

一个全球海-气耦合模式跨季度汛期预测能力的初步检验和评估

李清泉 丁汇 张培群

(国家气候中心, 北京 100081)

摘 要

文中利用一个全球大气-海洋耦合模式, 对中国汛期气候异常进行了 1991~2001 年共 11 a 的跨季度回报试验和检验研究。采用一套多指标的评估方法, 对该模式的预报性能进行系统的定量评估。结果表明, 该模式对中国汛期降水和温度及夏季北半球大尺度环流场等都有一定的跨季度预报能力。模式对中国不同区域夏季降水的预测能力有所不同。总的来说, 模式对中国东部和西部的降水趋势回报较好, 模式预报好于气候预报和持续性预报。从相关系数指标来看, 模式跨季度预测夏季温度的技巧在中国西部比中国东部高。

关键词: 耦合模式, 季节预测, 回报试验, 定量评估。

1 引 言

随着社会和经济的发展, 严重气候异常在世界各国造成的巨大经济损失已经越来越受到关注。一些国际组织积极地制定了专门的国际研究计划, 成立了相应的气候研究机构, 发展数值气候模式制作短期气候预报^[1, 2], 如欧洲中期预报中心(ECMWF)、国际气候研究院(IRI)和美国国家环境预报中心(NCEP)等。气候变率及其可预报性研究计划(CLIVAR)的一个重要目标之一是发展热带外地区的短期气候(季节至年际)预报。目前, 世界上许多国家业务气象中心和气候中心使用复杂的耦合模式(包含大气、海洋、陆面过程)进行季节时间尺度的气候预测^[3~6]。

中国位于东亚季风区, 季风的年际变化明显, 每年汛期(6~8月)旱涝灾害时有发生。因此, 夏季气候异常(包括降水和温度)的季到年际预测受到特别重视。早在 1988 年中国科学院大气物理所就开始利用 IAP 两层大气环流模式率先开展了跨季度数值气候预测, 随后又建立了 IAP 跨季度数值气候预测系统, 并成功地对中国夏季旱涝形势进行了较为

准确的预报^[7~13]。自 1996 年开始, 中国气象局国家气候中心利用 OSU/NCC 全球大气环流模式耦合全球海洋与海冰模式对中国汛期降水进行了实时预报和多年回报^[14~16]。近年来, 中国利用全球环流模式作汛期降水的季、跨季与年度预报有了较大进展。但以往的工作大都是利用全球大气环流模式或全球大气环流模式耦合太平洋海洋环流模式或较简单的全球海洋/海冰模式做季或跨季预测, 很少用复杂的全球海洋-大气耦合模式直接做短期气候预测。

九五期间, 在国家科技部重中之重项目我国短期气候预测系统研究的支持下, 国家气候中心与中国科学院、北京大学等单位合作, 研制了一个具有较高分辨率、较复杂物理过程的全球海-气耦合模式。该模式在国家气候中心的 IBM SP 计算机上连续积分 200 a 未出现明显的气候漂移现象, 并连续 4 a 参加了中国的汛期预报会商会和东亚夏季风季节预测研讨会^[17~18]。因此, 有必要对该模式进行较长时间的回报试验, 对模式的预报性能作出定量的评估, 给出该模式所作汛期预报的可靠性程度, 以利于在今后预报中使用。为此我们对该模式的季度和跨季度预报作了较长时段的计算、分析与研究。

初稿时间: 2003 年 1 月 8 日; 修改稿时间: 2004 年 5 月 6 日。

资助课题: 国家科技部九五加强课题(96-908-06-3)、国家自然科学基金重点项目(40231014)、中国气象局国家气象中心课题(ZK2002C-12)。

2 模式简介

本研究使用的全球大气-海洋耦合模式是由国家气候中心的全球大气环流模式(T63L16 AGCM-1.0)与中国科学院大气物理研究所的L30T63全球海洋环流模式通过日通量距平耦合方案在开洋面上逐日耦合而形成的,因此,将这个耦合模式称作CGCM-1.0。

2.1 大气部分

T63L16全球大气环流模式是九五期间,国家气候中心与中国科学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^[19-21]。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。模式的原始模型为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的1988年Cray机版本的中期预报模式^[22]。模式水平方向采用三角形截断,取63波(近似于 1.875×1.875),垂直方向分成16层(模式顶层约为25 hPa,模式底层约为996 hPa),采用 P -混合坐标(坐标)。时间步长为22.5 min。

在发展国家气候中心的短期气候预测模式的过程中,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,形成一个有完整物理过程的气候模式,利用这个模式可以进行季节尺度的气候预测或进行气候模拟研究。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。

T63L16 AGCM-1.0仍保留使用原中期预报模式的一些物理参数化方案。其中,辐射方案可参见文献[23, 24],对流方案是Kuo参数化方案^[25, 26],重力波拖曳参数化采用Palmer方案^[27]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。

2.2 海洋部分

L30T63全球海洋环流模式是中国科学院大气物理研究所(IAP)大气科学与地球流体力学国家重

点实验室(LASG)在九五期间研制完成的。它是在LASG原有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^[28, 29]。L30T63全球海洋模式的水平分辨率约为 1.875×1.875 ,垂直方向分30层,其中250 m以上分为10层,250~1000 m分10层,再往下至5600 m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 σ 坐标系统^[28]。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^[30, 31]。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,从动量过程中又进一步分离出温盐过程。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 min, 4 h 和 8 h。

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^[32]。模式海冰的消融是根据Parkinson和Washington^[33]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,这个海洋模式还采用了Gent和McWilliams发展的沿等密度面的混合方案^[34]。在 $30^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{S}$ 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^[35]的海洋上层垂直混合方案。此外,还采用了Rosati太阳短波辐射的参数化方案^[36],但根据模式需要,修改了有关参数。

2.3 耦合方案

全球大气环流模式T63L16 AGCM-1.0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-1.0^[37]。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。此外,在海冰

存在的高纬度地区没有耦合。

3 资料来源与回报试验方案

为系统性地检验模式的预报效果,我们对历史资料进行了回报试验和检验。所取年份为 1991~2001 年,由于模式复杂,模式计算受到计算机时的限制,本次回报试验采用单个预报的方法,初始场取为每年的 2 月 10 日 18 时(世界时),分别积分至 8 月 31 日。大气初始场的资料取自美国国家环境预报中心(NCEP)的再分析资料^[38],包括风、相对湿度、高度场和温度场。将这些资料插值到模式的网格点和层次上。其他物理量,如地温、地面湿度、雪盖、土壤水分含量等采用模式气候场插值到模式格点和预报起始时刻。海洋初始场采用海洋模式积分至准平衡态(取 1801 年 2 月)以及 Reynold 的 1991~2001 年 2 月周平均全球海表面温度资料^[39]插值到模式网格点上。

本研究着重分析模式对中国降水、温度预报和北半球 500 hPa 高度场、海表面温度异常预报效果。用于评估的观测降水和气温是国家气候中心的中国 160 个站月降水资料,500 hPa 高度场资料是 NCEP 再分析资料。用于计算各物理量距平的观测资料气候场是相应资料 1971~2000 年长期平均值,模式气候场是取 1991~2001 年 11 次回报中除预报当年以外的其他 10 次预测结果的平均值。为了方便与观测资料比较,我们把模式预报的各网格点上的降水和气温插值到中国 160 个观测站上。

4 评估方法

本文选用了 5 种指标对预测试验结果进行定量评估,即中国汛期预测业务预报评分(P)、相对于气候预报(距平为零的预报)的技巧评分、距平(距平百分率)符号一致率(R)、距平相关系数(ACC)和均方根误差技巧评分($RMSS$, 简记为 S_{RMSS})。

4.1 业务预报评分

$$P = \frac{N_0 + f_1}{N + f_1} \frac{n_1 + f_2}{n_1 + f_2} \frac{n_2}{n_2} \quad 100$$

其中, N_0 为预报与实况距平符号相同的站以及预报和实况虽距平符号不同但都属于正常级的站数, N 为参加评分的总站数; n_1, f_1 和 n_2, f_2 分别为一级异常预报和二级异常预报对的站数和权重系数。业务预报评分是国家气候中心气候诊断预测室常用的一种评分方法^[40]。

4.2 技巧评分

$$S = \frac{N_a - N}{N - N} \quad 100$$

技巧评分是相对于气候预报(距平为零的预报)距平符号报对的预报技巧分,反映了业务预测相对于无技巧预测距平符号报对的预报技巧。上式中 N_a 和 N 分别为预报准确的站数和参加评分的总站数; N 为气候预报准确的站数。技巧评分方法也是国家气候中心气候诊断预测室常用的一种评分方法^[40]。

4.3 同号率

$$R = \frac{N_i}{N} \quad 100$$

距平(距平百分率)符号一致率(简称同号率)是过去不少长期天气预报方法用来检验预报效果的一种方法,它是指预测与实况降水距平百分率符号相同或距平为零的格点数与评价区总格点数的百分比。上式中, N 为评价区域的格点, N_i 为预测与实况降水距平百分率符号相同或距平为零的格点数。

4.4 距平相关系数

距平相关系数(ACC , 简记为 C_{AC})是世界气象组织(WMO)于 1996 年 11 月在意大利召开第 11 届工作会议上确定并建议使用的指标^[41]。九五期间,我国短期气候预测系统的研究项目评估组确定,把距平相关系数预报评分和技巧评分一起列为中国短期气候预测水平评估参数。

$$C_{AC} = \frac{\sum_{i=1}^N (R_{f,i} - \overline{R_{f,i}}) (\overline{R_{0,i}} - R_{0,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (R_{f,i} - \overline{R_{f,i}})^2 \sum_{i=1}^N (\overline{R_{0,i}} - R_{0,i})^2}}$$

本文使用季节降水距平百分率和平均气温距平计算相关系数。式中 $R_{f,i}, \overline{R_{f,i}}$ 分别为第 i 个站点降水距平百分率(或平均气温距平)的预报值及多年平均值; $R_{0,i}, \overline{R_{0,i}}$ 为相应观测值, N 为评分总站数。距平相关系数主要反映距平量级特别是距平中心位置的预报水平。

4.5 均方根误差技巧评分

$$S_{RMSS} = (1 - \frac{S_f}{S_p}) \quad 100$$

均方根误差技巧评分方法是近年来 WMO 建议在季节预测中使用的评分方法^[42]。上式中, S_f 表示模式预报的均方根误差, S_p 代表持续性预报的均方根误差。只有当 $S_f < S_p$ 时才有预报技巧,此时

$S_{RMSS} > 0$ 。

上述 5 种评分方法从不同角度反映了预报技巧, 我们利用它们来综合考察 CGCM-1.0 的预测能力。在使用时, 首先考察距平(距平百分率)符号一致率(简称同号率), 只有当同号率大于 0.50, 降水的主要趋势能被反映出来时, 再考察强度预测才有意义。这时距平相关系数和均方根误差技巧评分为主要指标, 同号率、业务预报评分、技巧评分作为参考。

5 对 500 hPa 环流场预报的检验和评估

在检查降水和温度预报之前, 先让我们来看一看 500 hPa 环流形势的预报, 它直接影响或决定着地面要素场的预报。

图 1 是 CGCM-1.0 模式预报与观测的北半球热带外区域(30~87.5°N) 500 hPa 位势高度距平的相关系数(图 1a) 和均方根误差技巧评分(图 1b)。作为比较, 图 1 同时还给出了欧洲中心(ECMWF)、英国气象局(UK-Met-Off)、法国气象局(Meteo

France) 的 3 个模式 1991~1994 年 500 hPa 高度场的预报与观测距平的相关系数和均方根误差技巧评分^[43]。各模式预报均开始于 2 月的初始场, 这里给出了模式预报 4~6 个月的平均相关系数。可以看到, 11 a 中 CGCM-1.0 模式预报 500 hPa 高度场的相关系数为 -0.5~0.5, 11 a 平均约为 0.05。与 3 个国外模式相比, 1992 年, CGCM-1.0 模式预报比其他 3 个模式好; 1991 年, CGCM-1.0 模式预报不如其他 3 个模式; 1993 和 1994 年, CGCM-1.0 模式预报比法国气象局的模式预报好, 但较欧洲中心和英国气象局的模式预报差。

均方根误差技巧评分(S_{RMSS}) 是目前世界气象组织推荐的评估月、季、年际预报方法之一。采用这种方法可以更直观地比较模式的预测水平。从图 2 中也可看到, 在 11 a 回报中, CGCM-1.0 模式的 S_{RMSS} 均为正值, 11 a 平均技巧为 49.26, 有一定的预报指示意义。1991~1994 年, CGCM-1.0 模式的平均技巧为 41.92, 明显高于 3 个国外模式 4 a 的平均值(分别为 0.750, 0.5, -7.5)。

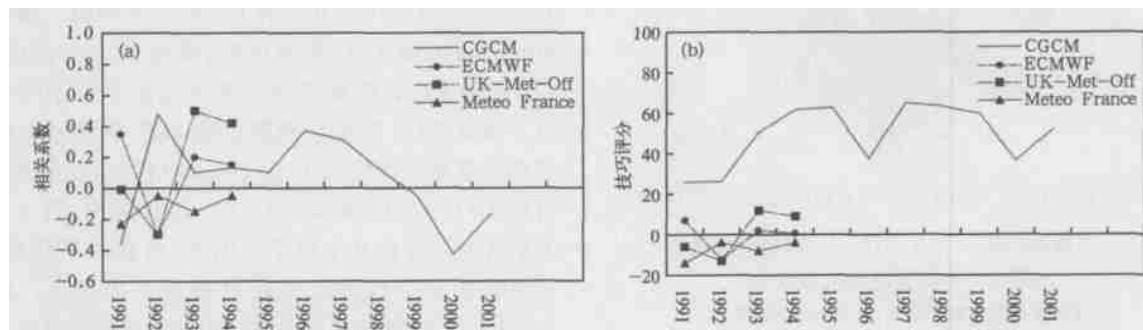


图 1 北半球热带外区域(30~87.5°N) 500 hPa 位势高度场回报与观测的距平相关系数(a) 和均方根误差技巧评分(b)

Fig. 1 C_{ACC} (a) and S_{RMSS} (b) between hindcast and observation of 500 hPa geopotential heights over Northern Hemispheric extra-tropics

从图 2 中也可以看到, 在欧洲和新西伯利亚地区、非洲至印度半岛以及印度洋和热带太平洋、美国东部及北大西洋的部分地区, CGCM-1.0 模式预报的 500 hPa 高度场与观测场的距平相关系数较高, 预报较好。

6 降水预报检验与评估

6.1 总体评估

汛期降水预报是中国短期气候预测的中心任务。为分析 CGCM-1.0 模式对中国各地区降水的预报准确率, 将模式对 1991~2001 年夏季全国 160

站的预测结果与同期的实况场作了相关分析(图 3)。从图 3 中可以看出, 预报准确率较高的地区是: 中国东北地区的北部(黑龙江和吉林), 内蒙古河套地区, 新疆中部, 黄河与长江中下游之间的部分地区至胶东半岛和辽东半岛, 以及西藏的东部和长江以南的部分地区(如湖南、江西、福建等地)。这些地区预报与观测的降水距平百分率相关系数较高, 中心值一般均能超过 90% 的信度检验。160 个站中有 93 个站的预报与观测的相关系数大于零, 约占 58.12%。

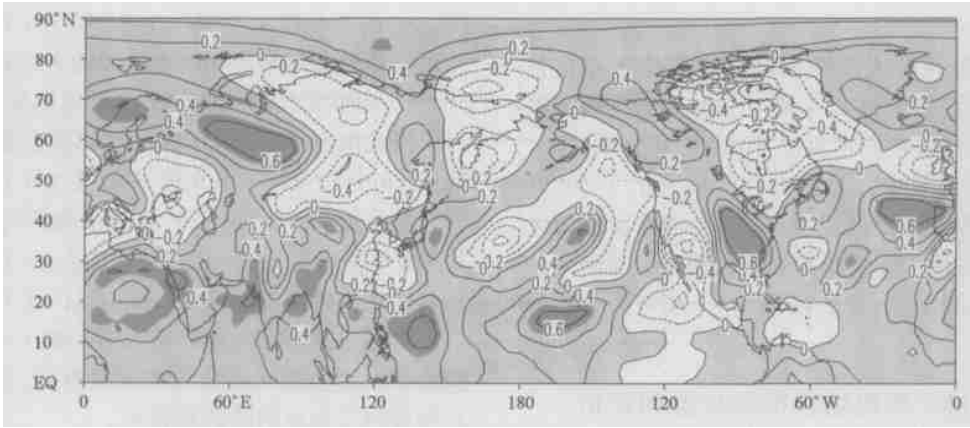


图2 CGCM-1.0 模式回报与观测夏季北半球 500 hPa 高度距平相关系数分布
(浅阴影区为正相关系数; 深阴影区为相关系数通过 90% 信度检验)

Fig. 2 Distribution of ACC between 500 hPa geopotential heights of CGCM hindcast and observation in summer (JJA). Light shadow indicates positives ACC. Dark shadow indicates ACC higher than 90% confidence level.

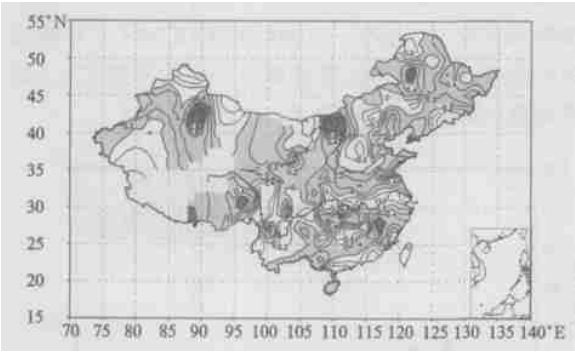


图3 中国 160 站 11 a 夏季(6~8 月)回报与观测的降水距平百分率相关系数
(浅阴影区为正相关系数; 深阴影区为相关系数通过 90% 信度检验区)

Fig. 3 Distribution of correlation coefficients between CGCM hindcast and observation of summer rainfall anomaly percentage over 160 stations of China during 1991-2001. Light shadow indicates positives ACC. Dark shadow indicates ACC higher than 90% confidence

从利用上述 5 种指标对 CGCM-1.0 模式 1991~2001 年跨季度预测夏季降水距平百分率的评估结果(图 4)可见,该模式跨季度预测中国夏季降水的距平符号一致率(R)为 40%~70%,平均为 51.93%,11 a 中同号率有 8 a 大于 50%。从均方根误差技巧评分可以更清楚地看到,均方根误差技巧评分(S_{RMSS})均大于零,模式预报的均方根误差明显小于持续预报的均方根误差,模式预报技巧高于持续

预报的技巧。该模式 11 a 平均均方根误差技巧评分是 49.45,11 a 中有 6 a 大于 50%。11 a 的业务预报评分(P)在 55~80 之间,平均为 68.03,11 a 中有 9 a P 评分大于 60,其中有 6 a 高于平均值。模式预报技巧评分除 1992 年为负值,其他 10 a 为正值,11 a 平均为 12,表明模式的总体预报水平高于气候预报。模式 11 a 预报与观测的降水距平百分率的平均相关系数(ACC)为 0.05,11 a 中有 9 a 正相关,2 a 负相关(1992 和 1994 年)。9 a 正相关中,有 3 a 在 0.1 以上,6 a 在 0.1 以下。因此,从相关系数来看,该模式的季节预报技巧还有待进一步提高。事实上,这是所有短期预测方法(包括动力气候模式和经验统计模型和方法)所共同面临的一个难题。

中国从 1958 年开始正式发布长期预报,正式组织汛期预报会商已经有 40 多年的历史^[40]。1995 年以前,汛期降水预报业务由中央气象台长期预报科承担。1995 年 1 月国家气候中心成立后,预报业务转到国家气候中心气候预测室(后改名为气候诊断预测室),称为气候预测。在九五期间,中国短期气候业务预测方法有了长足的发展,可概括分为经验和数理统计方法、以物理因子和前兆强信号为基础的物理概念模型方法及动力学方法 3 大类^[45]。陈桂英等^[40]对 1998 年 1 月以来投入业务运行的 7 种短期气候预测方法(旧版本的 IAP 2L 模式、OSU/SZ/ZW 模式、周期回归模型、汛期旱涝预报概念模型、地温热力学模型、典型相关法、物理量相似模型)进行了多年回报,并对汛期各预测方法 1985

~ 2000 年预测效果进行了检验和评估。为了与这些方法比较, 本文计算了 CGCM - 1.0 模式对 1991~ 2000 年回报试验的各项评估参数(图 5), 其他方法或模式是 1985~ 2000 年预报/ 回报评估平均结果^[40]。

需要指出的是, 本文引用的 IAP 2L 模式结果不是 1998 年以后用于实际预测的新版本 IAP 两层大气环流模式模式的结果, 而是旧版本 IAP 两层大气环流模式的结果^[7, 11], 因此以下简记为 IAP- 2L(OLD)。

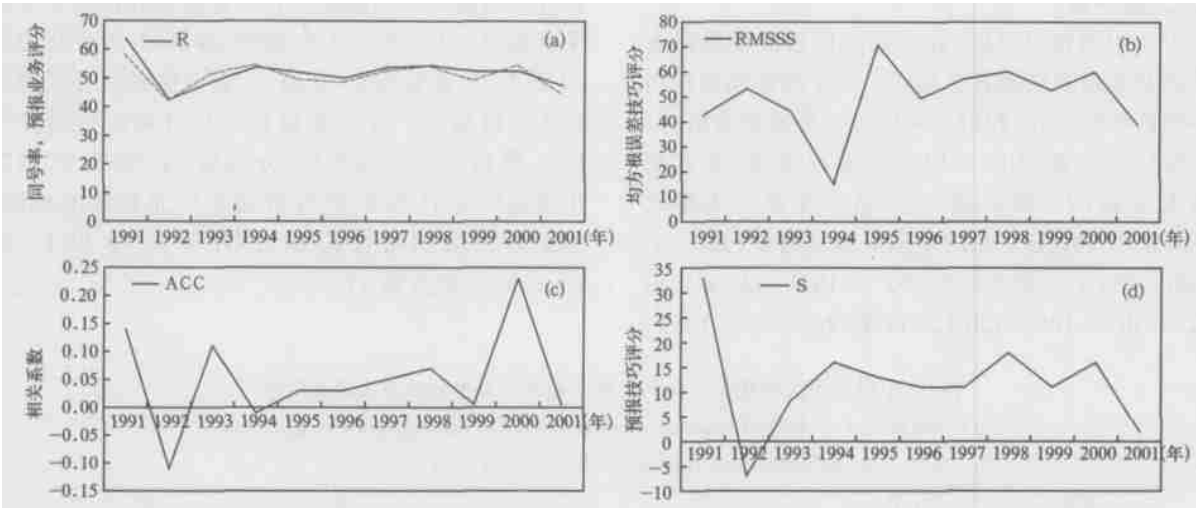


图 4 CGCM - 1.0 模式对 1991~ 2001 年中国夏季降水回报结果的评估参数曲线
(a. 同号率(实线), 预报业务评分(虚线); b. 均方根误差技巧评分; c. 相关系数; d. 预报技巧评分)
Fig. 4 Assessment on CGCM hindcast of summer rainfall anomaly percentage in China during 1991- 2001 sign hit rate (R) (a, solid), operational prediction score (P) (a, dashed line), root mean square score skill (SRMSS) (b), anomaly percentage correlation coefficient (CAC) (c), predictive skill score(S) (d)

图 5 表明, 在预测评分(P)中(图 5a), CGCM - 1.0 排名第一, 平均为 68.86, 略高于其他 8 种预测模型或方法。在 9 种预测方法的技巧评分中, CGCM- 1.0 平均分为 13, 仅次于旧版本的 IAP 两

层大气模式和地温热力学模式的技巧评分 14, 排名第 5。得分最高的是周期回归模型(平均值为 17), 其次是汛期旱涝预报概念模型和 OSU/ SZ 模式, 平均值分别为 16 和 15。CGCM_1.0 的距平相关系数

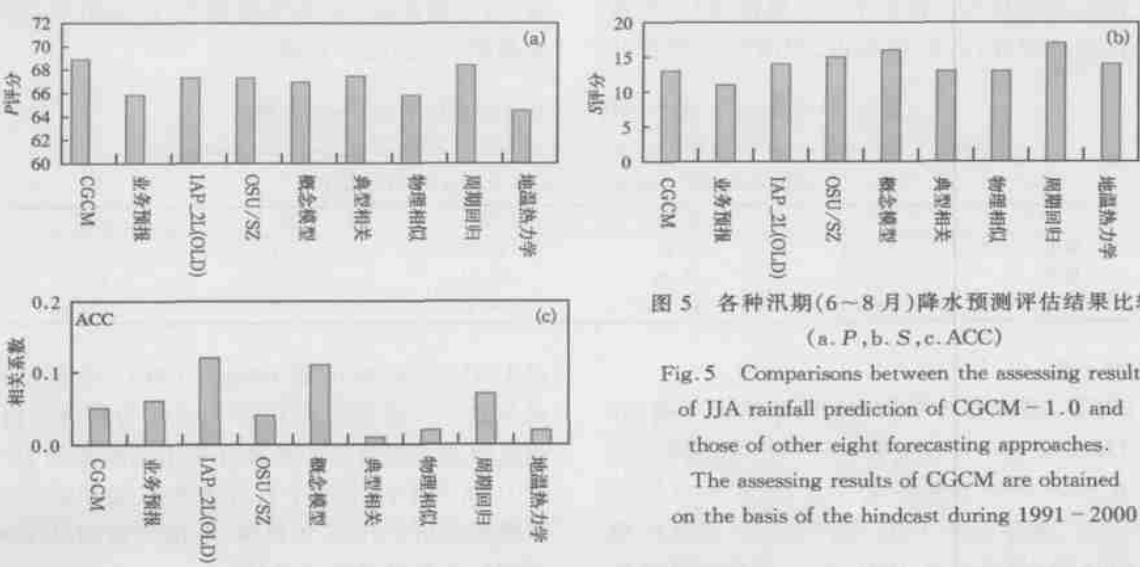


图 5 各种汛期(6~8 月)降水预测评估结果比较
(a. P, b. S, c. ACC)
Fig. 5 Comparisons between the assessing results of JJA rainfall prediction of CGCM-1.0 and those of other eight forecasting approaches. The assessing results of CGCM are obtained on the basis of the hindcast during 1991 - 2000

(ACC) 平均值为 0.05, 比 OSU/SZ 模式、典型相关法、物理量相似模型、地温热力学模式的相关系数好, 但比业务预报、IAP 2L(OLD) 模式、概念模型、周期回归模型的相关系数小。

6.2 分区评估

由于中国幅员辽阔, 在不同的区域夏季风降水的特征及其影响机制各不相同。为了考察预测技巧在不同区域的差异, 我们在对回报试验结果分析时, 将中国分为东部(105 E 以东的中国区域)和西部(105 E 以西的中国区域)。又进一步细分为东北(42 N 以北, 110 E 以东的中国区域)、河套(34~44 N, 100~110 E)、华北(34~42 N, 105~120 E)、华南(22~30 N, 100~120 E)、江淮(26~34 N, 105~

120 E) 5 个子区域。把模式格点上降水和温度插值到中国 160 个站站点上。

表 1 给出回报试验中, 模式预报的中国不同区域夏季(6~8 月)降水距平百分率与实测降水距平百分率的各项评估参数。各项指标对各区评估结果有差异, 但在 5 个子区域中, 各区的 P 评分均在 60 以上, R 评分均在 50 以上, 表明模式对各区降水趋势预报较好。业务预报技巧(P)和距平同号率(R)最高的是东北地区, 分别是 74.58 和 60.17。华南地区的 P 和 R 评分略高于华北和江淮地区。河套地区的预报也较好, P 评分在 70 以上(为 70.51), R 评分为 51.52。

表 1 中国不同区域夏季(6~8 月)降水距平百分率模式回报评估结果
Table 1 Assessment on GCM hindcast of summer rainfall anomaly percentage averaged in different sub-regions of China during 1991–2001

区域	P	R	S_{RMSS}	ACC	S
东部	67.22	52.80	50.36	0.01	14
东北	74.58	60.17	47.98	0.02	25
河套	70.51	51.52	59.93	0.17	12
华北	64.79	51.95	57.31	0.10	11
华南	67.79	53.36	52.85	0.01	16
江淮	65.12	50.48	32.82	0.02	12
西部	68.60	49.32	47.46	0.11	7

在 5 个子区域中, RMSS 和 ACC 最高的是河套, 其次是华北, ACC 均在 0.1 以上; 其他 3 个地区, 东北、华南、江淮的 ACC 较低为 0.01~0.02。因此, 模式对河套和华北的预报技巧要高于对东北、华南、江淮的预报技巧。相对于气候预报(距平为零的预报)的技巧评分, 各区均为正, 表明模式预报好

于气候预报。

此外, 从表 2 可以看到, 该模式在中国西部的预报技巧也不低, 虽然某些指标(距平同号率 R 、均方根误差技巧评分 RMSS 和预报技巧评分)比东部低, 但某些指标(业务预报技巧 P 和距平百分率相关系数 ACC)高于东部。

表 2 CGCM-1.0 模式 1991~2001 年温度距平预报评估参数
Table 2 Assessment on GCM predictions of summer averaged temperature anomalies in different sub-regions of China during 1991–2001

	P	S_{RMSS}	R	S	ACC
最低	37.50	0.49	34.38	-37	-0.32
最高	73.26	75.71	64.38	29	0.31
平均	55.45	50.23	48.47	-7	-0.08

6.3 预报个例

如上所述, 模式在各年的预报效果有所不同, 各种指标对模式在各年预报效果的评估结果不同。在图 4 中, R 和 P 的评分结果较一致: 模式预报最好年是 1991 年, 最差年是 1992 年; RMSS 评估的最好年是 1995 年, 最差年是 1994 年; S 评估的最好年

是 1991 年, 最差年是 1992 年; ACC 评估的最好年是 2000 年, 最差年是 1992 年。作为预报实例, 本文选取模式预报效果不是最好也不是最差的 1998 年, 对 1998 年的降水距平百分率实况场和预报场进行简单的分析。1998 年夏季, 全国大范围洪涝灾害曾受到社会各界的广泛关注。

图6是1998年汛期降水的实况和回报结果。由图可见,模式基本上预报出了1998年汛期中国大范围降水偏多的形势,例如黄河流域、长江及其以南地区和东北地区的洪涝,模式对内蒙、河套、新疆、西

藏等地区的降水趋势(旱、涝)预报得也较好。但是,模式对长江和黄河中、上游之间的部分地区的降水没有预报出来,模式预报东南沿海部分地区的降水偏多与观测相反。

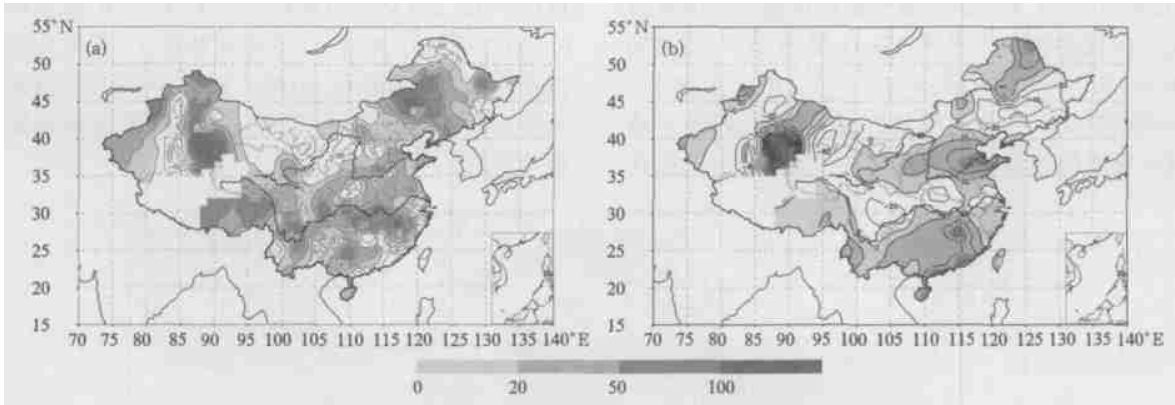


图6 1998年夏季(6~8月)中国降水距平百分率的实况(a)和回报(b)

Fig. 6 Observed (left) and hindcasted (right) summer rainfall anomaly percentages in 1998 (%)

7 温度预报检验和评估

季节预测的另一个重要气象要素场是气温。图7是CGCM-1.0模式跨季度回报夏季2 m气温距平与观测温度距平的相关系数。可见,模式回报温度距平在中国西部(新疆、西藏、青海、甘肃、宁夏、陕西、云南、贵州和广西等地)较好,相关系数的中心值

可达到和超过90%的信度检验。在160个站中,温度距平的模式回报与观测的相关系数大于零的站有73个,约占45.62%。从相关系数指标来看,该模式跨季度预测夏季温度距平的技巧在中国西部比中国东部好。

利用5种方法对CGCM-1.0模式回报1991~2001年夏季温度距平进行评估,其结果(表2)表明,P方法的夏季平均得分大于50,说明模式预报优于气候预报;RMSSS的平均值大于50,且RMSSS在11 a里均大于零(最低值为0.49),说明模式预报优于持续预报,模式有一定的预测水平。但是11 a平均模式预报的距平同号率(R)、技巧评分(S)和相关系数(ACC)较低,而且模式温度预报在某些年比较好,在某些年比较差。11 a中,P大于50的有7 a, RMSSS和R大于50的有6 a,说明模式对中国气温距平的预报有一定能力,但预报性能不够稳定。

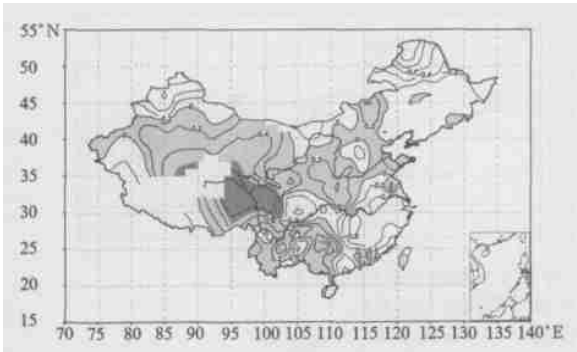


图7 中国160站11 a夏季(6~8月)回报与观测温度距平的相关系数

(浅阴影区为正相关系数,深阴影区为相关系数通过90%信度检验区)

Fig. 7 Distribution of correlation coefficients between CGCM hindcasted and observed summer temperature anomalies over 160 stations of China during 1991-2001. Light shadow indicates positives ACC. Dark shadow indicates ACC higher than 90% confidence

8 海表面温度预报评估

在影响大气环流和降水的外部强迫因子中,海表面温度异常(SSTA),尤其是热带太平洋海表面温度异常(SSTA),是最受关注的。海气耦合模式的一个特点是模式自身通过内部的大气-海洋相互作用的物理过程计算出每一时间步的海表面温度和海表面温度异常(SSTA)。模式海温预报情况也直接关系到大气环流及其他要素的预报。因此,在这里有

必要检查 CGCM- 1.0 模式对海表面温度异常的回报情况。

从图 8 中可以看到, 模式回报海表面温度距平与观测值的相关系数在热带太平洋比较高, 在印度洋、北大西洋、北太平洋的部分地区比较好。图 9 给出模式回报的热带太平洋 Nino3 区(5°N~5°S, 150°~90°W)和 Nino 3, 4 区(5°N~5°S, 170°~90°W)平均海表面温度距平与观测值的相关系数, 以及持续预报与观测值的相关系数。由图 9 可见, 由于存在

春季预报障碍, 模式自 1991~2001 年 2 月 10 日起始, 超前 2 个月预报当年 4 月 SSTA 的预报技巧较低, 其后有所上升, 但模式超前 1~6 个月预报 Nino3 区 SSTA 的技巧为 0.2~0.6(平均为 0.38)、预报 Nino 3, 4 区 SSTA 的技巧为 0.2~0.8(平均为 0.53)。虽然 CGCM- 1.0 模式超前 1~3 个月的预报技巧不如持续预报, 但模式超前 4~6 月的预报技巧明显高于持续预报(表 3), 这对跨季度预报是非常重要的。

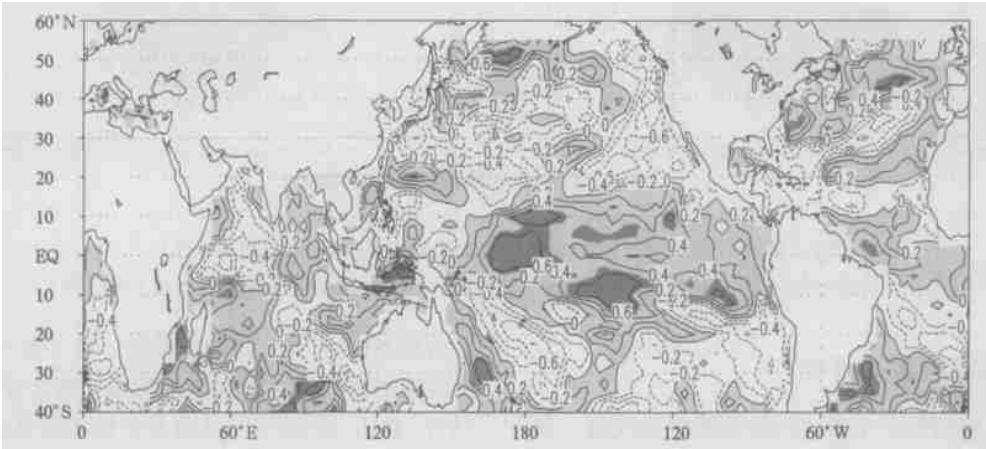


图 8 模式回报的海表面温度距平与观测值的相关系数
(浅阴影区为正相关系数, 深阴影区为相关系数通过 90% 信度检验区)
Fig. 8 Distribution of correlation coefficients between CGCM hindcast and observed sea surface temperature anomalies

(Light shadow indicates positives ACC. Dark shadow indicates ACC higher than 90% confidence)

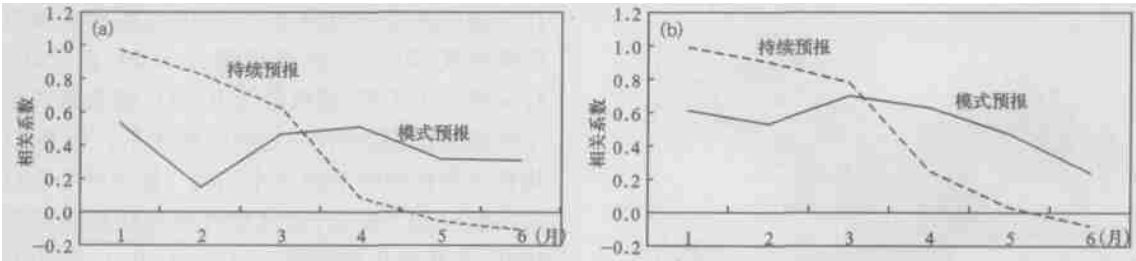


图 9 模式超前 1~6 个月对热带太平洋区域平均海表面温度距平
(a. Nino3 区, b. Nino3, 4 区)的回报与观测的相关系数

Fig. 9 Correlation coefficients between CGCM 1-6 month lead hindcast and observation of regional averaged SSTA over the tropical Pacific Ocean
(a. Nino3, b. Nino3, 4)

表 3 模式超前 1~6 个月回报热带太平洋海表面温度距平的平均技巧值

	Nino3		Nino3, 4	
	1~3 月		4~6 月	
CGCM	0.38	0.38	0.61	0.45
持续预报	0.80	-0.03	0.89	0.07

9 结论与讨论

本文利用一套多指标的预报评分方法, 通过 1991~2001 年的 11 a 个例回报试验, 对全球海-气耦合模式 CGCM- 1.0 的季度预测性能进行初步检验和定量评估。主要结论如下:

(1) 模式对中国汛期降水有一定的跨季度预测

能力, 其预测结果对中国汛期气候预测有一定的参考价值。11 a 预报与观测的降水距平百分率相关分析表明, 160 个站中有 93 个站, 预报与观测的相关系数大于零, 约占 58.12%, 相关系数中心值一般均能超过 90% 的信度检验。1991~2001 年, 该模式跨季度预测中国夏季降水的距平符号一致率为 40%~70%, 平均为 51.93%; 均方根误差技巧评分 RMSSS 均大于零, 平均为 49.45, 模式预报技巧高于持续预报的技巧; 11 a 业务预报评分为 55~80, 平均为 68.03。模式预报技巧评分表明模式的总体预报水平高于气候预报。该模式 1991~2000 年的预报与其他 8 种短期气候预测方法(气候中心业务预报、旧版本的 IAP 2L 模式、OSU/SZ/ZW 模式、周期回归模型、汛期旱涝预报概念模型、地温热力学模型、典型相关法、物理量相似模型) 1985~2000 年预报相比较, CGCM-1.0 模式的业务评分(P) 排名第 1, 技巧评分排名第 5, 距平相关系数(ACC) 排名第 4。

(2) 模式对中国不同区域夏季降水的跨季度预测能力有所不同。总的来说, 模式对中国东部(包括 5 个子区域) 和中国西部的降水趋势预报较好, 模式预报好于气候预报和持续预报; 各区域技巧评分大于零, 业务预报技巧(P) 评分大于 60。在中国东部的五个子区域中, 东北地区的业务预报技巧(P) 和距平同号率(R) 最高, 华南地区的 P 和 R 评分略高于华北和江淮地区; 河套地区的 RMSSS 和 ACC 评分最高, 其次是华北。从 ACC 来看, 模式对河套和华北的预报技巧要高于对东北、华南、江淮的预报技巧。值得指出的是, 该模式在中国西部的也有较高的预报技巧。

(3) 从相关系数指标来看, 模式跨季度预测夏季温度的技巧在中国西部比中国东部高。模式预报温度在中国西部的新疆、西藏、青海、甘肃、宁夏、陕西、云南、贵州和广西等地较好, 其中相关系数的中心值可达到和超过 90% 的信度检验。评估结果表明模式预报优于气候预报和持续预报, 模式对中国气温有一定的预报能力。

(4) 模式对夏季北半球大尺度环流场有一定的预测能力。CGCM-1.0 模式预报 500 hPa 高度场

的均方根误差技巧评分(RMSSS) 11 a 平均技巧为 49.26, 11 a 的 RMSSS 均为正值。因此, 有一定的预报指示意义。

(5) 模式预报热带太平洋海表面温度受到春季障碍的影响, 模式超前 1~6 个月预报热带太平洋海表面温度距平的技巧为 0.2~0.8。

从全球海气耦合模式 CGCM-1.0 在 1991~2001 年的回报试验和结果分析中可以看到, 该模式对中国夏季气候异常有一定的跨季度预测能力, 但模式的预报技巧还有待进一步提高。在选定气候模式的前提下, 改善模式短期气候预测水平应该从初始场(同化系统)、模式预报结果误差订正和集合预报方法等方面来考虑。增加和改善模式预报初始场的信息, 特别是海洋和地表要素的初始场, 有利于提高模式预报技巧。国家气象中心已有一个与大气模式匹配的大气资料同化系统和一个与海洋模式匹配的海洋资料同化系统。大气和海洋资料同化系统, 将有利提高海气耦合模式的预报效果。此外, 采用集合预报和统计方法订正数值预报结果有助于提高模式预报效果。因此, 在这些方面还有许多工作需要做。由于国家气候中心的全球海-气耦合模式预报业务系统正处在建设和不断改进之中, 这里给出的只是初步的回报试验结果, 预测个例有限, 但这项工作有利于预测系统的发展和改进。

本文使用了 5 种评分指标, 各种评分指标所反映的预测水平应当是一致的。但是, 由于不同评分方法的侧重点不同, 5 种方法的评分结果略有差别。例如, 同号率反映了预报趋势, 但不能反映异常预报强度。预报评分立足于对大范围距平趋势预测能力的评估, 不适宜于对不同区域的比较^[40]。此外, 当样本量不足够大时, 各种指标对预测水平的评估结果也会所差异。因此, 采用哪一指标、如何利用这些指标综合衡量评估结果, 还有待进一步讨论。

致谢: 感谢李维京研究员对本工作的关心和支持; 感谢张学洪研究员、俞永强博士、董敏研究员、叶正青、高波在模式发展过程中所做的贡献; 感谢徐影博士、高学杰博士、宋永加、党鸿雁、魏敏等人的与作者共同讨论模式运行和调试过程中的一些问题; 感谢陈桂英老师和许力提供了气候中心预测评分方法的源程序以及 1985~2000 年的预测评分结果; 李清泉特别要感谢赵宗慈研究员和赵其庚研究员的宝贵建议。

参考文献

- 1 赵宗慈, 李清泉, 张祖强等. 20 世纪 90 年代简单海气耦合动力学年际预测模式研究. 气象学报, 2000, 58(增刊): 769~777

- 2 李清泉, 赵宗慈, 张祖强等. 简化海气耦合模式系统对 1997—1999 年 El Nino/La Nina 事件预报. 气象学报, 2000, 58(增刊): 838~847
- 3 Stockdale, T N, Anderson D L T, Alves J O S et al. Global seasonal rainfall forecasts using a coupled ocean-atmosphere model. *Nature*, 1998, 392: 270~373
- 4 Mason, S J, Goddard L, Graham N E et al. The IRI seasonal climate prediction system and the 1997/98 El Nino event. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80: 1853~1873
- 5 Kanamitsu M, Kumar A, Juang H M et al. NCEP dynamical seasonal forecast system 2000. *Bull Amer Meteor Soc*, 2002, 83: 1019~1037
- 6 Alves O, Wang G, Zhong A et al. POAMA: Bureau of Meteorology operational coupled model seasonal forecast system. *Proceedings of the ECMWF Workshop on the Role of the Upper Ocean in Medium and Extended Range Forecasting*, 2002
- 7 曾庆存, 袁重光, 王万秋等. 跨季度气候距平预测试验. 大气科学, 1990, 14(1): 10~25
- 8 李旭. 短期气候异常的数值模拟与预测研究: [博士论文]. 北京: 中科院大气物理所, 1992, 136pp
- 9 袁重光, 李旭, 曾庆存. 跨季度气候距平数值预测研究小结. 气候与环境研究, 1996, 1(2): 150~159
- 10 Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Li Xu, et al. Seasonal and extra-seasonal predictions of summer monsoon precipitation by GCMs. *Advances Atmospheric Sciences*, 1997, 14(2): 163~176
- 11 林朝晖, 李旭, 赵彦等. 中国科学院大气物理所短期气候预测系统(IAP PSSCA)的改进及其对 1998 全国旱涝形势的预测. 气候与环境研究, 1998, 3(4): 339~348
- 12 林朝晖, 赵彦, 周广庆等. 1999 年中国夏季气候的预测和检验. 气候与环境研究, 2000, 5(2): 97~108
- 13 林朝晖, 赵彦, 周广庆等. 2000 年中国夏季降水异常的数值预测. 自然科学进展, 2002, 12(7): 771~774
- 14 高学杰, 赵宗慈. 北半球和中国气候的模拟机 1996 年汛期预测的试验及检验. 应用气象学报, 1997, 8(增刊): 145~153
- 15 高学杰, 赵宗慈. 利用全球环流模式进行我国汛期短期气候预测的试验. 应用气象学报, 1999, 10(4): 462~469
- 16 Gao Xuejie, Zhao Zongci. Experiments of short-term climate prediction by the OSU/NCC GCM for summer season in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 14(3): 280~291
- 17 Li Qingquan, Zhao Zongci. Extra-seasonal predictions of summer rainfall in China and ENSO in 2001 by climate models. *Acta meteorologica Sinica*, 2002, 16(4): 519~532
- 18 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
- 19 董敏, 陈嘉滨, 季仲贞等. 季节预测大气模式研制和应用进展. 见: 项目办公室, 项目专家组编. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 2000. 63~69
- 20 叶正青, 董敏, 陈嘉滨. 国家气候中心模式在实际海温条件下模拟的气候. 见: 项目办公室, 项目专家组编. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 2000. 70~78
- 21 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
- 22 国家气象中心. 资料同化和中期数值预报. 北京: 气象出版社, 1991. pp436
- 23 Geleyn J-F, Hollingsworth A. An economical analytical method for the computation of the interaction between scattering and line absorption of radiation. *Beitr Phys Atmos*, 1979, 52: 1~16
- 24 Ritter B. The impact of an alternative treatment of infrared radiation on the performance of the ECMWF forecast model. *IRS-84: Current Problems in Atmospheric Radiation*. Fiocco G, Ed. A. Deepal, 1984. 277~280
- 25 Kuo H L. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *J Atmos Sci*, 1965, 22: 40~63
- 26 Kuo H L. Further studies of the parameterization of the influence cumulus convection of large-scale flow. *J Atmos Sci*, 1974, 31: 1232~1240
- 27 Palmer T N, Shutts G J, Swinbank R. Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1986, 112: 1001~1039
- 28 Jin Xiangze, Zhang Xuehong, Zhou Tianjun. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model. *Adv Atmos Sci*, 1999, 16(2): 197~215
- 29 金向泽, 俞永强, 张学洪等. L30T63 海洋模式模拟的热盐环和风生环流. 见: 项目办公室, 项目专家组编. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 2000. 170~182
- 30 Bryan K, Cox M D. An approximate equation of state for numerical models of ocean circulation. *J Phys Oceanogr*, 1972, 2: 510~514
- 31 UNESCO. Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. UNESCO technological Paper in Marine Science. No. 36, Paris. 1981
- 32 Haney R L. Surface thermal boundary condition for ocean circulation models. *J Phys Oceanogr*, 1971, 1: 241~248
- 33 Parkinson C L, Washington W M. A large-scale numerical model of sea ice. *J Geophys Res*, 1979, 84: 311~337
- 34 Gent P R, McWilliams J C. Isopycnal mixing in ocean circulation models. *J Phys Oceanogr*, 1990, 1: 241~248
- 35 Pakanowski R C, Philander G. Parameterization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean. *J Phys Oceanogr*, 1981, 11: 1442~1451
- 36 Rosati A, Miyakoda K. A general circulation model for upper ocean circulation. *J Phys Oceanogr*, 1988, 18: 1601~1626

- 37 俞永强等. 海气通量距平耦合方案. 见: 项目办公室, 项目专家组编. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 2000. 201~207
- 38 Kalnay E, et al. The NCEP/NCAR 40- year reanalysis project. Bull Amer Meter. Soc, 1996, 77(3): 437~ 471
- 39 Reynolds R W, Smith T M. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. J Climate, 1994, 7: 929~ 948
- 40 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. 见: 项目办公室, 项目专家组编. 短期气候监测、预测、服务综合业务系统的研制. 北京: 气象出版社, 2000. 3~ 12
- 41 WMO. The eleventh WMO working group session, Italy, 1996
- 42 WMO. Abridged final report with resolutions and recommendations. Secretariat of the WMO, Geneva, Switzerland, WMO- No. 893, 1999, 154 ~ 157
- 43 Ferrant T. Exchange of Long- range Verification Scores, Commission for Basic Systems Meeting Of Expert Team To Develop a verification System for Long- range Forecasts, Montreal, Canada, 22- 26 April 2002. WMO, BS/ET/DVSLRF/Doc.3 (7), 25. III.
- 44 李小泉, 李维京. 500 hPa 平均环流形势月预报水平的评估. 应用气象学报, 1993, 4(增刊): 69~ 75
- 45 陈兴芳, 赵振国. 中国汛期降水预测研究及应用. 北京: 气象出版社, 2000. 241pp

PRIMARY VERIFICATION AND ASSESSMENT ON THE EXTRA-SEASONALLY PREDICTIVE CAPABILITY OF A GLOBAL ATMOSPHERIC-OCEANIC COUPLED MODEL IN RAINING SEASON

Li Qingquan Ding Yihui Zhang Peiqun

(National Climate Center, Beijing 100081)

Abstract

In the present paper, extra- seasonal hindcast experiments and verifications of climate anomalies in China during the raining seasons of 1991- 2001 (totally 11 years) were conducted based on a global atmospheric- oceanic coupled model. A set of indexes characterizing different predictive skills was utilized to assess systematically and quantitatively the predictive performance of the model. The model verification has indicated that the model has certain capability in predicting seasonally rainfall and temperature over China as well as the large-scale circulation in the North Hemisphere in summer time. The model prediction is better than climatological prediction and persistence prediction. The model performance of summer rainfall prediction varies in different regions of China. In general, the prediction of rainfall tendency in both East China and West China are reasonable. In view of anomaly correlation coefficient, the model skill in seasonal prediction of the summer temperature are relatively higher in West China than in East China.

Key words: Coupled model, Seasonal prediction, Hindcast experiments, Quantitatively assessment.