

我国短期气候动力预测模式系统 的研究及试验^{*}

P46 A

丁一汇 刘一鸣 宋永加 李清泉

(国家气候中心, 北京 100081)

摘 要 气候和气候异常对我国的国民经济发展具有重大影响, 为提高短期气候预测的准确率, 研究动力气候模式短期气候预测新技术至关重要。通过近5年的努力, 建立了一套由月动力延伸预报模式、海气耦合的全球气候模式(AGCM+OGCM+海冰+高分辨率印度洋—太平洋海盆模式)、区域气候模式季和年际尺度的业务动力模式组成的系统。初步把我国的短期气候预测水平由经验统计方法提高到定量和客观分析的水平上。在此基础上, 已建成了一个具有物理基础的统计方法与气候动力模式相结合的综合气候预报系统。

关键词: 短期气候; 动力预测; 模式系统

1 引言

由于气候和气候异常对各国的经济发展具有重大影响, 因而成为全球关注的焦点。一些国际组织制定了专门的计划来研究气候异常的成因和预测问题(如WCRP/CLIVAR)。我国政府对气候工作高度重视, 科学技术部在气候及相关领域相继设立了若干个重要的研究项目, “九五”国家重中之重科技项目“中国短期气候预测系统的研究”便是其中最突出的代表。该项研究包含5个方面的内容, “短期气候预测业务动力模式的研制”是其中之一。

中国短期气候预测业务系统, 重点研究以动力气候模式和统计—动力学方法为主的综合短期气候预测新技术。该模式系统的研制是项目研究的关键部分^[1], 主要研究内容是建立一套适合中国条件的、有坚实物理基础的短期气候预测业务动力模式系统, 利用这套模式系统进行月尺度、季节尺度到年际尺度的短期气候预测。其技术路线是在我国现有的数值预测模式的基础上, 广泛吸收世界各先进国家气候模式的有关优点, 综合研制出符合我国实际情况、针对中国主要气候灾害(旱涝)的气候模式预测系统。所建立的短期气候动力模式系统包括3种时间尺度的气候预测动力模式, 即月尺度动力延伸预测模式, 用于季节预测的低分辨率海气耦合模式, 其中嵌套一个高分辨率区域气候模式以及预测 ENSO 事件年际变化的简单海气耦合模式。这4种模式与前处理和后处理分系统有机地形成了我国第一代可供业务应用的动力气候模式预测系统。该气候模式系统已于2000年底完成全部研制和系统总装以及调试和试验工作, 现已在国家气候中心的汛期和年度预报中起到了一定的作用。

2002-03-10收到

^{*} “九五”国家重中之重科技项目 96-908-02 及其加强课题资助

2 我国短期气候动力预测模式系统的组成和试验

我国短期气候动力预测模式系统由 7 部分组成：资料输入前处理分系统，月动力延伸预报模式，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，厄尔尼诺事件年际变率预测模式和处理系统与模式检验分系统^[1]。短期气候预测动力模式系统结构及流程图如图 1 所示。

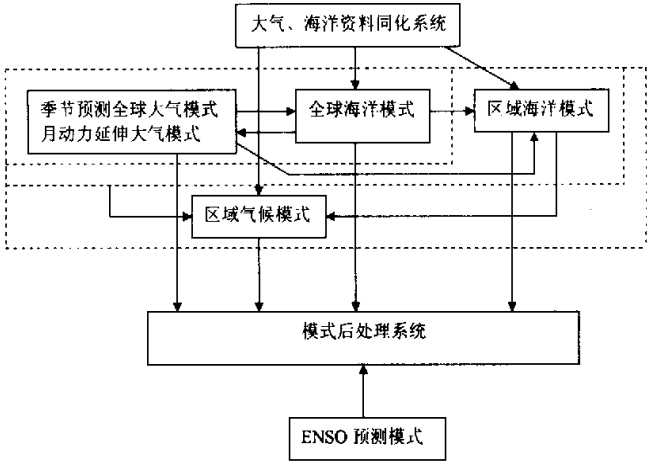


图 1 短期气候预测动力模式系统结构及流程图

2.1 资料输入前处理分系统

资料输入前处理分系统是气候模式系统的初始资料输入部分，主要为短期气候预测动力模式提供协调及高质量的初始场和模式所需的有关要素场资料。它由 5 个子系统构成：1) 气候动力模式初始化。采用非绝热、非线性正规模初始化方案，对潮汐信息进行修正，为模式提供质量场和风场之间更为平衡的初始场。2) 全球大气资料同化。由观测资料处理、初估场处理、三维变分分析和后处理 4 部分组成。3) 区域大气资料同化。采用 6 h 周期的间歇资料同化方法，包括观测资料预处理、初估场和边界条件形成、客观分析、初值化、同化模式预报和后处理等部分。系统网格和区域气候模式一致。4) 海洋资料同化。包括全球和区域两部分。基于三维变分原理的全球海洋资料同化系统，考虑了初估场误差协方差水平各向异性，计算机资源充分时可考虑三维各向异性；区域海洋资料同化系统采用四维同化方案，其中三维空间采用二维变分，时间维采用开窗口把不同时刻资料插入。5) 非常规要素资料提取及加工处理。根据静止卫星覆盖范围大，接收时次多的特点，利用 GMS-5 卫星 4 个通道 (IR1、IR2、WV 和 VIS) 资料，进行海温、积雪、地表反照率反演技术的研制和开发。

2.2 月动力延伸预报模式

表 1 列出了气候模式指标和性能。月动力延伸预报模式动力框架与季节预测大气环

流模式一致, 由中国气象局中期数值预报模式演变而来。其在 T63L16 中期数值预报模式动力框架基础上, 改进下垫面物理过程¹⁾, 建立了 T63L16 月动力延伸预报模式子系

表 1 气候模式指标和性能一览表

范围	全球				区域		
水平范围					70~160°E 10~50°N	60°N~35°S 25°E~70°W	29°N~29°S 124°E~80°W
模式	T63 月动力 延伸预报模 式	T63 大气环 流模式	全球海洋环 流模式	全球热带海 洋海温距平 预测模式	高分辨率 区域模式	高分辨印度 洋-太平洋 海洋模式	热带太平洋海 温距平预测模 式
水平分辨率	1.875°×1.875°		1.875°× 1.875°	5.625°×2° 2°×0.5°	60 km× 60 km	(1°/3°~1°) ×1.5°	1°×1° 0.1°×0.1°
垂直分辨率	16 层		30 层	2.5 层	16 层或可 变	31 层 (400 m 以上有 22 层)	2.5 层
基本方程	原始方程		原始方程	简化原始方 程	原始方程	原始方程	简化原始方程
坐标系	σ - p 混合坐标		η	λ, θ, z	σ	λ, θ, z	λ, θ, z
计算方法	谱变换, 半隐式时间差分		差分法	—	差分法	有限差分	—
时间积分步 长	22.5 min		正压 2 min, 斜压 1 h 或 4 h, 温 盐 24 h 或 8 h	月	120~180 s	速度场为 6 min, 温盐 场为 72 min	月
模式地形	请地形		逼真地形	—	包络地形	据 1°×1° 分 辨率的海底 地形逼真确 定	—
物理过程参 数化包括耦 合与嵌套方 法	辐射与云, 对流, 陆面过 程, 边界层等		等密度面扩 散; 太阳短 波透射等。 与海冰模式 嵌套及与太 气环流模式 耦合		陆面过 程, 青藏 高原, 积 云对流, 辐射传 输过程, 边界层等。 与海气耦 合模式三 维嵌套。	水平和垂 直扩散, 垂 直混合依 赖于理 查逊数	热力学等过 程两种模式: LDEO 与 Oxford
预报范围与 时效	北半球, 月	全球, 季	全球, 季	全球, 半年 至一半	中国地 区, 月至 季	季	半年至一年
主要性能	月平均环 流, 月降水 雨带	东亚季节雨 带的预测, 梅雨季节的 汛期预测	海洋环流, 海洋温度结 构, El Niño 与 La Niña 预测	El Niño 与 La Niña 预 测	模拟与预 测东亚区 域气候特 征; 季风和 雨带的推 移及演 变	模拟印度洋 -太平洋区 域海洋的平 均状态和海 洋上层的季 节和年际变 化	El Niño 与 La Niña 观测、 暖池 SSTA 预 测

1) 短期气候动力预测模式系统, 国家“九五”重中之重科技项目, 国家气候中心, 2000, p44

统。这个系统包括业务流程及预报产品的输出系统和预报结果的检验系统, 并已进行准业务应用试验 3 年左右, 积累了上百次动力延伸集合预报的结果。同时加强了模式预报产品和释用方法的研究, 可提供月平均环流及其距平场、月降水距平和环流特征量(包括西太平洋副热带高压强度与位置等)。

为从理论和方法上来提高月动力延伸预报的技巧, 关键问题之一是初值集合的形成。目前用四维变分同化方法与奇异向量方法结合起来形成多个合理的初值集合。另外, 分别用气候平均纬向场和预报前期第一旬的纬向平均代替模式预报的纬向平均, 改进了月预报技巧。

2.3 季节预测大气环流模式

该模式以国家气象中心中期数值预测模式(T63 版本)的动力框架为基础, 参考国内外一些先进的气候模式进行综合和改进, 形成一个有完整物理过程, 能描写全球大气运动变化的三维大气环流模式。

对原模式动力学框架的改进主要包括: 1) 引进标准大气, 采取静力扣除法以减少模式的截断误差, 改进在陡峭地形附近气压梯度力计算的准确性。2) 采用半拉格朗日法进行水汽的水平和垂直输送计算, 以克服水汽和伪降水的发生。3) 改进模式长期积分的质量守恒性质。4) 开发并行计算程序版本。

模式主要物理过程参数化方法的改进包括: 1) 辐射, 引进了两种新的辐射方案, 即 K 分布辐射方案和 Moncrett 方案, 并进行新、旧辐射方案的对比试验。2) 对流参数化方案, 引进 Gregory 的质量通量方案, 替代了原模式中的 Kuo 氏对流参数化方案。3) 陆面过程, 在模式中加入陆面过程生物—大气传输模式和雪盖模式。4) 边界层方案, 在不稳定大气条件下, 考虑了重力波拖曳方案的改进, 在模式水汽的边界层输送方面, 采用对边界层湍流扩散和边界层自由对流方案的 $1\frac{1}{2}$ 闭合方案。

目前该模式已经用于东亚季节雨带, 尤其是梅雨季节的业务预报试验。分析结果表明, 该模式具有较好的积分性质, 能够模拟全球气候的基本特征。它已与全球海洋环流模式耦合, 并且为高分辨率区域气候模式提供边值条件, 以进行嵌套。

2.4 全球和太平洋—印度洋海洋环流模式

全球海洋环流模式(T63L30 OGCM)的水平分辨率与全球大气环流模式相同, 水平方向采用 T63 三角谱截断一致的网格系统, 以便与 T63 大气模式耦合。垂直方向分为 30 层, 其中 20 层位于 1 000 m 以上, 以求较好地模拟主温跃层。模式采用了自由海面, 而不是刚盖近似。同时, 还引入了沿着/穿越等密度面的混合方案。该模式能够真实再现全球海温气候态, 使大洋主温跃层、温盐环流和经向热输送的模拟得到极大改善。模式已经稳定积分 1 100 年以上, 并作为与热带太平洋—印度洋海洋环流模式单项嵌套的边界条件, 能够较好地模拟海洋表层和次表层海温的年际变异以及 El Niño 事件的发展过程。另外还发展了一个热力—动力学海冰模式, 较为系统地检验了模拟的海冰厚度、密集度和漂流速度的全球分布及其季节变化, 并将此海冰模式与全球海洋环流模式成功地耦合起来。该耦合系统能够较好地反映海冰的显著季节变化, 冰盖最大、最小范围出现的时间与实况基本吻合。模拟的南、北半球海冰在 3 月和 9 月的地理分布基本合理, 只是模拟的北半球永久性、季节性冰区范围较实际偏小。

热带太平洋—印度洋海洋模式是一个高分辨率模式,揭示了近赤道温跃层海温和洋流变化特征及与海表风应力异常的关系,成功地模拟了 El Niño 事件在海洋的发展过程。该模式主要用于预测太平洋和印度洋的海表温度, El Niño 事件和暖池的海温结构等,以后可采用二步法来预测气候。它与全球海洋环流模式是单向嵌套的。

在改进的月通量距平耦合方案的基础上,提出了日通量距平耦合方案,并已成功地将其应用于 T63L30 海洋环流模式、海冰模式和高分辨率热带太平洋—印度洋模式的嵌套及其与 T63 AGCM 模式的耦合 (T63 CGCM)。该耦合模式已经积分 50 年,对上述海气耦合模式模拟结果的分析表明,积分过程不仅没有显著的气候漂移,而且 T63 CGCM 模拟出的赤道东太平洋暖、冷事件的位置和强度都比以前有很大改进,同时也模拟出了东亚季节雨带的演变。

2.5 高分辨率区域气候模式

在 NCAR / RegCM2 区域气候模式的基础上,通过改进模式的物理过程,包括陆面过程、辐射传输、积云对流、地形和边界层参数化方案,已将模式的西边界扩展到包括青藏高原在内的地区,发展建立了能与大气—海洋耦合模式嵌套运行的高分辨率区域气候模式,水平分辨率为 60 km,垂直方向 16 层,具有模拟与预测东亚区域气候特征的能力,尤其是季风和雨带的推移及演变。

1) 辐射方案的改进。引入 CCM3 的辐射参数化方案,结果表明新辐射参数化方案的模拟效果有较为明显的改进。2) 积云参数化方案的改进。研制了一个质量通量积云对流参数化方案 (MFS),并将该方案植入区域气候模式中。数值模拟试验结果表明,植入 MFS 的模式对区域气候特征和变化具有更好的模拟能力。与其他积云参数化方案的对比发现,新方案对地表气温、降水落区、强降水时段的模拟有很大的改进。也将 Betts-Miller 方案植入模式中,对中国的大暴雨两个例进行模拟,结果也比原模式有改进。3) 边界层方案的改进。提出“局部 TKE 闭合”方案,并利用实测资料进行了检验,结果十分吻合。现已将此方案引入区域气候模式中,对比数值模拟结果表明,此方案改进了模拟效果,特别是行星边界层高度。4) 三维嵌套方案和资料初始化与后处理。研究了区域气候模拟时采用嵌套方法所引起的侧边界误差及线性/非线性误差的积累性,并用三维嵌套方法进行了试验,改进了短期区域气候模拟的效果。完善模式的前处理和后处理程序,重点对后处理中分析诊断方法进行了开发,引入目前国际上较为先进的 POP (主振荡型) 技术,可以对模式的性能进行评价。5) 对中国 3 次严重洪涝年 (1991、1994 年和 1998 年) 的持续性降水与暴雨过程进行了数值模拟和检验。

由全球大气和海洋模式以及高分辨率区域气候模式与高分辨率太平洋—印度洋模式,可以组成一个多用途和不同分辨率的复杂耦合与嵌套系统。其主要部分都以模块化的方式相耦合和嵌套。

2.6 El Niño 事件年际变率预测模式

在引入美国哥伦比亚大学 Lamont-Doherty 地球观象台模式 (Cane 和 Zebiak) 和英国牛津大学模式 (Oxford) 的基础上,通过改变一些参数、热通量项、资料初始化和计算函数等,建立了 NCC、NCC/STI 和 NCC/NIM 模式及全球热带简化耦合预测模式 (GTSPM)。对 1997/1998 年 El Niño 及 1998/1999 年 La Niña 进行了预测试验,成功地预报了 1997~1998 年的 ENSO 事件的发生、发展和消亡,以及 1998 年

秋季开始的 La Niña 事件。利用简化的海气耦合模式专门对 ENSO 事件 (El Niño 与 La Niña) 进行预测, 可以提前 6 个月至 1 年提供预测信息。

2.7 后处理系统与模式检验分系统

后处理系统与模式检验分系统包括模式检验用资料集、诊断分析程序集以及资料转换和可视化系统。1) 建立了模式检验、评估子系统。采用北半球 500 hPa 高度场和中国 160 个地面站的降水、气温以及卫星反演的资料作为气候模式检验、评估依据。2) 可视化显示子系统。开发平台采用 NCAR 和 GRADS 绘图软件, 已完成一维图形显示功能、二维等值线自由着色功能、国际标准数据格式 GRIB 码的读取接口和显示功能等模块的开发工作。3) 卫星气候产品的研制。对自动估算降水的软件和雨量客观分析软件进行了试验运行, 调试了自动处理作业, 基本完成 OLR 产品的生成模式。4) 诊断分析子系统研制。已经建立完成气候模式结果诊断分析系统子程序库, 建立了模式结果基本诊断量的计算方法及动力诊断方法。

3 试验结果

该气候模式系统在其研制过程中, 各个模式都进行了大量的个例模拟试验和回报试验, 并在国家气候中心的汛期和年度预报中得到应用。

图 2 给出了使用区域气候模式 (RegCM_NCC) 对 1998 年夏季风和中国降水的模拟。1998 年夏季, 副热带高压西北侧的暖湿气流与南下的冷空气频繁在我国长江流域交汇, 长江流域大部频降大雨、暴雨和大暴雨, 局部降特大暴雨。沿江及江南部分地区降水量较常年同期偏多 0.6~1.5 倍, 引发了自 1954 年以来长江又一次全流域性的大洪水, 给沿江各省市的工农业生产及人民群众生命、财产造成巨大威胁和损失。这次大洪水的主要特点是长江流域夏季异常多雨, 强降雨带持续稳定, 降雨强度特别大, 尤其是突发性暴雨强度之大, 极为少见^[2]。根据亚洲夏季风特征及雨带位置和降水性质, 我们将整个汛期的降水分为 7 个阶段 (图 2a~g), 在这 7 个阶段中, 强降水出现的位置是不同的。降水第 1 阶段是 5 月 1~16 日, 这是南海季风爆发前的降水时段, 雨带主要位于长江流域及华南地区; 降水第 2 阶段是 5 月 17~25 日, 这是南海季风爆发期, 雨带主要位于华南地区; 降水第 3 阶段是 5 月 26 日~6 月 11 日, 这是华南前汛期, 南海季风全面爆发后, 雨带主要维持在华南, 降水量均超过前两个阶段; 降水第 4 阶段是 6 月 12~17 日, 雨带位于华南西部、江南北部, 这相应于江淮流域的前期梅雨; 降水第 5 阶段是 6 月 28 日~7 月 17 日, 长江流域降水很少, 雨带随副热带高压向北、向西推移; 降水第 6 阶段是 7 月 18~31 日, 雨带又回到江南, 这是长江流域的第二次梅雨; 降水第 7 阶段是 8 月 1~29 日, 降水频繁, 雨带主要位于长江流域上游和东北地区。从图 2h~n 可以看出, RegCM_NCC 能够模拟出华南季风爆发前、爆发期和全面爆发后的位于华南的雨带, 能够再现雨带的移动, 尤其是长江流域前期梅雨的雨带位置。雨带在前期梅雨之后向西向北的推移, 在长江流域第 2 次梅雨期雨带又回落到江南, 以及梅雨期结束后雨带位于长江流域上游。模拟的不足之处是模拟的降水量偏大, 这是模式的系统误差所造成。

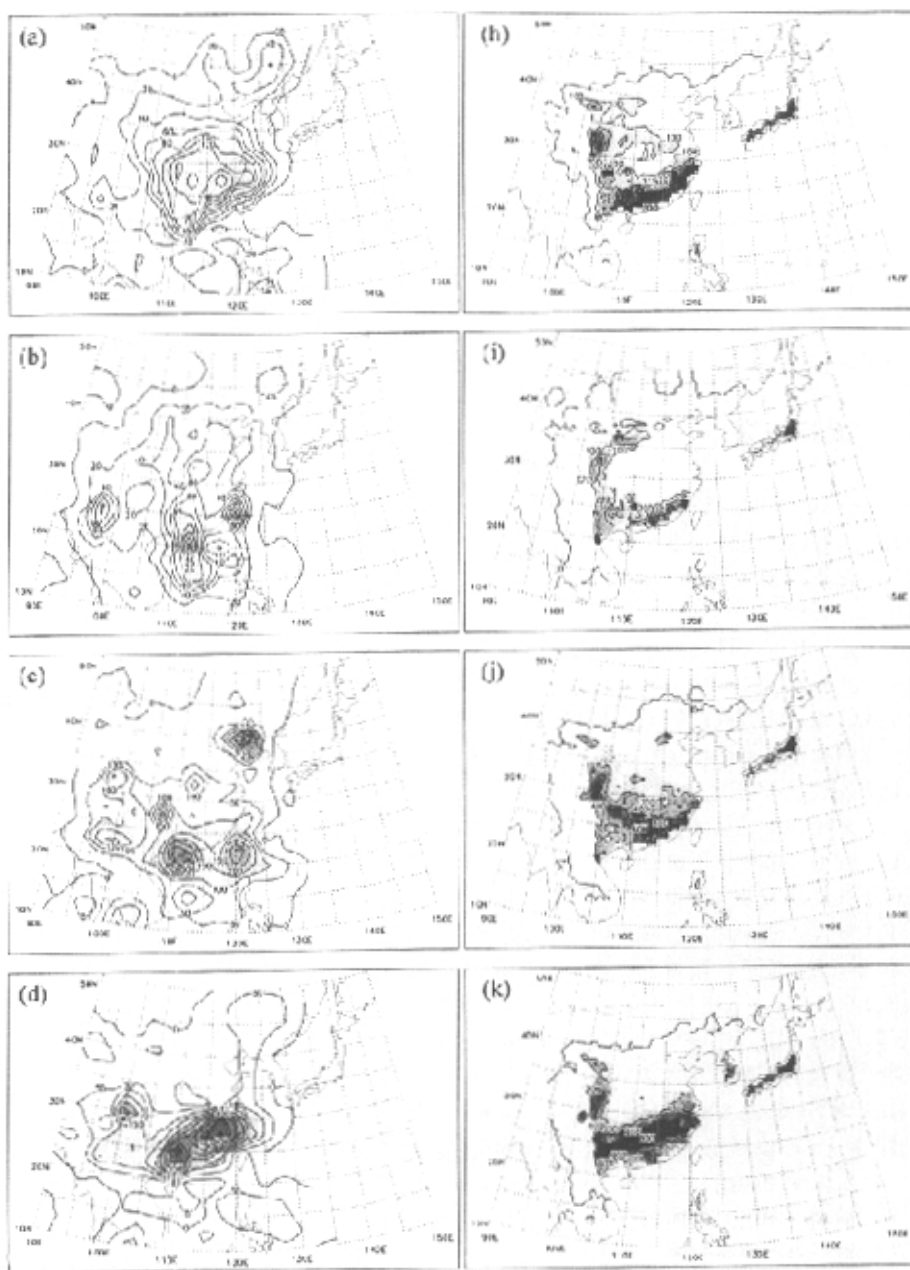


图2 (图题见下页)

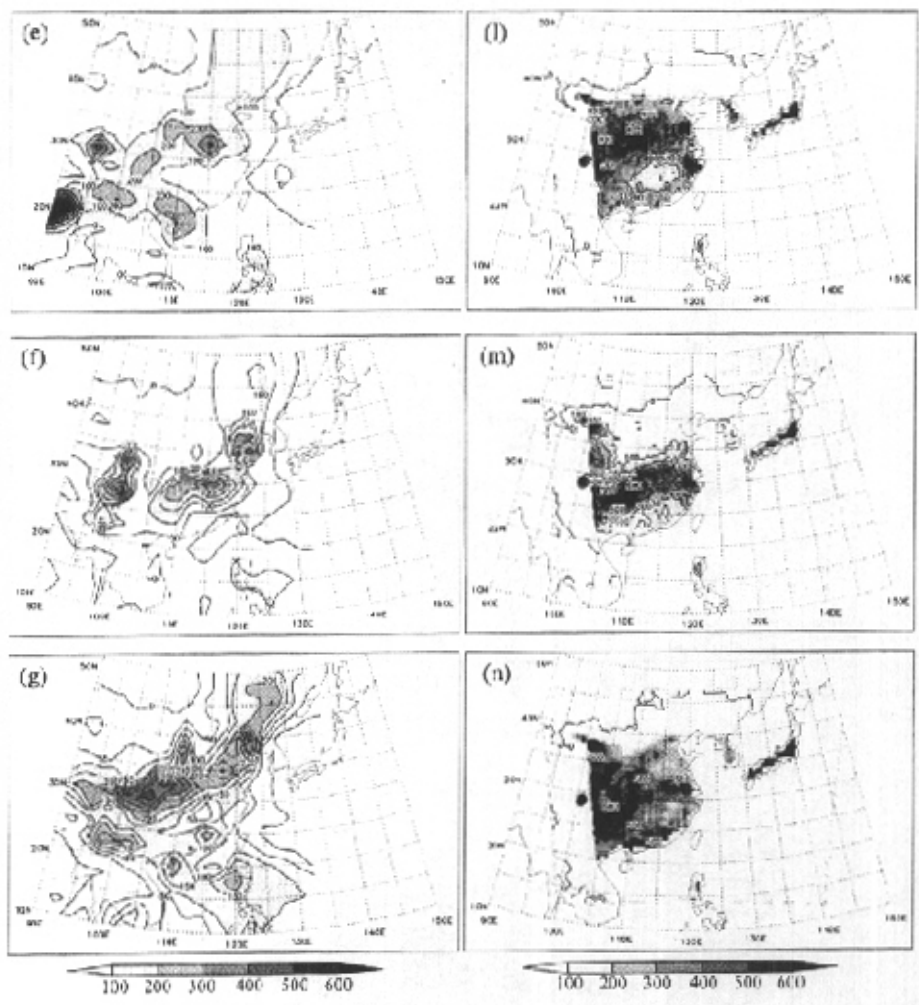


图2(续) 1998年夏季7个降雨时段的降水量分布(单位: mm)

(a) ~ (g) 观测降水量; (h) ~ (n) RegCM_NCC模拟降水量

(a), (h) 为5月1~16日; (b), (i) 为5月17~25日; (c), (j) 为5月26日~6月11日; (d), (k) 为6月12~27日; (e), (l) 为6月28~7月17日; (f), (m) 为7月18~31日; (g), (n) 为8月1~29日

全球海气耦合模式(T63OGCM_NCC)参加了国家气候中心2001年汛期预报会商, 图3和图4给出了该模式对2001年夏季6~8月降水距平和气温距平的预报以及与实际的对。从图3可以看出, 模式预计2001年夏季我国东北部、黄河流域、长江下游地区和西北大部的降水接近常年或偏少, 其中华西北部 and 西北东部可能会出现夏旱

或伏旱。实况是东北、华北、长江流域上游、黄河流域和西北大部的降水比常年偏少。模式预计东北大部、华南、西南和西北北部的降水比常年偏多，这和实况非常接近。从图 4 可以看出，2001 年夏季中国大部分地区温度接近常年或偏高，只是在华南部分地区和西南部分地区温度比常年偏低。模式预计东北大部、华北、黄淮、江淮和华南北部温度偏低，而华南南部、西南和西北的温度接近常年或偏高。

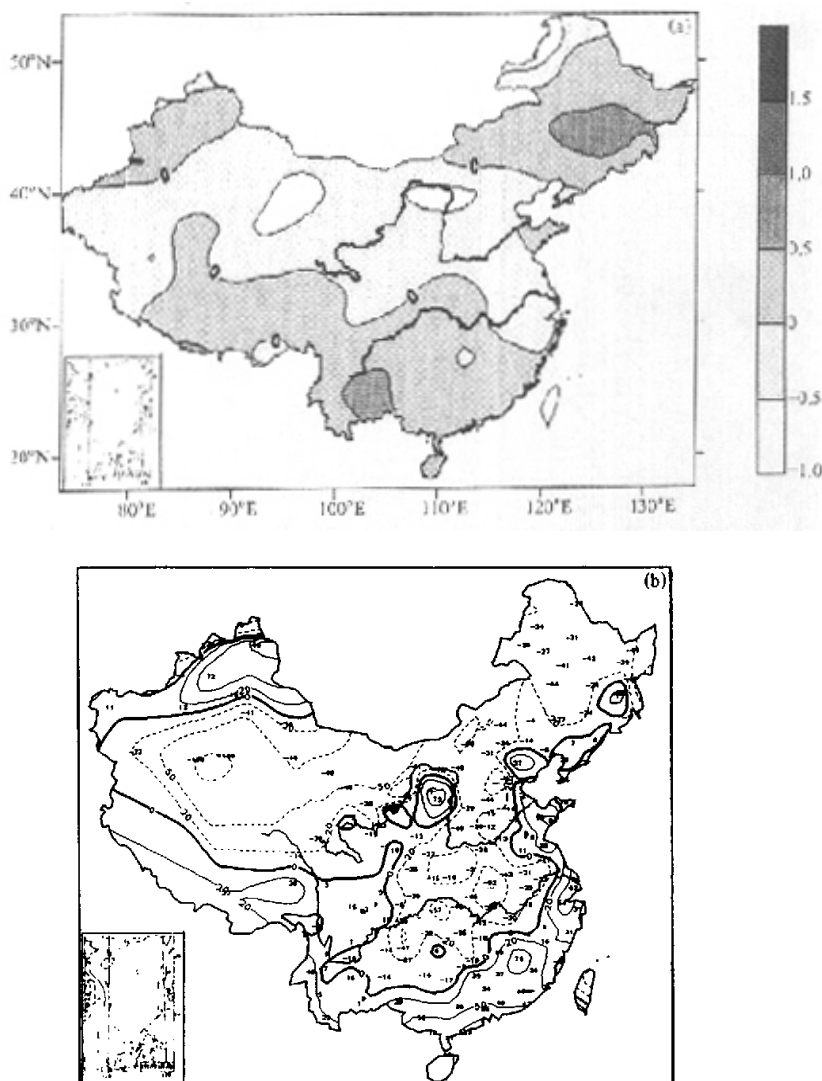


图 3 T63OGCM_NCC 预报的 2001 年 6~8 月降水距平 (a) 和实况 (b) 的对比

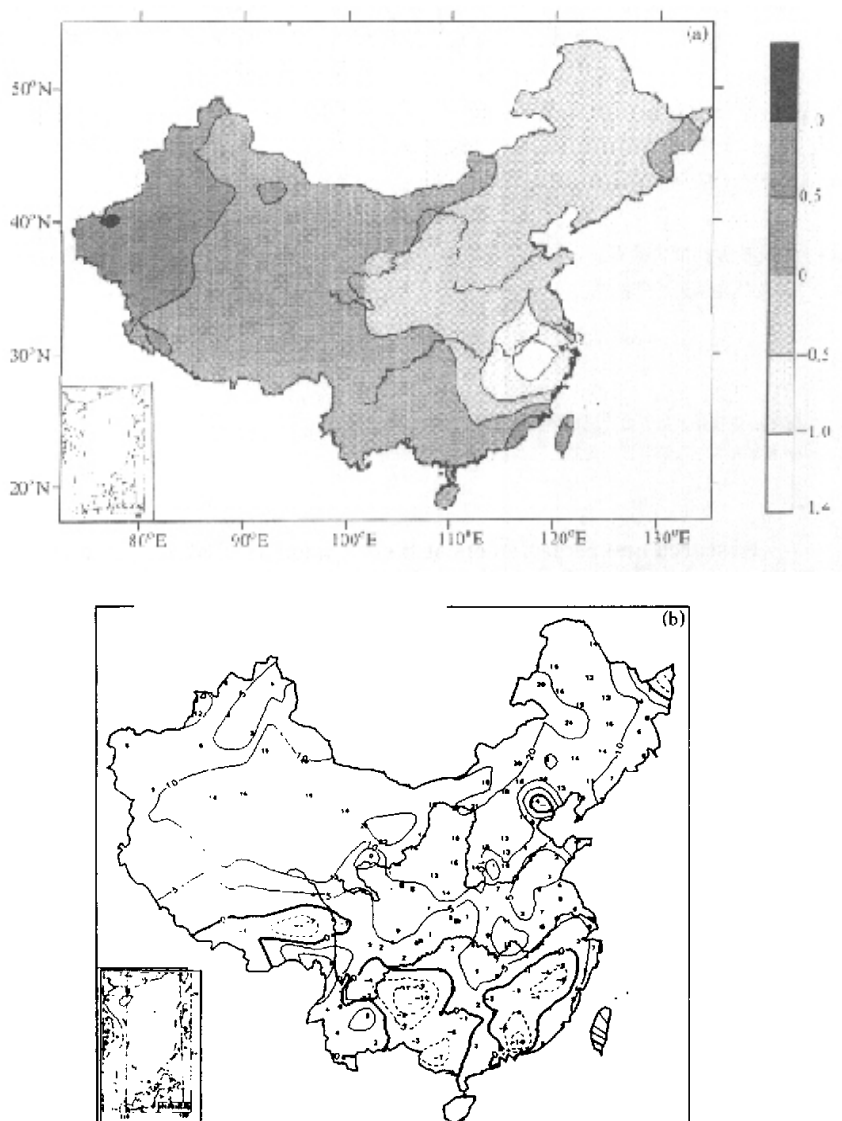


图4 T63OGCM_NCC 预报的 2001 年 6~8 月温度距平 (a) 和实况 (b) 的对比

4 展望

在“九五”国家重中之重科技项目“中国短期气候预测系统的研究”的资助下,通过近 5 年的科研攻关,在 2000 年底建立了一套由月动力延伸预报模式、海气耦合的全球气候模式 (AGCM+OGCM+海冰+高分辨率印度洋—太平洋海盆模式),区域气候模式

季和年际尺度的业务动力模式组成的系统。在国家气候中心的汛期和年度预报中应用,起到了一定的作用。初步把我国的短期气候预测水平由经验统计方法提高到定量和客观分析的水平上。在此基础上,已建成了一个具有物理基础的统计方法与气候动力模式相结合的综合气候预报系统。预计再用 3~5 年的时间,可以完全用于业务气候预报。该系统在进行足够长时间的试验运行和足够个例样本的预报检验后,将用于月、季节以及年际时间尺度的气候预测业务。

致谢: 本文所介绍的模式系统是“九五”科技攻关项目 96-908-02 的成果,我们谨向参与该项研究的所有人员表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 短期气候预测业务动力模式的研制,北京:气象出版社,2000.
- 2 98 中国大洪水与气候异常,北京:气象出版社,1999.

Research and Experiments of the Dynamical Model System for Short-Term Climate Prediction

Ding Yihui, Liu Yiming, Song Yongjia and Li Qinquan

(National Climate Center, Beijing 100081)

Abstract Climate and climate abnormality have important influence on the economical development. In order to improve the accuracy of the short-term climate prediction, it is important to study the new technology of dynamical model system for short-term climate prediction. Sponsored by the National Key Project “Studies on Short-Term Climate Prediction System in China”, after 5-year research, the dynamical operational model system has been developed and consists of monthly dynamical extended-range forecast model, coupled ocean-atmosphere model (AGCM + OGCM + sea ice model + high resolution Pacific-Indian Ocean circulation model) and regional climate model. It is primary that the short-term climate prediction is developed from experience statistical level to quantificational and objective level. A synthetical climate prediction system that has combined the statistical method based on physics with the climate dynamical model had been developed.

Key words: short-term climate; dynamical prediction; model system