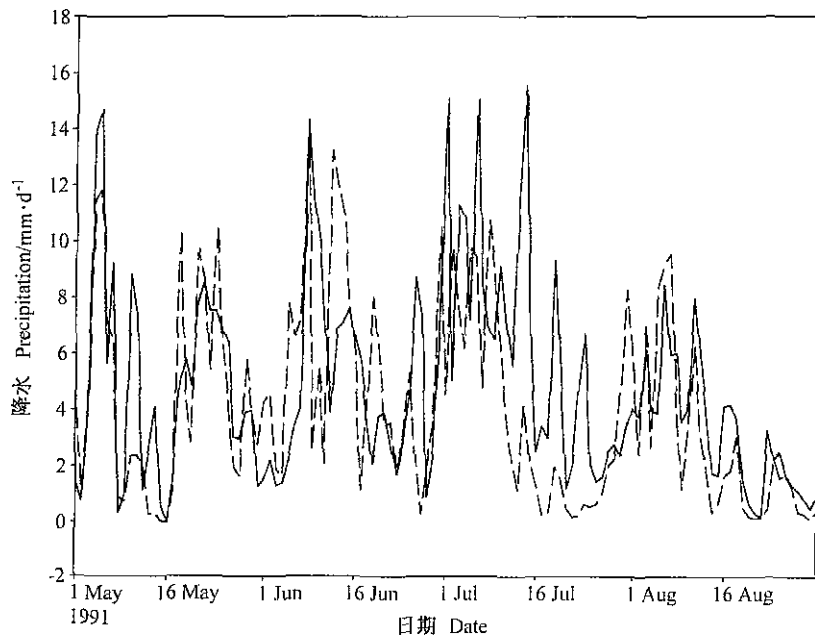


图4 1991年5~8月江淮流域模拟(实线)与观测(虚线)的日降水量时间序列(观测与模拟的相关系数为0.55^[44])

Fig. 4 Time series of the simulated (solid line) and observed (dashed line) daily precipitation in $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ over the Yangtze-Huaihe valley during May - August 1991 (The correlation coefficient between the observation and simulation is 0.55^[44])

出了主要降水的强度。

除了Luo等^[44]的工作, Leung等^[6]、Wang等^[7]和Liu等^[18]也分别应用纽约州立大学奥尔巴尼区域气候模式SUNYA-RegCM、PNNL-RCM和RegCM2对1991年发生在中国江淮流域的洪水进行了模拟。刘栋^[10]、Wang等^[8]、史学丽等^[22]和Xiong等^[45]则分别应用MM5、IPRC-RegCM、N-RegCM和RIEMS对1998年长江全流域的洪涝灾害进行了模拟实验。RMIP (Regional Climate Model Inter comparison Project) 也以1998年的洪涝事件作为检验参加比较计划的RCMs模拟极端气候事件性能的指标之一^[15]。上述实验基本上都能够模拟出东亚地区季节性雨带的南北进退以及江淮地区极端降水事件的强度和落区。Xue等^[27]、Yang和Arritt^[46]、Zhang等^[9]分别应用Eta-SSiB、Reg-CM2和MM5-SSiB, 对美国1993年的大面积洪涝事件、1988年的干旱事件和1998年雨季的气候进行了模拟。从以上实验的模拟结果来看, 即使降水的范围和强度与观测不吻合, 但模拟出的雨带中确实存在着强度不同的强降水中心, 因此从一方面说明, 区域气候模式具有一定的捕捉极端气候特征和局地强迫的能力^[8,9,18]。

最近, 美国威斯康星大学可持续发展与地球环境中心Jonathan Patz发表报告说, 全球气候变暖并不是平缓发生的, 而是表现为极端天气发生频率的增加。通过对当前气候模拟控制实验的分析, Fowler等^[47]认为区域气候模式可以为估计未来极端降水变化提供最为详细的信息。因此, 除了上述对于过去极端气候事件的模拟分析, 很多科学家还利用区域气候模式对未来气候变化背景下极端天气和气候事件发生的频率进行了预测。

Christensen等^[48]、Sánchez等^[49]、Fowler等^[47]、Ekström等^[37]分别利用不同的区域气候模式对IPCC AR3 A2/B2背景下欧洲、地中海地区和英国的极端降水变化进行了模拟。Gao等^[4]也模拟了CO₂加倍情况下中国地区极端气候事件的响应。尽管不同的模式在不同地区和不同季节的模拟结果有一定差异, 但整体来看大部分地区的极端强降水事件都会增多。Christensen等^[48]还以日降水量20 mm为界, 指出欧洲夏季20 mm以下的小雨和中雨发生频率将降低, 而大于20 mm的降水发生频率有增加趋势。对于气候变暖背景下中高纬度强降水事件发生频次增多的现象, Frei等^[50]、Christensen等^[48]做出了一定的物理解释。

即在海温增加后，海表的蒸发量加大，而气温的升高使得空气中的饱和混合比也相应提高，空气中含水量增多，这样便有利于天气系统形成过程中大量的凝结潜热释放，因此既能够使系统加强，同时有更多的水汽转换成降水。空气中的水分循环加强，强降水事件发生的频次也相应增加。除了极端降水外，Sánchez 等^[49]和 Gao 等^[4]的研究发现，在全球变暖的背景下，地中海地区以及中国的部分地区夏季增温明显，高温天气发生的频率增加。

4 物理过程研究

区域气候模式的物理过程包含多方面的要素，如陆面、水文、边界层和积云过程，以及云-辐射、云-气溶胶相互作用等等。这些物理过程既作为区域气候模式的组成部分，同时又是模式发展过程中的研究对象。将我们对物理过程的认识应用于模式，一方面能够改进模拟效果，另一方面又为进一步研究各个物理过程的相对优势和不足以及气候系统内部的发展演变机制，提供了高质量的、动力连续的和包含详细物理过程的资料库。因此，对于物理过程的研究伴随着区域气候模式以及其他数值模式的整个发展过程。以下我们分别从边界层、陆面、水文过程，积云过程及其参数化，云-辐射和云-气溶胶相互作用这三方面逐一讨论。

4.1 陆面、水文过程、边界层及其参数化

一个地区的陆面条件将在很大程度上决定着该地区的气候状况。地形、城市建筑、植被、河湖分布特征等所有的下垫面条件都影响着陆气之间的感热、潜热以及水分和动量的交换过程。在整个气候系统中，陆面相对于大气来说是一个缓慢变化的子系统，是气候信息的储存库，同时又对气候的发展演变起到调整和制约作用。而土壤湿度对区域天气和气候演变的作用更加明显。从短期来看，土壤湿度影响着地表感热、潜热的比例，边界层的演变特征，以及对流的触发和维持；从长期来看，土壤湿度则决定了洪涝和干旱的发生^[51]。因此对土壤气候信息，特别是土壤水分利用能力的高低，在一定程度上决定了周-次季节时间尺度上区域气候的可预报性。

地表植被作为陆面条件的动态组成部分，它们的地区分布特征和生长过程不但受到特定气候状态的控制，而且植被反过来又可以影响天气和气候的演变，因此构成了一个耦合系统。具体来说，地表生态过程对大气的温度、湿度、降水、辐射传输以及地表水文过程（径流、渗透、积雪和融雪）有很明显的响应。同时大气过程（包括中尺度环流以及云和降水系统的形成过程）在很大程度上依赖于地表的水汽和热量通量，而它们则是由生、死植被和土壤水分存储量决定的^[52]。郑益群^[38]通过分析 RegCM2 的模拟结果指出，江淮流域洪涝灾害的增多及华北干旱的加剧可能是北方草原沙漠化与南方常绿阔叶林退化共同影响的结果，而且南方植被退化对其的影响似乎更强烈。李巧萍和丁一汇^[53]也有类似结论。

目前，由于研究需要和计算机水平的限制，大部分的区域气候模式还不具备耦合的动态陆面、生态模式，因此限制了模式模拟效果以及对气候-植被-土壤反馈作用的认识。Lu 等^[52]建立的大气-生态双向互动耦合模式则起到了很好的引导作用。他们研究发现，区域大气模式系统 (RAMS) 的气象要素对植被叶面积指数 (LAI) 比较敏感，同时生态系统模式 (CENTURY) 中植被的生长状态对大气温度、湿度和降水也非常敏感。因此考虑到当前 RAMS 中植被的被动状态会阻碍模拟气候的真实演变，于是 Lu 等^[52]将 RAMS 与 CENTURY 耦合起来，形成动态的气候-植被系统。模拟结果表明，耦合模式的模拟效果整体上较好，然而由于两个模式系统中其他的因子（植被类型，土壤湿度，水分循环过程）仍按耦合前分别积分，因此当降水增加时耦合模式的模拟水平降低。毫无疑问，这种耦合模式对于研究大气-生物圈-水圈的相互作用过程提供了很好的工具。

在当前全球变暖的气候背景下，高原和极地雪盖覆盖面积的变化以及山区地表水文过程也倍受科学家们关注。雪盖面积的变化直接影响地表接收太阳短波辐射，具体表现为地气之间能量和水分通量交换的改变，从而影响云和降水过程。而融雪过程产生大量的径流又改变着区域水分循环过程，对水利资源分配和管理有重要意义。Leung 等^[36]利用 MM5 模拟结果表明，在温室气体

增加的情景下, 2040~2060 年美国西部山区将平均增暖 1~2.5℃, 这将使沿海山区的积雪每年平均减少 70%, 冬季气温升高和降水的增多导致冬季径流增加而春季和夏季的径流显著减少。当然, 由于不同地区的气候背景不同, 因气温和雪盖面积变化对土壤湿度和水文过程造成的影响还需结合具体情况, 利用数值模式进行定量和定性的模拟分析^[51]。

土壤、植被、水文和降水过程的研究密不可分, 而陆气之间的各种通量交换主要都是在边界层内完成。因此, 要提高土壤湿度的模拟效果, 既需要改进对降水的模拟, 同时还需改进控制蒸发蒸腾的生物物理过程以及大气边界层过程的参数化方案。否则, 降水和土壤湿度累计的误差可能会引起“模式气候漂移”现象, 从而导致预报的极端气候产生显著的位置偏移。然而边界层内复杂的湍流交换过程使得参数化方案繁简不一^[54], 因此其参数化方案的好坏将直接决定着陆面和水文过程对大气的影 响。近年来随着野外观测实验的增多(如全球能量和水分循环计划 GEWEX)以及卫星和其他遥感资料的丰富(如植被及土地利用状况), 越来越多的观测数据为进行陆面过程和湍流输送作用的研究提供了很好的条件。国家气候中心的区域气候模式 RegCM_NCC, 依据 GEWEX/HUBEX(淮河流域能量和水分循环试验)的实验结果对边界层和陆面特征参数(地面植被、粗糙度长度和地表反照率等)进行了一定的改进, 使之更加适合我国的陆面特征^[12]。

4.2 积云过程及其参数化

在数值模拟领域中, 云的形成发展过程始终是一个即古老而又年轻的研究方向, 虽然云的参数化方案自数值模式发展初期就成为模式的一部分, 但随着模式发展到今天, 积云及其影响的降水过程仍然是限制模拟效果的最主要因素之一, 也是数值模拟的难点之一。目前一般使用的数值模式分辨率尚不能显式地模拟云中的上升、下曳气流, 以及卷入卷出作用。由于云的水平尺度大小不一, 积云参数化方案对于模式的分辨率具有很强的依赖性^[55-58], 现在还没有发展出具有可靠的闭合假设的积云对流参数化方案能够适用于 15 km 以下的格距。对于区域气候模拟来说, 由于影

响区域气候的因子与中尺度数值预报和大气环流模式有所不同, 因此研究人员在实践中不断改进和发展适合于区域气候模式的积云参数化方案。

为了检验模式对次网格尺度的积云参数化方案特定参数的敏感性, Yang 和 Arritt^[46]通过改变 RegCM2 中 Grell 积云参数化方案对流不稳定释放的时间尺度和不稳定气块的最大抬升高度两个参数, 分别对 1988 和 1993 年发生在美国的旱涝事件进行了集合模拟研究。结果表明, 尽管降水的空间分布与观测存在一些差异, 但集合模拟的结果要好于采用固定参数(30 min, 150 hPa)的单一模式模拟结果。由于以前大部分集合模拟研究旨在减小模式初边值的不确定性, Yang 和 Arritt^[46]的试验对于减少区域模式本身物理过程的不确定性具有很好的借鉴意义。

在区域气候模拟过程中, 类似 CISK 机制的不稳定现象(CISK-like instability)或数值点风暴 NPSs(Numerical Point Storms)问题是制约模拟水平的主要因子之一^[55, 59]。这种现象主要是由于积云参数化方案未能在给定的时间内移除条件不稳定而造成的, 是由潜热释放、大尺度水汽辐合和地表气压降低而形成的类似于 CISK 机制的正反馈过程, 具体表现为中尺度气旋的过度发展^[55]。虽然侧边界条件决定了进入区域内部总的水汽通量, 然而模式区域内部的各种物理过程相互作用, 特别是显式水汽方案, 积云参数化、边界层过程和地形处理决定了水汽的分配状况以及降水的强度和落区。由于 NPSs 的发生, 大量的水汽集中于范围很小的气柱里, 影响了正常的水汽输送, 随着积分时间的增长势必改变降水强度和落区、云量分布以及由此导致的辐射收支和区域内部的土壤湿度^[18, 19, 57-59], 最终在大尺度环流形势比较弱的情况下可以引起区域内部环流形势的改变, 从而影响区域气候模拟的结果。

4.3 云-辐射和云-气溶胶相互作用

云-辐射相互作用对长期的气候发展演变具有决定性意义。云的类型、云量的多少直接影响着地表和大气吸收和发射的长、短波辐射, 而整个地气系统的辐射收支又决定着降水、温度和水汽等变量气候态的变化。由于云的形成和发展以及与大气辐射的相互作用受到多种因子的制约, 如空气中污染物的数量、森林火灾、火山喷发物

和沙尘暴等，因此气候系统中与云相关的反馈过程成为模拟未来气候变化不确定因素的主要根源之一。

Stephens^[60]指出，尽管云自身的参数化还有相当的难度，但大气环流对云的作用也必须引起足够的重视。Wang 等^[25,26,61]在确定了区域气候模式 IPRC - RegCM 对东南太平洋海洋边界层云的模拟效果，以及边界层云对不同云参数化方案和模式分辨率的敏感性以后，又利用该模式研究了东南太平洋边界层云的辐射效应对大气环流的影响，指出赤道南部东太平洋海洋边界层云的辐射冷却效应，是边界层云以及局地经向环流形成与维持的主要机制。这种对云 - 辐射 - 环流作用细致的模拟分析为今后的区域气候模式在这一领域的研究开辟了道路。

随着工业的不断发展，气溶胶在气候发展演变过程中也扮演着越来越重要的角色。工业污染物和民用废弃物（煤和稻田废物燃烧产生的烟灰）的排放，使得大气气溶胶浓度以及入射太阳辐射的大气光学厚度增加，从而导致净的辐射损失和地表温度降低。有时，由于大量气溶胶的存在，城市里的云和降水总会高于临近的郊区。Ramanathan 等^[62]综述了各类气溶胶的辐射强迫作用，以及气溶胶对气候系统和水分循环的影响。他们指出，气溶胶影响着地表和大气吸收的太阳辐射、大气热力状态、云微物理过程和降水过程，因此对局地的短期气候作用更大一些。Menon 等^[63]利用数值模式定性地研究了中国和印度地区的黑炭气溶胶对东亚气温和降水变化形势的影响，强调了气溶胶对气候演变的作用是不容忽视的。

为了能够更好地表述这种云 - 辐射和云 - 气溶胶的相互作用，区域气候模式正在逐步地将不同复杂程度的气溶胶模式耦合进来。Qian 和 Giorgi^[64]将一个简单的硫化物气溶胶模式与 RegCM2 耦合，模拟了硫排放的情况下东亚地区 1994 年 11 月和 1995 年 7 月的区域气候特征。模式不仅反映出气溶胶的时空变化特征，还定量揭示了气溶胶对气候直接和间接作用的相对重要性，为后期较为复杂的研究提供了很好的基础。研究还发现，气候对气溶胶的反应具有明显的非线性特征。特别是在夏季，气溶胶的存在不仅改变了地气辐射收支以及大气的热力和动力结构，同时

气溶胶数量的增多还影响着云内的微物理过程演变，致使降水率降低，水分循环减弱^[62,64]。

在国内，Wang 等^[65]对过去几年中国温室气体和气溶胶的研究工作做了很好的总结。他们认为目前人们对温室气体和气溶胶的辐射强迫效应认识得非常有限。为了减少气溶胶和温室气体在气候系统中所计算的辐射强迫的不确定性，需要进一步研究各种温室气体和气溶胶的源汇分布，气溶胶的物理、化学特性，以及它们与云反照率、降水的关系。针对这些问题，Wang 等建议在今后应该加强对温室气体和气溶胶的定点观测，改进全球大气环流模式和化学传输模式，从而为环境管理部门和决策部门提供科学依据^[65]。

5 短期气候预测

近年来，随着社会和经济发展的需要，短期气候预测的研究亟待提高并具有很大发展潜力。Goddard 等^[66]对季节 - 年际尺度气候预测的方法做了比较详细的总结，包括其可预报性的理论基础、经验依据、预测方法、未来发展方向以及短期气候预测在实践中的应用。美国气象学会报告 BAMS 杂志在 2003 年 12 月份刊载了一系列文章分别针对季节尺度气候预测进行讨论，呼吁人们提高对短期气候预测的重视，加强各部门的协作^[67]，探讨其潜在的发展潜力^[68]，以及短期气候预测在实践与制度上的创新^[69]。以上工作对短期气候预测提供了很好的指导和借鉴意义，并指明了短期气候预测需求的紧迫性。

目前，在短期气候预测方面所做的大部分工作基本上是由统计模式或全球环流模式（AGCM, CGCM）来完成的，同时还有很多统计/动力预报相结合的方法。这 3 类预测方法在不同地区、不同季节预报技巧都有所不同，没有绝对优势。一般来说，统计模式的建立需要大量的观测资料，且气候系统本身又具有年际、年代际变化，大部分的线性统计预报模式很难反映出这种先期预报因子和预报变量的关系^[66]。相对而言，全球环流模式动力、物理过程约束较严格，但运行代价高，且受到模式分辨率的限制，预测的结果比较粗糙，很难突出局地特征。鉴于统计模式和全球环流模式的上述缺点，人们开始寻求动力的降尺度方法，

因此区域气候模式成为应用于短期气候预测的一种新的工具。

但是通过前期的预报试验以及相关的研究,人们发现区域气候模式以及全球环流模式在短期气候预测中的应用还有很多制约因素:

(1) 可预报性理论尚不成熟,短期气候预测的可预测变量相对较少。到目前为止,大部分的短期气候预测主要以热带的季节内振荡(MJO)和 ENSO 事件为预报因子,而当这些信号不显著时,预报技巧便迅速下降^[66]。地形强迫(包括陆面-湖泊,海-陆对比)产生的环流虽然具有很高的可预报性,但是陆面作为强迫大气的边界条件之一,其动力学性质并不像海洋、大气那样明显,同时由于对陆面过程的认识相对浅薄,因此陆面初始状态对后期气候预测预报效果影响如何还缺少深入的研究。此外,现在短期气候预测的对象多为一些平均变量,如平均温度、平均降水等,较少涉及到具体的天气信息,这也在一定程度上制约着数值模式在短期气候预测方面的应用。

(2) 缺乏必要的耦合过程和真实的物理过程参数化方案。区域气候的发展和演变是气候系统中海-陆-气各分量耦合在一起和各子系统相互作用的过程。然而在当前的区域气候模拟中,大气基本上都是作为一个被动的响应因子,在既定的外强迫下(如陆面特征,动态植被,海表的感热、潜热通量)发展,这样必然会影响到模拟的效果。另外,目前的短期气候预测主要针对环流形势、温度和降水,与模式中云、降水、边界层和辐射参数化方案直接联系。正如第 4 节所述,物理过程自身的不确定性以及当前对物理过程认识的局限性,也在一定程度上限制了区域气候模拟以及短期气候预测的准确度和精度。

(3) 计算机条件的限制。数值模式结构复杂,计算变量较统计模式多,运行代价比较高。现在应用全球环流模式做短期气候预测大部分都采用了多模式集合的预报方法^[66,70],需要以一定的计算机和数据存储条件为基础。区域气候模式在进行短期气候预测的过程中同时需要全球环流模式提供底、侧边界条件,因此相对而言,高分辨率的区域气候模式增加了很大的工作量。而集合预报的推广应用使得情况变得更加严峻。一方面,集合预报成员数目的多寡会形成不同的预报结果,

另一方面,大批的资料存储和处理也构成了很大的负担。

虽然短期气候预测还存在很多制约因素,但是鉴于短期气候预测的实际意义,一些气象组织已经开始了有益地探索。例如,早在 1988 年,中国科学院大气物理研究所就用自己研制的海气耦合环流模式作出了第一个跨季度的降雨距平预测^[71],取得很好的效果。后来经过不断改进和完善,形成了大气所的气候预测系统 IAP DCP-II^[72],并开展了准业务夏季降雨距平的跨季度预测。多年(1998 至今)预测的检验表明,该系统有较好地跨季度预测能力,能报出夏季降水距平的大范围分布形势。近年来,中国气象局国家气候中心通过对模式进行一系列的改进、验证和回报实验,目前已形成了由季节预测大气环流模式、全球和太平洋-印度洋海洋环流模式、高分辨率区域气候模式 RegCM_NCC 和 El Niño 事件年际变率预测模式构成的短期气候动力预测模式系统,其中 RegCM_NCC 于 2001 年开始进行试验性实时预报,取得了很好的预测效果^[11,12]。图 5 给出了 2003 年夏季 RegCM_NCC 和全球耦合模式 CGCM 对降水距平(以 1983~2002 年 CGCM 的回报试验作为气候平均态)的预测结果。在 2003 年的梅雨季节,淮河流域出现了异常强的持续暴雨与严重洪水。从图中可以发现两个模式都成功地预报出主要多雨带位于长江和黄河之间,其中 RegCM_NCC 表达了更多的细节特征,与观测较为一致^[12]。从 1997 年开始,美国 Scripps 实验性气候预报中心(ECPC)也开始利用全球谱模式(GSM)和区域谱模式(RSM)进行近实时的周-季节尺度全球和区域动力气候预测。Roads^[13]重点研究了 RSM 的预报结果,通过与观测的对比发现,RSM 对于周-季节尺度的短期气候预测还是有一定预报技巧的。Roads^[13]指出,以 GSM 提供边界条件的 RSM 能够进行短期气候预测,但它的预报结果并没有显著的优于 GSM。随着理论和经验的不断丰富,美国的气候预报中心(NCEP/CPC)已经对温度、降水、风场以及它们各自的距平场做周和季节预报,其所有的预报产品都发表在美国气候预报中心的官方网站上(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>)。其中,一个很好的例子便是大西洋和太平洋飓风频次的季

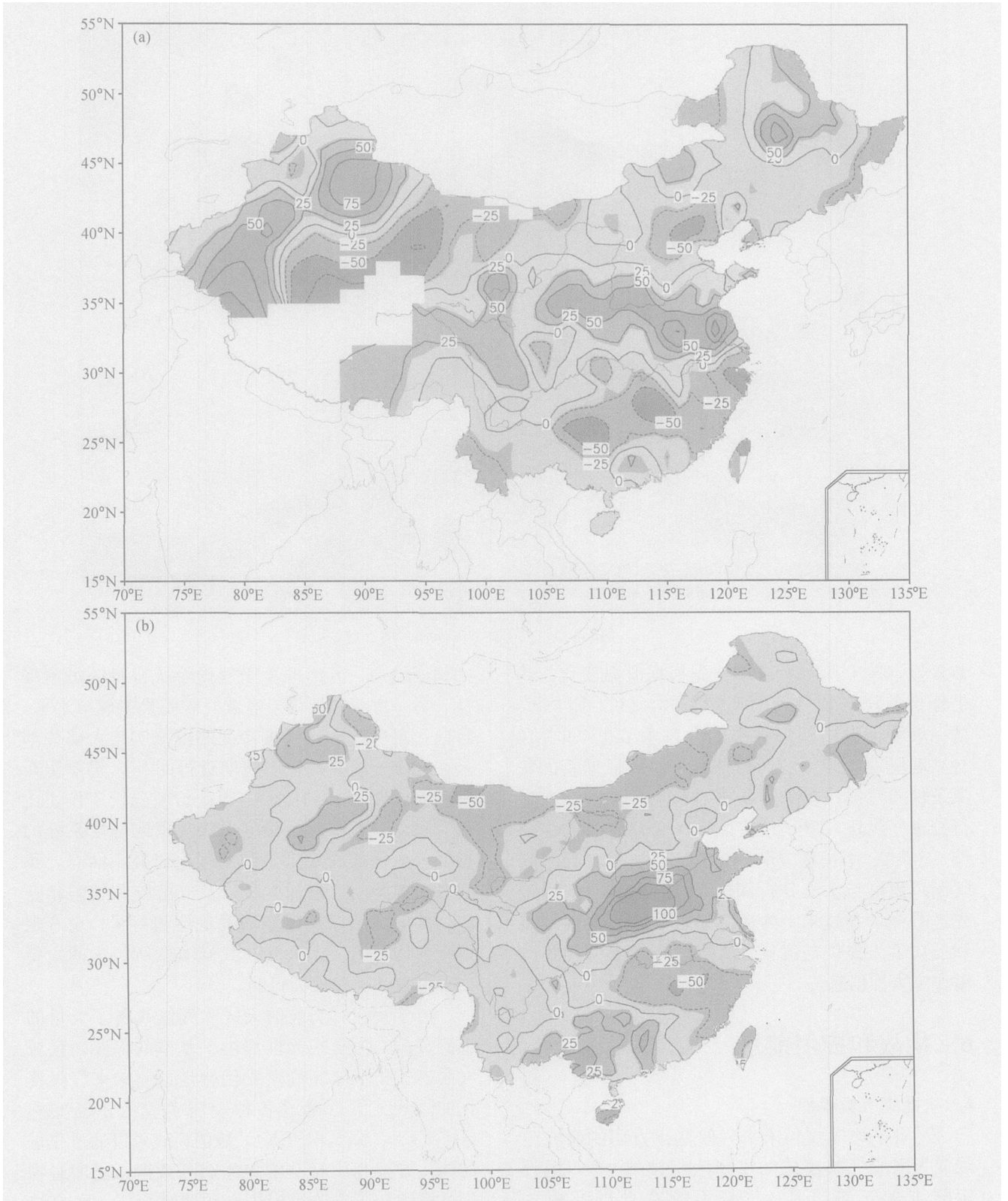


图 5 2003 年夏季降水距平百分率 (单位: %): (a) 观测; (b) RegCM_NCC 预报; (c) CGCM 预报^[12]。

Fig. 5 Precipitation anomaly percentage for summer 2003 (units: %) : (a) Observation ; (b) prediction with the nested RegCM_NCC ; (c) prediction with CGCM^[12]

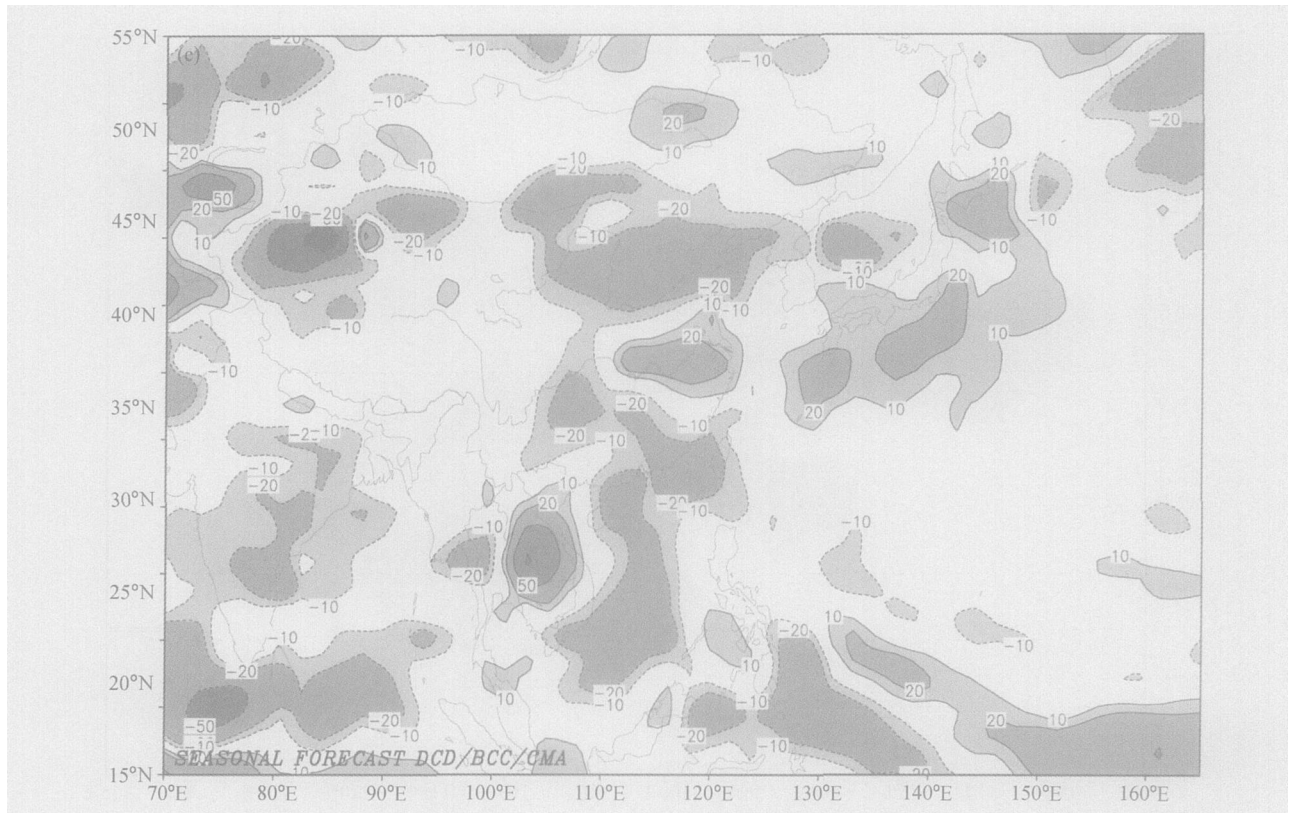


图 5 (续) Fig. 5 (Continued)

节预报。在 4 月初, CPC 首先根据海温变化, 热带地区气压场和风场的气候条件, 以及 El Niño 的一般特征做出即将到来的飓风季节里 (6 ~ 10 月) 飓风发生频次的初始预测, 而后根据新的气象条件的发展, 在 7 月初再对初始预测的频次进行校正。此外, CPC 还将国家气象局发布的中期 (3 ~ 5 天)、中长期 (6 ~ 10 天) 和长期 (天气和气候) 预报与水文分析和预报结合起来, 应用最先进的科学和技术, 为应急事件管理者、预报员和公众事先提供与气候、天气、水文事件相关的潜在灾害性信息。

6 挑战和应用前景

6.1 区域气候模拟

尽管平均气候和未来气候变化方面的研究已经成为区域气候模式的主要应用领域^[3,14], 但设定的未来气候情景、气候系统本身以及模式 (GCM, RCM) 三者的不确定性, 也提醒我们在分析模拟结果时需要综合考虑多方面因素。天气和气候系统始终处在发展和演变过程中, 对它们

的预测结果一方面取决于气候系统自身的可预报性, 另一方面则依赖于区域气候模式的模拟水平。目前, 对当代平均气候特征的模拟实验大部分都是在区域气候模式发展初期进行的^[12], 仍停留在检验模式性能^[15]的阶段, 因此诊断分析工作还比较有限, 缺乏像对中尺度天气现象或气候系统的特征分析一样深入到系统的理论研究。同时, 我们对土壤湿度、植被生长以及气溶胶和气候相互作用的认识还存在很多不确定性和盲区。现有观测资料还无法认识天气和气候演变所包含的主要物理过程和各种反馈机制。

由于我们对当前的天气和气候具备了大量的观测资料, 为模式验证提供了基本的保障, 区域气候模式和全球环流模式仍然是预测未来气候变化的理想工具。随着各种观测实验的不断实施 (GEWEX, THORPEX), 数值模式可以通过先进的同化方案利用日益增多的观测数据, 增加对物理过程的认识, 改进模拟和预测效果。气候系统是一个复杂的非线性系统, 内部各子系统间存在着互相反馈和制约的作用, 当仅改变其中的某一个或某些因素时 (如海温、温室气体和气溶胶浓

度、植被覆盖面积)并不能真实的反映未来的气候变化。在研究气候变化过程中,作为气候系统的一个“外强迫源”,太阳对气候的调节作用也是不容忽视的。火山、地震和太阳活动也许会像温室气体一样,成为研究气候变化的重要因素。

6.2 极端天气和气候事件

极端天气、气候事件的突发性和局地性特征决定了区域气候模式模拟的难度,模式不仅要真实地反映出大尺度的环流形势特征,同时需结合地表特征和物理方案展现中小尺度系统的演变过程。应用区域气候模式对过去极端气候事件的模拟研究表明,大部分区域气候模式都成功地再现了大尺度环流形势场、温度场和风场特征,较全球环流模式有了很大的改进。但不同模式以及采用不同的参数化方案所得到的降水场却有很大差异,由此说明了模式内部有很大的不确定性^[19]。

全球观测系统研究与可预报性试验(THORPEX)已经将高影响天气作为重点研究对象。目标是一方面结合观测资料和天气事件个案分析高影响天气的可预报性,另一方面通过加强观测提高高影响天气的预报水平。由于极端天气和气候事件是所有气候信号的集中反映,因此对过去极端事件进行深入的个案分析,具有重要的理论和应用价值。研究不仅能够深入认识极端气候事件过程中所包含的各种尺度扰动和各种物理过程的相互作用,同时还能够指导中长期天气预报、季节预测以及更长时间尺度的气候预测,减少洪涝灾害带来的生命和财产损失。

对未来极端气候事件发生频次的模拟是发展区域气候模式的一个重要目标。尽管这方面的研究已经逐渐引起了科学家的关注,但由于受到未来的气候情景、气候系统可变性、全球环流模式以及区域气候模式等方面不确定性的影响,加上前期实验相对比较简单,因此对现有的模拟结果还需审慎分析。针对这种极端天气和气候事件,不能仅采用确定性方法,还需要在模拟过程中结合可预报性理论,应用集合预报和概率预报进行更多的实验,预测其未来的变化,从而为水资源管理、农业、交通、保险等部门提供科学的参考依据。

6.3 物理过程

在过去的十几年中,区域气候模式在物理过

程的并入和优化,与陆面、水文模式的耦合以及在实践中的应用方面均取得了相当的进展。但尽管大部分的区域气候模式分辨率都在 50 km 左右,能够显式地模拟大气环流模式中的很多次网格过程,却仍然无法在模式中真实地表现一些中小尺度信息和日变化现象。目前,区域气候模式还不能显式地模拟积云等中小尺度过程,而选取不同的积云参数化方案以及同一方案采用不同的分辨率往往还会产生不同的模拟结果。模式中很少包含湍流、辐射和云微物理过程三者之间的相互作用。对云-辐射和云-降水之间相互作用认识的局限性,为研究云-气候反馈作用又增加了很大难度。

鉴于对积云过程认识的不足以及积云参数化方案的不确定性,区域气候模式也可以借鉴 GCM 研究中的“超级参数化”(superparameterization)方法。“超级参数化”的思想就是将两维的云系统可分辨模式植入到 GCM 的每一个格点柱内,从而模式能够显式的表示小尺度和中尺度过程,以及它们的相互作用^[73,74]。通过简单的数值实验,“超级参数化”方法对热带地区 MJO 的模拟展示了很好的效果^[74]。尽管“超级参数化”是针对粗分辨率的 GCM 提出的,但在云模式应用之前,区域气候模式也可以采用相似的方法处理中小尺度过程。由于这种方法的运行代价高,区域气候模式在这方面也许会取得比 GCM 更好的效果^[73]。当然,随着雷达、卫星等观测手段的提高,将来可以获取云内水和冰的含量,云内的三维风场结构和无云区的相关资料,以此研究云内部的动力、热力结构和微物理过程,从而对现有云物理参数化进行改进或发展新的更合理的参数化方案。

区域气候模式除了云和降水过程参数化方案的不确定性,陆面过程也构成了一个不可忽视的薄弱环节。在目前的气候模拟或短期气候预测中,人们很少将异常的土壤湿度,雪盖面积以及动态植被模型放入模式中,它们对大气的强迫作用主要通过参数化方案来实现,因此给气候模拟带来显而易见的缺陷和不足。造成这种情况的主要原因在于目前对土壤湿度还没有形成一个全球观测网,因此很难找到初始化模式和验证模拟结果的土壤观测资料^[66]。同时,动态植被的植入又涉及到陆面条件和水分循环过程,受到现有认识水平

的限制, 因此还没完全与区域气候模式耦合。为此在未来 20~30 年, 除了增加对土壤湿度的观测外, 还需要进行大量外场实验, 通过对陆面过程、植被生态过程和湍流输送作用的研究以深化对陆气相互作用的认识。当然, 为了更好地利用观测资料, 提高区域气候模式的模拟能力, 还需发展更好的同化方案以便将大量的观测资料用于各种数值模式的初值和边值条件。

6.4 短期气候预测与周-次季节气候

目前我们对于短期天气预报(1~7天)和长期气候预测(季节, 年际尺度)的认识相对成熟一些, 而要进一步提高两者的预报技巧并减少这两者的不确定性, 同时又适应社会需要, 则必须研究中间尺度的天气和气候预测问题。与季节和年际尺度的区域气候预测相比, 周到月尺度的天气和气候预测还处于初级探索阶段, 而且这一领域只是在近期才引起关注。在 2004 年 1 月召开的美国气象学会第 84 届年会上, Schubert 和 Ropelewski 专门讨论了次季节尺度气候预测的难度, 即在周以上的时间尺度内, 既缺乏显著的气候信号, 同时影响因子也比较多。他们还指出了长期天气预报与季节气候预测之间在理论上的空隙, 强调了季节、次季节尺度气候预测的重要性和紧迫性。

长期以来, 周-月尺度的预测一直被看成是“延伸天气预报”。然而, 从这一概念提出到现在, 该尺度的预报却进展甚微。THORPEX 计划的开展和实施为我们提出了希望。THORPEX 目的就是探索中长期天气预报的可预报性理论, 加速和提高 1~14 天天气预报的准确率, 改进全球强影响天气的确定性与集合预报。以降水预报为例, 前期的延伸预报侧重于预报降水的平均值和扰动值, 季节预报主要预报季节平均的降水形势和距平。而 THORPEX 则侧重于概率降水预报的改进, 即利用同化方案在模式中增加观测信息, 采用集合的方法预测降水的概率分布。显然, 当具备了周-月尺度的天气和气候预报以后, 我们便拥有了时间上连续的区域气候预测。

同化方案的研发使得观测资料能够充分发挥它在数值预报中的价值。陆面过程是大气系统发展演变的重要外强迫源, 而土壤湿度则综合了陆面系统的主要信息, 因此对土壤湿度资料的同化

是当前区域气候模式发展的重要问题之一。当具有了一定的观测资料和可预报性理论基础后, 接下来的预测效果便取决于数值模式。由于区域气候是多空间尺度系统相互作用的结果, 双向嵌套能够很好的体现不同尺度大气运动之间的相互作用, 因此区域模式与全球模式的双向嵌套也是其发展的方向之一。尽管目前区域气候模式在短期气候预测方面的应用是有限的, 但根据它在分辨率和物理过程中的优越性, 我们可以期望区域气候模式与海洋模式以及全球环流模式耦合, 探索出除 MJO 和 ENSO 以外的其他决定短期天气和气候过程的可能主导因子, 从而更好地预测出周-次季节尺度内的气候状态。其中, 可能性之一便是中纬度气旋生命史(7天左右)的预报。如果预报效果较好, 它将能够把天气信息和气候演变信息联系起来。此外, 西伯利亚地区的寒潮, 中高纬度的阻塞形势也可能是很好的预报因子。

由于区域气候, 特别是极端气候事件, 与各天气系统的发展演变直接相联系, 因此今后的短期气候预测不仅包含平均的气候状态(温度、降水), 还有必要将季节预报与极端天气事件的发生频次相结合, 做出更为有意义, 并且包含较详细天气信息(如风暴频次、主要天气型、长江流域发生洪涝灾害的概率)的概率预报^[69]。

随着计算机条件的不断提高、观测资料的丰富以及物理过程的优化, 区域气候模式将会显著提高灾害性天气、气候事件的预测准确度, 也将使长期以来一直进展缓慢的夏季定量降水预报有显著改善。

7 结语

综上所述, 区域气候模式在现在、未来气候模拟, 极端气候事件模拟分析, 物理过程模拟研究方面已经被广泛地采用, 但是在短期气候预测中尚没有得到有效利用。因此在区域气候模式应用的过程中, 既要借鉴数值天气预报的实践经验, 也要在理论上将中尺度、天气尺度的动力学理论与气候动力学理论相联系, 凭借两者已有的且相对成熟的理论来探讨相关的可预报性问题, 丰富和发展区域气候的形成和发展机理。在物理过程研究和参数化方案改进方面, 要充分利用日益增

多的观测资料, 还要认识到区域气候模式的模拟结果也具有很高的诊断价值, 有待于进一步的开发研究。随着区域气候模式在实践中的不断检验和社会对短期气候预测需求的增加, 特别是周-次季节尺度气候预测的提出, 更是为区域气候模式的应用提供了广阔的发展前景。正如数值天气预报模式和全球环流模式的发展过程一样, 区域气候模式也会在实践中不断地完善, 从而更广泛地应用到科学研究和业务预报领域。

参考文献 (References)

- [1] Giorgi F, Bates G T. The climatological skill of a regional model over complex terrain. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117** (11): 2325 ~ 2347
- [2] Dickenson R E, Errico R M, Giorgi F, et al. A regional climate model for western United States. *Climatic Change*, 1989, **15**: 383 ~ 422
- [3] Houghton J T, Ding Y H, Griggs D J, et al. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge City: Cambridge University Press, 2001, 881pp
- [4] Gao X, Zhao Z C, Giorgi F. Changes in extreme events in regional climate simulations over East Asia. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (5): 927 ~ 942
- [5] Pan Z, Arritt R W, Takle E S, et al. Altered hydrologic feedback in a warming climate introduces a "warm hole". *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31** (17), L17109, doi: 10.1029/2004GL020528
- [6] Leung L R, Ghan S J, Zhao Z C, et al. Intercomparison of regional climate simulations of the 1991 summer monsoon in East Asia. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104** (D6): 6425 ~ 6454
- [7] Wang W C, Gong W, Wei H. A regional model simulation of the 1991 severe precipitation event over the Yangtze-Huai river valley. Part I: Precipitation and circulation statistics. *J. Climate*, 2000, **13** (1): 74 ~ 92
- [8] Wang Y, Sen O L, Wang B. A highly resolved regional climate model (IPRC-RegCM) and its simulation of the 1998 severe precipitation event over China. Part I: Model description and verification of simulation. *J. Climate*, 2003, **16** (11): 1721 ~ 1738
- [9] Zhang D L, Zheng W, Xue Y K. A numerical study of regional climate over the LSA-East. Part I: Model implementation and verification. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131** (8): 1895 ~ 1909
- [10] 刘栋. MM5 模式对区域气候模拟的性能试验. *高原气象*, 2003, **22** (1): 71 ~ 77
Liu Dong. Performance verification of mesoscale model MM5V3 to regional climate simulation. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (1): 71 ~ 77
- [11] 丁一汇, 刘一鸣, 宋永加, 等. 我国短期气候动力预测模式系统的研究及试验. *气候与环境研究*, 2002, **7** (2): 236 ~ 246
Ding Yihui, Liu Yiming, Song Yongjia, et al. Research and experiments of the dynamical model system for short-term climate prediction. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (2): 236 ~ 246
- [12] 丁一汇, 李清泉, 李维京, 等. 中国业务动力季节预报的进展. *气象学报*, 2004, **62** (5): 598 ~ 612
Ding Yihui, Li Qingquan, Li Weijing, et al. Advance in seasonal dynamical prediction operation in China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (5): 598 ~ 612
- [13] Roads J. Experimental weekly to seasonal U. S. forecasts with the regional spectral model. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2004, **85** (12): 1887 ~ 1902
- [14] Giorgi F. Modeling regional climate change. 2001, Available online from: <http://www.scidiv.net/dossiers/index.cfm?fuseaction=policybrief&policy=30&dossier=4>
- [15] Fu Congbin, Wang Shuyu, Xiong Zhe, et al. Regional climate model intercomparison project for Asia. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2005, **86** (2): 257 ~ 266
- [16] Gao X, Zhao Z C, Ding Y H, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (6): 1224 ~ 1230
- [17] Chen B, Chao W C, Liu X. Enhanced climatic warming in the Tibet Plateau due to doubling CO₂: a model study. *Climate Dyn.*, 2003, **20** (4): 401 ~ 413
- [18] Liu Y Q, Avissar R, Giorgi F. Simulation with the regional climate model RegCM2 of extremely anomalous precipitation during the 1991 East Asian flood: An evaluation study. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101** (D21): 26199 ~ 26216
- [19] Leung L R, Ghan S J. Pacific Northwest climate sensitivity simulated by a regional climate model driven by a GCM. Part I: Control simulations. *J. Climate*, 1999, **12** (7): 2010 ~ 2030
- [20] Leung L R, Ghan S J. Pacific Northwest climate sensitivity simulated by a regional climate model driven by a GCM. Part II: 2xCO₂ simulations. *J. Climate*, 1999, **12** (7): 2031 ~ 2053
- [21] Lee D K, Suh M S. Ten-year East Asian summer monsoon simulation using a regional climate model (RegCM2). *J. Geophys. Res.*, 2000, **105** (D24): 29565 ~ 29577
- [22] 史学丽, 丁一汇, 刘一鸣. 区域气候模式对中国东部夏季气候的模拟实验. *气候与环境研究*, 2001, **6** (2): 249 ~ 254
Shi Xueli, Ding Yihui, Liu Yiming. Simulation experi-

- ments of summer rainbelt in China with the regional climate model. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (2): 249 ~ 254
- [23] Cao X, Luo Y, Lin W T, et al. Simulation of effects of land use change on climate in China by a regional climate model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (4): 583 ~ 592
- [24] Gochis D J, Shuttleworth W J, Yang Z L. Sensitivity of the modeled north American monsoon regional climate to convective parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, **130** (5): 1282 ~ 1298
- [25] Wang Y, Xie S P, Xu H, et al. Regional model simulations of marine boundary-layer clouds over the Southeast Pacific off South America. Part I: Control experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, **132** (1): 274 ~ 296
- [26] Wang Y, Xu H, Xie S P. Regional model simulations of marine boundary-layer clouds over the Southeast Pacific off South America. Part II: Sensitivity experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, **132** (11): 2650 ~ 2668
- [27] Xue Y, Zeng F J, Mitchell K, et al. The impact of land surface processes on the simulation of the U. S. hydrological cycle: A case study of 1993 US flood using the Eta/SSiB regional model. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129** (12): 2833 ~ 2860
- [28] 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 植被变化对中国区域气候的影响 I: 初步模拟结果. *气象学报*, 2002, **60** (1): 1 ~ 16
Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian, et al. The effects of vegetation changes on regional climate. I: Simulation results. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (1): 1 ~ 16
- [29] 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 植被变化对中国区域气候的影响 II: 机理分析. *气象学报*, 2002, **60** (1): 17 ~ 30
Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian, et al. The effects of vegetation changes on regional climate. II: Mechanisms. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (1): 17 ~ 30
- [30] 王守荣, 黄荣辉, 丁一汇, 等. 水文模式 DNSVM 区域气候模式 RegCM2/China 嵌套模拟试验. *气象学报*, 2002, **60** (4): 421 ~ 427
Wang Shourong, Huang Ronghui, Ding Yihui, et al. Numerical simulation experiments by nesting hydrology model DHSVM with regional climate model RegCM2/China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (4): 421 ~ 427
- [31] 赵宗慈, 罗勇. 二十世纪九十年代区域气候模拟研究进展. *气象学报*, 1998, **56** (2): 225 ~ 246
Zhao Zongci, Luo Yong. Advance on investigations of regional climate modeling since 1990. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (2): 225 ~ 246
- [32] 陆其峰, 潘晓玲, 钟科, 等. 区域气候模式研究进展. *南京气象学院学报*, 2003, **26** (4): 557 ~ 565
Lu Qifeng, Pan Xiaoling, Zhong Ke, et al. Advances in regional climate model studies. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, **26** (4): 557 ~ 565
- [33] Wang Y, Leung L R, McGregor J L, et al. Regional climate modeling: progress, challenges, and prospects. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2004, **82** (6): 1599 ~ 1628
- [34] Giorgi F, Mearns L O. Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Rev. Geophys.*, 1991, **29**: 191 ~ 216
- [35] 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇. 区域气候模式对温室效应引起的中国西北地区气候变化的数值模拟. *冰川冻土*, 2003, **25** (2): 165 ~ 169
Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui. Climate change due to greenhouse effects in northwest China as simulated by a regional climate model. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2003, **25** (2): 165 ~ 169
- [36] Leung L R, Qian Y, Bian X D, et al. Mid-Century ensemble regional climate change scenarios for the western United States. *Climatic Change.*, 2004, **62** (1): 75 ~ 113
- [37] Ekström M, Fowler H J, Kilsby C G, et al. New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2. future estimates and use in impact studies. *J. Hydrol.*, 2005, **300**: 234 ~ 251
- [38] 郑益群. 陆面过程对区域气候影响的数值模拟研究. 南京大学博士学位文, 2000, 151pp
Zheng Yiqun. Numerical simulation studies of the effects of land surface processes on regional climate. Ph.D. dissertation (in Chinese), Nanjing University, 2000, 151pp
- [39] 张雁, 丁一汇, 马强. 持续性梅雨锋暴雨的环流特征分析. *气候与环境研究*, 2001, **6** (2): 161 ~ 167
Zhang Yan, Ding Yihui, Ma Qiang. Analysis of the atmospheric circulation in relation to persistent rain storm on the Meiyu front. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (2): 161 ~ 167
- [40] 王建捷, 陶诗言. 1998 梅雨锋的结构特征及形成与维持. *应用气象学报*, 2002, **13** (5): 526 ~ 534
Wang Jianjie, Tao Shiyan. Structure and formation of Meiyu front in 1998. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (5): 526 ~ 534
- [41] 贝耐芳, 赵思雄, 高守亭. 1998 年“二度梅”期间武汉—黄石突发性暴雨的模拟研究. *大气科学*, 2003, **27** (3): 399 ~ 418
Bei Naifang, Zhao Sixiong, Gao Shouting. A numerical simulation of sudden heavy rainfall occurred in Wuhan and Huangshi during July of 1998. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (3): 399 ~ 418
- [42] Stensrud D J. Importance of low-level jets to climate: a review. *J. Climate*, 1996, **9** (8): 1698 ~ 1711

- [43] Kunkel K E, Pielke Jr. R A, Changnon S A. Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: a review. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, **80** (6): 1077~1098
- [44] Luo Y, Zhao Z C, Ding Y H. Ability of NCAR RegCM2 in reproducing the dominant physical processes during the anomalous rainfall episodes in the summer of 1991 over the Yangtze-Huaihe Valley. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (2): 236~254
- [45] Xiong Z, Wang S Y, Zeng Z m, et al. Analysis of simulated heavy rain over the Yangtze River Valley during 11~30 June 1998 using RIEMS. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (5): 815~824
- [46] Yang Z W, Arritt R W. Tests of a perturbed physics ensemble approach for regional climate modeling. *J. Climate*, 2002, **15** (20): 2881~2896
- [47] Fowler H J, Ekstr? m M, Kilsby C G, et al. New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 1. assessment of control climate. *J. Hydrol.*, 2005, 212~233
- [48] Christensen O B, Christensen J H. Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate. *Global and Planetary Change*, 2004, **44**: 107~117
- [49] S?nchez E, Gallardo C, Gaertner M A, et al. Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: a first approach. *Global and Planetary Change*, 2004, **44**: 163~180
- [50] Frei C, Sch?r C, L?hli D, et al. Heavy precipitation processes in a warmer climate. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25** (9): 1431~1434
- [51] Pan Z T, Arritt R W, Gutowski Jr W J, et al. Soil moisture in a regional climate model: simulation and projection. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28** (15): 2947~2950
- [52] Lu L, Pielke R A, Liston G E, et al. Implementation of a two-way interactive atmospheric and ecological model and its application to the central United States. *J. Climate*, 2001, **14** (5): 900~919
- [53] 李巧萍, 丁一汇. 植被覆盖变化对区域气候影响的研究进展. *南京气象学院学报*, 2004, **27** (1): 131~140
Li Qiaoping, Ding Yihui. Research progress in the effect of vegetation change on regional climate. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2004, **27** (1): 131~140
- [54] Zhang D L, Zheng W Z. Diurnal cycles of surface winds and temperatures as simulated by five boundary-layer parameterizations. *J. Appl. Meteor.*, 2004, **43** (1): 157~169
- [55] Zhang D L, Hsie E Y, Moncrieff M W. A comparison of explicit and implicit predictions of convective and stratiform precipitating weather systems with a meso-beta-scale numerical model. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 1988, **114**: 31~60
- [56] Zhang D L, Fritsch J M. Numerical sensitivity experiments of varying model physics on the structure, evolution and dynamics of two mesoscale convective systems. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45** (2): 261~293
- [57] Molinari J, Dudek M. Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: a critical review. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120** (2): 326~344.
- [58] Zhang D L, Kain J S, Fritsch J M, et al. Comments on: "Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: a critical review". *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122** (9): 2222~2231
- [59] Giorgi F. Sensitivity of simulated summertime precipitation over the western United States to different physics parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119** (12): 2870~2888
- [60] Stephens G L. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review. *J. Climate*, 2005, **18** (2): 237~273
- [61] Wang Y, Xie S P, Wang B, et al. Large-scale atmospheric forcing by Southeast Pacific boundary-layer clouds: a regional model study. *J. Climate*, 2005, **18** (7): 934~951
- [62] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 2001, **294** (7): 2119~2124
- [63] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, **297** (27): 2250~2253
- [64] Qian Y, Giorgi F. Interactive coupling of regional climate and sulfate aerosol models over eastern Asia. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104** (6): 6477~6499
- [65] Wang M X, Liu Q, Yang X. A review of research on human activity induced climate change I. greenhouse gases and aerosols. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21** (3): 314~321
- [66] Goddard L, Mason S J, Zebiak S E, et al. Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions. *Int. J. Climatol.*, 2001, **21**: 1111~1152
- [67] Greenfield R S, Fisher G M?. Improving responses to climate predictions: an introduction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2003, **84** (12): 1685~1685
- [68] Zebiak S E. Research potential for improvements in climate prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2003, **84** (12): 1692~1696
- [69] Leetmaa A. Seasonal forecasting: innovations in practice and institutions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2003, **84** (12): 1686~1691
- [70] Barnston A G, Mason S J, Goddard L, et al. Multimodel ensembling in seasonal climate forecasting at IRI. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2003, **84** (12): 1783~1796

- [71] Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Wang Wanqiu, et al. Experiments in numerical extra-seasonal prediction of climate anomalies. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 1990, 14 (1): 1 ~ 24
- [72] 曾庆存, 林朝晖, 周广庆, 等. 大气科学发展战略. 北京: 气象出版社, 2002, 538pp
Zeng Qingcun, Lin Zhaohui, Zhou Guangqing, et al. *Atmospheric Science Developing Strategies* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2002, 538pp
- [73] Randall D A, Khairoutdinov M, Arakawa A, et al. Breaking the cloud-parameterization deadlock. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2003, **84** (11): 1547 ~ 1564
- [74] Grabowski W W. An improved framework for superparameterization. *J. Atmos. Sci.*, 2004, **61** (15): 1940 ~ 1952

www.cnki.net