

我国动力气候模式预测系统的研制及应用

张培群¹ 李清泉² 王兰宁¹ 刘益民¹ 史学丽¹ 吴统文¹
(中国气象局国家气候中心, 博士^{1,2}、副研究员¹、高级工程师² 北京 100081)

〔摘要〕 动力气候模式是目前国际上开展气候预测的主要工具。经过 8 年多的研制和发展, 国家气候中心已建立起第一代动力气候模式预测业务系统, 并以此为平台, 形成了一套包括月、季节到年际时间尺度的模式预测业务。20 年历史回报试验和 1 年多的试验性业务运行结果表明, 该系统对东亚区域的季节预测具有较好的预测能力, 其预测结果已经成为我国短期气候预测业务的重要参考信息。

〔关键词〕 动力气候模式 短期气候预测 预测系统 海洋资料同化 〔中图分类号〕 P4 TP

〔文章编号〕 1000-7857(2004)07-0017-05

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF DYNAMIC CLIMATE MODEL PREDICTION SYSTEM IN CHINA

ZHANG Pei-qun LI Qing-quan WANG Lan-ning LIU Yi-min SHI Xue-li WU Tong-wen
(National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: Dynamical climate model is a dominating tool for climate prediction in the world at present. After more than 8 year's researching and developing, the first generation of dynamical climate model prediction operation system has been established in National Climate Center (NCC), Chinese Meteorological Administration. And on the basis of this system, a series of short term climate prediction produced by dynamical climate model at timescale of monthly, seasonal and interannual has been launched into operation. It is shown by the results from 20-year-hindcasting experiments and experimental routine operation of short term climate prediction since last spring that this system has the reasonable capability of seasonal prediction in East Asia and its products has been becoming an important reference in the NCC's operation of short term climate prediction.

Key Words: dynamical climate model, short term climate prediction, prediction system, ocean data assimilation

1 引言

月、季节/多季节尺度的预报问题, 过去被称之为长期天气预报。实际上, 它的预报对象是气候问题, 所以现在被称为短期气候预测。进行短期气候预测的方法可以分为两类: 一类是基于资料统计分析的统计方法, 另一类是基于气候系统变化规律的动力方法。后者也叫气候模式预测方法, 因为它采用的是能够模拟气候系统中各成员的演变及其相互作用的气候模式, 并利用高性能计算机进行数值求解, 以获得对未来月、季节甚至更长时间的气候系统状况的预测。依靠气候模式开展季节到年际的短期气候预测, 是当前发达国家气候预测的主流和国际上的发展方向。

我国科学家从上世纪 80 年代开始了大气环流模式和海洋环流模式的研究工作。“九五”期间, 在国家重点攻关项目的支持下, 国家气候中心和中科院大气物理研究所合作, 开展我国季节预测模式的研制工作。2001 年以来, 国家气候中心又针对该模式系统进行了业务化工作, 从而建立起我国第一代气候模式预测业务系统, 并在此基础上形成了一套包含月、季节和多季节时间尺度的模式预测业务。起初, 只在每年的 3 月下旬制作当年汛期(6~8 月)的季节预测; 2001 年 10 月开始制作年度预测, 预测未来冬、春、夏 3 个季节的气候趋势; 2003 年春季起, 随着计算机资源的增强, 又增加到每个季节都制作预测; 同时, 月预报也开始每旬滚动制作。模式预测结果不仅在国家气候中心的短期气候业务预测中

发挥作用, 在以中国、韩国和日本为主的东亚季风预测中也是重要的预测参考信息。本文将对此气候模式预测业务系统及其性能作一介绍。

2 气候模式和模式预测系统

我国动力气候模式预测系统(DCMPs)由气候模式子系统、预测子系统和产品子系统 3 个部分构成。其中模式子系统是预测系统的主要部分, 它由资料同化和模式运行两部分组成。模式运行部分主要包括了 4 种气候模式: 全球大气环流模式、全球海洋环流模式、高分辨率东亚区域气候模式和简化的 ENSO 预测模式。其中全球大气环流模式主要用于月尺度的集合预测(eDERF), 它与全球海洋环流模式耦合, 构成海气耦合模式, 用于季节/多季节的全球预测; 海气耦合模式与区域气候模式嵌套, 用于提供高分辨率的东亚季节预测。图 1 是国家气候中心动力气候模式预测系统框图。

2.1 全球海洋资料同化

资料同化在数值模拟及预测中起着十分重要的作用。由于观测要素在时空分布上具有很强的不均匀性, 观测资料存在着不可避免的误差, 因此, 气候模式不能直接使用这些观测资料。资料同化就是尽可能地对这些误差和不确定性进行估计和调整, 使得以此观测资料所形成的模式初始场与气候模式具有最大的协调性。在气候系统中, 海洋运动是慢变过程, 也是季节到年际时间尺度

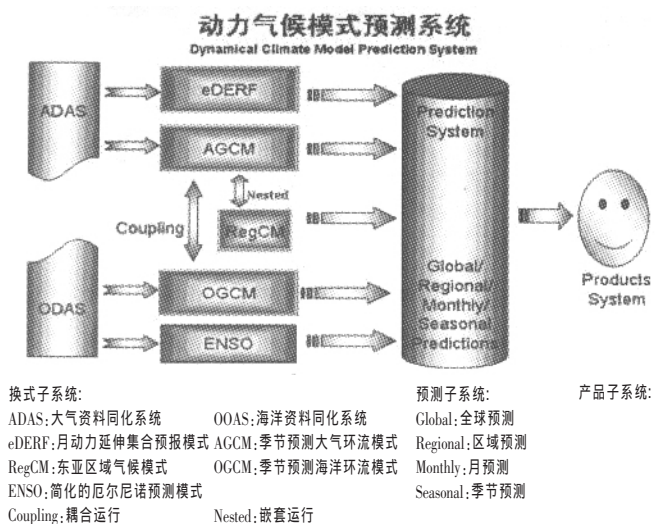


图1 动力气候模式预测系统框图

预测的主要信号来源之一。海洋资料的同化就是要为整个短期气候模式预测系统提供最为重要的海洋异常状况的初始信号。国家气候中心“全球海洋资料同化系统”(NCC-GODAS)既是整个模式预测系统的一部分,同时又相对独立。它采用三维变分方案,包含这样4个部分。

(1) 资料预处理:资料收集、解报,资料质量控制、规格化。

(2) 全球实时风应力生成:利用实时海面观测资料计算出风应力,再做OI(最优插值),获得全球的模式格点分析场,然后将该分析场作为大气强迫场之一。

(3) 变分分析:在空间上采用三维变分;在时间上,开一个窗口(定为4周)。也即某一时刻前后两周的观测资料都会对该时刻提供一定的信息,将这个时间窗口内的观测资料按一定权重插入分析插值系统,权重的大小取决于观测时刻与该时刻的时间间隔。

(4) 海洋动力模式:同化系统所采用的海洋动力模式与模式预测系统中的全球海洋环流模式完全一致。

图2给出了NCC-GODAS的同化结果。对比分析1982年以来的结果显示,NCC-GODAS能很好地捕捉海洋状况的异常信号。无论是海表面温度及其异常(SST/SSTA)还是Nino指数和次

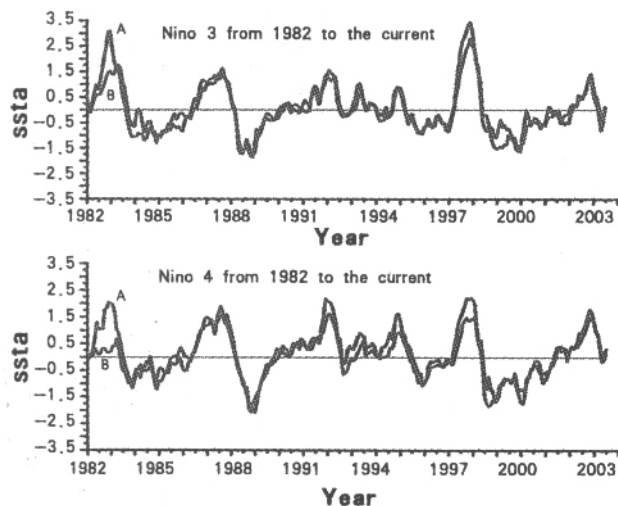


图2 NCC-GODAS 结果分析。左图给出了1982年到2003年的Nino3(上)和Nino4(下)指数,A线为实际观测(NCEP的oisst结果),B线为NCC-GODAS的同化结果。右图给出了南北纬5度平均的次表层60米左右海温距平时间(2000.10-2003.7)-纬度(120E-80W)分布对比,其中左侧为EMC/NCEP的太平洋区域同化结果,右侧为NCC-GODAS同化结果。

表层海温变化,都与实际观测和国外先进的同化系统(EMC/NCEP的太平洋区域同化)结果相一致。

2.2 全球大气—海洋耦合模式

全球大气—海洋耦合模式由国家气候中心和中科院大气物理研究所合作研制,是由全球大气环流模式(T63L16 AGCM_1.1)与全球海洋环流模式(L30T63)通过日通量距平耦合方案在开洋面上逐日耦合而形成的,被称作CGCM_1.1。

2.2.1 大气部分

T63L16全球大气环流模式是“九五”期间国家气候中心与中科院大气物理所等单位合作研制的一个较高分辨率的大气环流模式。该模式包含大地形、辐射、大尺度降水、积云对流、蒸发、凝结等较全面的物理过程,在计算上采用半隐式时间积分格式。模式源于国家气象中心的中期天气预报业务模式,其更早的来源可追溯到欧洲中期天气预报中心1988年Cray机版本的中期预报模式。模式水平方向采用三角形截断,取63波(近似于 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$),垂直方向分成16层(模式顶层约为25hPa,模式底层约为996hPa),采用P- σ 混合坐标(η 坐标)。时间步长为22.5分钟。

在发展过程中,对原中期数值预报模式从动力学和物理过程等方面进行了改进。例如,将参考大气方案和质量守恒方案加入到大气模式中;用逐步循环订正法对模式初值中存在的负水汽问题进行了特别处理,克服了负水汽现象;采用半拉格朗日方法计算水汽输送;辐射采用Morcrette方案等。此外,把原模式中固定的气候边界条件(海表面温度、土壤深层温度和湿度在模式积分过程中保持月平均值),改为由月平均场插值到每一天,增加了与气候相关的下边界条件。现在,仍保留使用原中期预报模式的一些物理参数化方案。其中,对流方案是Kuo参数化方案,重力波拖曳参数化采用Palmer方案的修改型,陆面过程采用基于地表热量平衡的陆面模式,土壤分为3层,考虑了植被对地面蒸发的作用以及与雪盖有关的感热通量作用。由此形成一个有完整物理过程的大气模式T63L16 AGCM_1.1,利用这个模式可以进行月/季节尺度的气候预测或气候模拟研究。

2.2.2 海洋部分

L30T63全球海洋环流模式是在中科院大气物理所(IAP)大气科学地球流体力学国家重点实验室(LASG)的原20层、4×5水平格距的全球海洋环流模式的基础上发展起来的。L30T63全球

海洋模式的水平分辨率约为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$, 垂直方向分 30 层, 其中 250 米以上分为 10 层, 250 米至 1 000 米分 10 层, 再往下至 5600 米分 10 层, 这样使得温跃层内的分辨率大大提高。该模式没有采用“刚盖”近似, 因此, 海表面高度是模式的一个预报量。

模式的控制方程是斜压原始方程组, 为了方便描述自由面及处理复杂的海底地形, 模式垂直坐标采用了坐标系统。自由海面高度的引进, 使得海洋模式的原始方程中包括了快速的重力外波。模式的海水状态方程是根据一个三阶多项式拟合的 UNESCO 公式计算的, 只计算密度对温度和盐度的扰动量, 即扣除了所在深度的参考层结。在模式积分过程中, 为节省计算机时, 采用了正、斜压分离—耦合算法。在斜压模内部, 温盐过程又进一步被从动量过程中分离出来。模式的正压模、斜压模和温盐过程的时间积分均采用蛙跃格式, 但时间步长有所不同。正压步、斜压步、温盐步的时间步长分别是 2 分钟、4 小时、8 小时。

大洋表面的边界条件是一种牛顿张弛型的边界条件, 表面热量通量的计算采用 Haney 型海表热通量公式。模式海冰的消长是根据 Parkinson 和 Washington 原理重建的一个热力学海冰模式来进行的。当模式预报的 SST 达到冰点时出现海冰。由于考虑了“水道”, 有海冰覆盖的网格中的海温主要受海气之间通过水道交换的热量所控制, 因此, 模式中不仅考虑了海冰厚度的变化, 也考虑了海冰面积和水道面积的相互消长。在次网格尺度物理过程参数化方面, 为了改进海洋主温跃层的模拟, 该模式还采用了 Gent 和 McWilliams 发展的沿等密度面的混合方案。在 30°N – 30°S 的热带海洋上层, 为了改善对赤道温跃层的模拟, 引进 Pakanowski 和 Philander 的海洋上层垂直混合方案。此外, 还采用了 Rosati 太阳短波透射的参数化方案, 但根据模式需要, 修改了有关参数。

2.2.3 耦合方案

全球大气环流模式 T63L16 AGCM_1.1 与全球海洋环流模式 L30T63, 通过日通量距平耦合方案在开洋面上的逐日耦合, 形成了全球海气耦合模式 CGCM_1.1。在耦合模式中, 没有考虑海洋模式和大气模式之间的淡水通量交换。

2.3 高分辨率东亚区域气候模式

在美国大气研究中心 NCAR 的第二代区域气候模式 RegCM2^[1-3]的基础上, 通过改进不同物理过程参数化方案, 并将模式范围拓展到包含青藏高原在内的东亚区域, 发展建立了一套与全球大气—海洋耦合模式嵌套运行的高分辨率区域气候模式(记为 RegCM_NCC)^[4]。

与 RegCM2 相比, RegCM_NCC 模式改进了陆面过程、积云对流、辐射过程、边界层和地形处理等多方面的物理过程参数化方案。主要包括 4 方面。(1)陆面过程方面, 改进了陆面特征参数(地面植被、粗糙度长度和地面反照率等)的赋值方法, 更新了大气和下垫面的交换系数算法, 改进了原来模式中采用的生物圈—大气传输方案(BATS)中的土壤

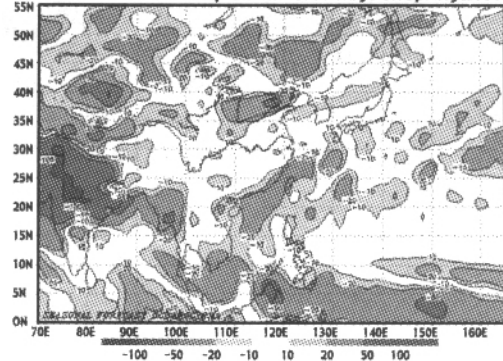
温度和土壤湿度的求解方法以及积雪过程的描述方案。结果表明, 改进之后的模式对于不同年份的异常降水过程中的陆面特征量和降水的模拟效果都有了显著的改进。(2)积云对流过程方面, 在 RegCM2 已有的两个方案选项的基础上, 我们又增加了两个选项, 即修正的质量通量积云对流参数化方案(MFS)和 Betts–Miller 对流参数化方案。模式结果表明, 1991 年夏季江淮地区的特大降水过程与 1994 年华南特大暴雨过程的模拟效果, 都比原模式更为合理。(3)模式中利用 CCM3 的辐射方案取代了原来的 CCM2 辐射方案。(4)对于边界层过程和地形处理方案, 采用了湍流动能(TKE)闭合方法、包络地形和重力波拖曳方法, 模式用于 1991 年的个例试验, 也能够改善对气候系统和气候要素的模拟效果。此外, 我们对于区域气候模式的嵌套方案也做了改进试验, 按上述各改进方案予以组装和整体调试, 并进行了数值试验的检验。结果表明, RegCM_NCC 不仅可以合理地模拟不同地区的环流特征, 而且可以真实再现东亚季风区降水的时空演变特征^[5]。该模式已成为模式预测系统中针对东亚区域进行预测的重要工具^[6]。

2.4 ENSO 模式

在引入美国哥伦比亚大学 Lamont–Doherty 地球观测台模式和英国牛津大学模式的基础上, 通过调整和改变一些参数、热通量项、资料初始化方案等, 建立了包含 NCCo、NCCn、NCC/NIM、NCC/STI 和 CAMS/NJU(NCC、NIM、STI、CAMS、NJU 分别是国家气候中心、南京气象学院、上海台风研究所、中国气象科学研究院、南京大学的英文缩写)等 5 个模式在内的一组专门用于预测 ENSO 过程的简化海气耦合模式。它们的模式范围在热带太平洋或热带海洋, 模式物理过程较复杂的全球海气耦合模式比较简单, 但模式运算较快, 可以提供提前半年至一年半的 ENSO 预测信息。

2.5 模式预测业务

Ensemble mean Precip. anom. Percentage on Spring 2003



RegCM_NCC Predicted Precipitation Anomaly of JJA 2003(%)

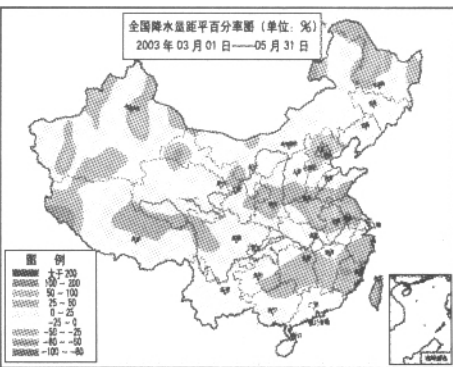
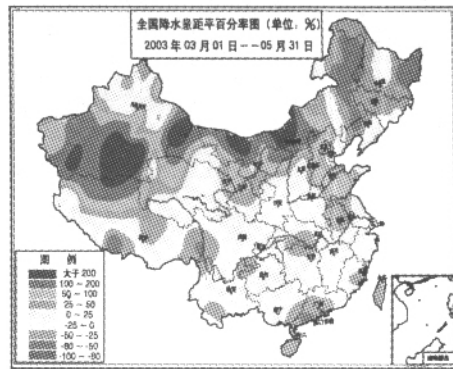
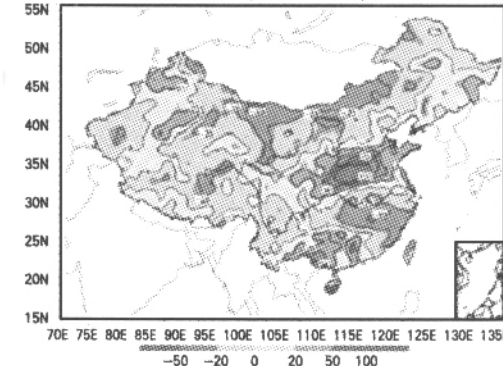


图3 2003年春夏降水预测和实况对比。(a)左上:海气耦合模式的春季预测;(b)左下:区域气候模式的夏季预测;(c)右上:春季降水实况;(d)右下:夏季降水实况。

表 1 海气耦合模式 20 年(1983~2002)汛期回报试验的效果评分

	PS	CLSS	RASS	ACC	TS
1983	67.27	0.19	0.04	0.13	0.05
1984	63.19	0.09	-0.07	-0.15	0.03
1985	65.24	0.19	0.04	0.25	0.04
1986	76.88	0.35	0.23	0.04	0.00
1987	66.06	0.18	0.03	0.04	0.05
1988	75.46	0.45	0.35	0.25	0.03
1989	56.79	0.05	-0.12	-0.01	0.02
1990	68.90	0.22	0.08	0.17	0.05
1991	67.08	0.20	0.06	0.12	0.01
1992	66.06	0.17	0.02	0.00	0.05
1993	63.31	0.12	-0.05	0.17	0.08
1994	62.80	0.15	-0.01	0.21	0.04
1995	68.32	0.25	0.11	0.04	0.01
1996	69.46	0.23	0.09	0.06	0.07
1997	61.25	0.01	-0.17	-0.17	0.00
1998	57.32	0.11	-0.06	0.13	0.04
1999	58.64	0.16	0.01	0.12	0.02
2000	69.38	0.11	-0.06	0.05	0.00
2001	57.06	0.06	-0.11	-0.12	0.03
2002	69.14	0.35	0.23	0.22	0.02
平均	65.48	0.18	0.03	0.08	0.03

目前,以动力气候模式系统为基础,国家气候中心已经逐步形成了一套从月到季节乃至年际的多种时间尺度的模式预测业务。

2.5.1 月预测

业务流程包括 3 部分内容。(1)初值形成:包含了滞后平均预报方法和奇异向量方法两种方法。奇异向量方法采用并行计算,缩短了初值形成所需要的墙钟时间。(2)模式运行:进行不同初值的 45 天积分。每个初值都是按并行运算的方式执行,模式后处理与模式积分本身并行,业务系统可以进行多个初值的同步运算。(3)预测信息提取。利用不同的方法进行集合信息提取,并自动形成最终产品。目前,月尺度的预测为逐旬地滚动进行,每月运行 3 次(每旬 1 次),分别以每旬的最后 4 日的 4 个时次的初始场为基本初值,同时,海温场选用距初值时刻最近的周平均实况海温,进行 30 天平均集合预报。集合的最大成员数目可达 64 个。

2.5.2 季节预测

业务流程与月预测类似,只是其中海洋状况的初始场由海洋资料同化系统提供。由于计算量庞大,目前只在每个季节的最后一个月月初制作下一个季节的季节预测,在 3 月初制作一次预报时效为 7 个月的季节预测,在 10 月初制作一次预报时效为 13 个月的季节预测。每次预测可提供全球和东亚区域的集合预测信息,集合的最大成员数目为 8 个。

3 预测效果的评估

3.1 2003 年季节预测

动力气候模式预测系统从 2003 年春季开始试验性业务运行,至今已经稳定运行近一年半。1 年多来的业务预测试验表明,系统的预测效果较好。图 4 给出了 2003 年春季(图 4a)和夏季(图 4b)分别由海气耦合模式和区域气候模式所作的降水预测。对照实况(春季:图 4c 和冬季:图 4d)可以看到,这两次预测相当成功。尤其是 2003 年淮河流域的多雨区,区域气候模式给出了很好的预测。当然,不能仅以 1 次预报的效果评价模式预测系统的能力。为此,我们对预测系统做了 20 年的历史回报检验。

3.2 历史回报(Hindcast)效果

为系统性地检验模式系统的预测效果,我们进行了历史回报试验(Hindcast)的检验。回报事实上是一种针对过去的实际“预测”

的模拟过程,它和实际的预测操作完全一样,只是采用了历史资料作为初始场来制作。

表 1 给出了海气耦合模式 20 年(1983~2002)回报试验的效果评分。该预报试验以每年 3 月初预测当年汛期(6~8 月)中国区域降水异常的结果做检验评估,采用国家气候中心汛期预测业务评分标准进行定量评估(包括中国汛期预测业务预报评分 P、相对于气候预报的技巧评分 CLTC、相对于随机预报的技巧评分 RATC、距平相关系数 ACC 和异常技巧评分 TS)。与国家气候中心多年的业务预测评分相比,模式预测能力已经基本接近,有些指标甚至超过了业务预测的得分。

区域气候模式的预测效果也有类似的特征(表略)。

4 总结与展望

经过 8 年多的研制和发展,国家气候中心建成了第一代动力气候模式预测业务系统,并以此为平台逐步形成了月、季节到年际时间尺度的模式预测业务。经过 1 年多的试验性业务运行和 20 年的历史回报试验检验,表明模式预测系统的预报效果良好,在某些指标上已超过统计方法的预测水平。模式预测正逐步成为我国短期气候预测业务的主要工具之一,并且在全球气候预测的信息交换中发挥重要作用,是东亚区域气候预测的主要参考。但是应该看到,现在的动力气候模式预测系统与满足国家需求之间仍有很大距离,其预测能力和预测信息利用方面还急需加强。

首先,目前的模式预测系统主要是以用海气耦合模式为主,其中的陆面和海冰部分相对非常简单。为提高模式系统的模拟预测能力,耦合了多圈层相互作用的气候系统模式是不可替代和最具潜力的,也是目前国际上气候研究的前沿领域和未来发展方向。我国科学家已充分认识到建立我国自己的气候系统模式的重要性,并于 2003 年正式启动“气候系统模式的发展研究”计划。该计划拟通过加强对生物过程、化学过程,包括陆面的植被变化过程、海洋的碳循环过程、大气化学过程等的模式物理参数化的研究,最终建立一个具有特色的气候系统模式。

其次,影响我国气候季节、年际和年代际变化的物理因素非常复杂,既包括全球海温,也包括青藏高原积雪、极地海冰、陆地表面过程及土壤中的温湿状况等。总体上来看,目前国内外通用的各种数值模式,对东亚天气和气候的模拟和预测能力都还非常有限。所以,针对东亚区域的地形和气候特点,提高和改进模式对东亚区域气候的模拟能力是我们今后的主要努力方向。

动力模式预测的不准确主要来源于初值的不准确和模式的不准确。为了降低由于模式初值误差所导致的预测结果的不确定性和随机性,通常采用多初值的集合预报方法。国外目前集合预报的思路主要是:取初始时刻在一定范围内的尽可能多的初值,从大量的初值出发,就可相应得到大气未来一切可能演变的预报,也就是尽可能将未来大气演变的可能状态都包含在该集合中。国外的集合预报成员大多在 30 个以上,有的多达 50~60 个。目前我们的季节预测不同初值预报成员是 8 个,样本数较少,随着计算资源的改善,这方面的能力可以得到加强。但是,由于动力气候模式是一个高度复杂的非线性系统,利用不同的初值预报的未来气候变化可能属于不同的吸引子(或不同的演变趋势),而真实大气未来演变又是唯一和确定的,对于大量的属于不同吸引子的预报结果进行集合平均显然是不合适的。因此,从理论上讲,如果把属于同一吸引子的成员进行集合平均,这样就可以明显改进集合预报的效果。另一方面,不同的模式在相同的初值情况下的预测结果与实际情况之间也存在误差(或偏差),这些偏差就是

我国近 50 年旱涝灾害时空变化及监测预警服务

张 强 高 歌

(中国气象局国家气候中心,高级工程师 北京 100081)

〔摘要〕 本文根据近 50 年来旱涝灾害灾情统计资料,分析了我国干旱、洪涝灾害的时空分布特征及其变化趋势。统计结果表明:近 50 年来,特别是 20 世纪 80 年代以来,受全球气候变化的影响,我国降水呈现南方偏多、北方偏少的变化趋势,致使我国干旱灾害发生频率增加的同时洪涝灾害也不断增加,农作物受灾和成灾面积增加趋势明显,损失日趋严重。此外,为做好防灾减灾服务,及时向政府有关单位提供旱涝监测实况信息,国家气候中心自 1995 年开始开发了实时逐日旱涝监测预警系统。该系统利用全国 600 个基本气象站点的降水量、气温、湿度等气象观测资料和未来 7 天降水预报资料进行统计,确定气象干旱监测、预警指标,并结合气象部门农业气象站土壤湿度监测资料和卫星遥感干旱监测结果,发布《中国旱涝气候公报》,为政府有关部门和社会公众服务。

〔关键词〕 干旱 洪涝 变化特点 监测 [中图分类号] P4 P7 [文章编号] 1000-7857(2004)07-0021-04

THE SPATIAL AND TEMPORAL FEATURES OF DROUGHT AND FLOOD DISASTERS IN THE PAST 50 YEARS AND MONITORING AND WARNING SERVICES IN CHINA

ZHANG Qiang GAO Ge

(National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: In the context of statistic data of drought and flood disasters in the past 50 years, the spatial and temporal features of drought and flood disasters and their changing tendencies were analyzed. The result shows in the past 50 years, particularly starting from 1980s, the precipitation has been increasing in the east of China while the precipitation has been decreasing in the north of China. When the frequency of drought increased, the flood also increased. The crop areas stricken and affected by drought and flood increased clearly and economic losses became huger and huger. In order to prevent and mitigate disasters and provide timely drought and flood monitoring information to government and users, National Climate Center has been developing the daily drought and flood monitoring and warning system since 1995. The operational system has set up the drought monitoring and warning index, based on the meteorological observation data from 600 stations in China and forecast data with 7 days in advance. Based on the index and the soil moisture observed by agricultural and meteorological stations and drought result from satellite remote sensing into account, the Monitoring Bulletin of Drought and Flood in China are released for relative departments of the government and the public.

Key Words: drought, flood, feature, monitor

模式本身的误差造成的。利用多模式的超级集合预报,可以减弱模式系统误差对预测结果的影响。多模式超级集合结果从理论和实际预测试验上都优于单模式结果和简单集合的平均结果,它是未来模式预测的一个发展方向。

(本文所介绍的动力气候模式预测业务系统是“我国短期气候预测系统加强研究”课题——“短期气候预测综合动力模式系统业务化”(96-908-06-3)的成果,谨向参与该项研究的所有人员表示衷心感谢。)

参 考 文 献

- [1] 董敏,陈嘉滨,季仲贞等. 季节预测大气模式研制和应用进展[A]. 见:国家“九五”重中之重 96-908 项目办公室编. 短期气候预测业务动力模式的研制[C]. 北京:气象出版社,2000. 63~69
- [2] Jin X. Z., Zhang X. H., Zhou T. J. Fundamental framework and experiments of the third Generation of IAP/LASG world ocean general circulation model[J]. Adv. Atmos. Sci., 1999, 16(2):197~215

- [3] 张学洪,赵其庚,杨修群,俞永强,金向泽,刘钦政. 海洋环流-海冰模式和海气耦合研究进展[A]. 见:国家“九五”重中之重 96-908 项目办公室编. 短期气候预测业务动力模式的研制[C]. 北京:气象出版社,2000. 161~169
- [4] 陈桂英,黄嘉佑,王会军. 现有短期气候预测方法的检验、评估和集成研究——短期气候监测、预测、服务综合业务系统的研制[M]. 北京:气象出版社,2000. 3~12
- [5] 丁一汇,刘一鸣,宋永加,李清泉. 我国短期气候动力预测模式系统的研究及试验[J]. 气候与环境研究. 2002, 7(2):236~246
- [6] 罗勇,赵宗慈. NCAR RegCM2 对东亚区域气候的模拟试验[J]. 应用气象学报. 1997, 8(增刊):124~133
- [7] 龚建东,李维京,张培群,陈丽娟. 月动力延伸集合预报业务系统的建立与发展——动力延伸预报方法研究[M]. 北京:气象出版社,2000

(责任编辑 苏 青)