

我国近年来短期气候预测研究 的若干进展*

P46 A

王会军 周广庆 林朝晖

(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实验室, 北京 100029)

摘要 回顾了近年来我国短期气候预测研究的若干进展, 主要是在中国科学院大气物理研究所完成的以气候模式为基础的短期气候预测方面工作。第一个基于气候数值模式开展短期气候预测试验的是曾庆存等人, 他们所采用的是 IAP AGCM 耦合一个热带太平洋环流模式 (OGCM); 1997 年, 基于耦合气候模式基础上的 ENSO 预测系统建立起来; 同时开展了东亚区气候可预测性研究; 利用气候变动的准两年信号提出了对模式预测结果进行有效修正的方案; 为了考虑初始土壤湿度异常对夏季气候的影响, 建立了气象变量和土壤湿度的经验关系; 还系统地研究了 1998 年海面温度异常和大气春季异常对夏季气候 (特别是发生于中国的大水) 预测的影响。

关键词: 短期气候预测; 气候模式; 进展

1 海气耦合模式的 ENSO 循环预测研究

1.1 海气耦合模式的设计及气候数值模拟研究

利用大气物理研究所 (IAP) 两层大气环流模式 (IAP AGCM-I.2) 和较高分辨率热带太平洋环流模式 (IAP TOGCM-II) 建立了主要用于年际气候变率模拟和预测的 IAP 热带太平洋和全球大气耦合环流模式 (IAP TOGA)。针对 IAP 两层大气环流模式和较高分辨率的热带太平洋环流模式特点, 设计了一个有效的同步耦合方案, 实现了两个环流模式的耦合。

该耦合方案有如下特点:

(1) 海表通量的“统计修正”技术。利用统计预报原理, 建立了模式预报量与耦合变量之间的统计关系:

$$F_C = a(x, y) + b(x, y)F_A,$$

其中, F_C 为耦合变量, F_A 为模式输出变量 (如海表风、温、压、湿、短波辐射、云等), a 、 b 为修正系数, 它们是模式水平格点函数。因此根据模式在不同格点的误差, 对其修正是不同的。数值试验表明, 这种方法极其有效地消除了海表通量计算的系统误差。

(2) 整体修正。对耦合变量的修正是以其年平均量作为参考的, 即修正后耦合变量

2002-04-28 收到

* 国家杰出青年基金项目 40125014 及中国科学院知识创新工程重要方向性项目 KZCX2-203 共同资助

的年平均误差最小, 其季节变化的时间位相仍由模式自身决定(修正系数不随时间而改变)。这样在充分有效控制“气候漂移”的前提下, 最大限度地保持各分量模式的本身固有特性, 有利于气候变化的模拟。

(3) 更合理的海表热通量计算方案。耦合方案充分考虑了海气之间热通量的反馈过程, 对海洋环流模式(OGCM)中普遍使用的 Hancy 型热通量计算方案进行了改进, 采用了更适合于海气耦合的计算方案, 使海气之间热交换过程更为合理。

(4) 单向修正、同步耦合。只对大气模式进行修正, 对海洋模式未做任何修正。两个分量模式每天交换一次通量, 海表通量中保留了包括天气尺度的变化, 有利于模拟季节内振荡到年际时间尺度的变化。

利用设计的耦合方案, 耦合模式已稳定积分 130 年(后 30 年为日平均输出), 没有发生“气候漂移”现象, 模拟的年平均量及其季节变化与各分量模式在观测外强迫作用下的模拟结果非常一致。同时模拟出了与观测研究相当一致的年际气候变率, 即类 ENSO 现象:

(1) 热带太平洋的最大年际气候变率(海洋部分)并非发生在海洋表面, 而是在次表层的斜温层(温跃层)。在西太平洋, 它出现在 150~200 m 深度的赤道两侧, 而在东太平洋则出现在大约 50 m 深的赤道上, 并且自西向东沿斜温层抬升。在海洋表面, 年际气候变率的强度为 1.5°C , 与国际同类模式的结果相当。

(2) 赤道太平洋海表温度异常与西太平洋暖池次表层温度异常具有极好的反位相。每当赤道东太平洋出现海温正(负)距平前半年到一年, 在西太平洋暖池次表层即有正(负)距平出现, 而这种次表层的海温正(负)距平的东传, 对最终引发赤道东太平洋海表温度正(负)距平起到了决定性作用; 而当西太平洋次表层的正(负)距平传播到东太平洋后, 在西太平洋暖池次表层则出现负(正)距平。

(3) 进一步分析表明, 在赤道上, 年际变率沿斜温层自西向东传播, 在赤道太平洋东海岸反射后, 在赤道两侧则自东向西传播, 从而构成了循环往复过程。完成这一过程的周期为 3~5 年, 这与实际 ENSO 循环的周期是一致的。

(4) 海洋与大气存在紧密的耦合时空结构与演变关系。赤道东太平洋海温正距平对应大气低层西风异常、高层东风异常, 同时伴有正降水距平; 对海温负距平, 情况相反。

上述模拟结果已为海洋再分析资料所证实。目前该耦合环流模式已用于气候预测、冬季风对 ENSO 的作用等研究。

1.2 IAP ENSO 预测系统

利用上述耦合环流模式, 建立了 IAP ENSO 预测系统。该系统是我国目前惟一的基于复杂耦合模式的 El Niño 预测系统。

(1) “气候异常”初始化方案。针对气候预测的特点, 在保留模式气候(与观测很接近, 但有误差)的基础上, 在预测初值中引入实际的气候变化位相, 使得预测初始场既与耦合模式相协调, 又包含预测所需的气候异常信息, 有效降低了初值的不协调对预测的干扰(Initial Shock), 有利于提高预测技巧。连续 16 年初始化结果表明, 初值海温与实测结果相当一致, 在 Niño3 区二者相关系数达到 0.91。

(2) 系统性预测试验及评估。从 1981 年 11 月~1997 年 12 月, 每月一个初值, 进

行了连续时效为 24 个月的气候预测试验。对预报结果（主要为海温）的统计评估表明，模式对时效 3~18 个月的预测具有相当的预报能力，Niño3 区预报技巧（与观测的相关）在 0.52 之上。与 NCEP 业务化的耦合环流模式预测系统（CMP10、CMP12）相比，他们的模式在年际（一年以上）预测上表现出较强的预报能力。在季度到一年的预报上，与 CMP12 还有差距，但与其前一个版本 CMP10 相当（NCEP 的预测系统在模式分辨率上远高于 IAP 的模式，同时 NCEP 预测系统具有完整的海洋资料同化系统）。

预报技巧具有季节依赖性。从春季到秋初开始的预报较好，高于 0.5 的技巧均可维持 15 个月以上，其中从 7 月到 9 月开始的预报，其高于 0.6 的相关技巧可达 16 个月；而从秋末和冬季开始的预报，其技巧衰减较快，预报 5 个月后就降到了 0.5 以下。但是从 3 月份开始的预报，其预报技巧在 3 个月后就超过了持续性，而且技巧高于 0.6 的预报可达 8 个月，这对我国夏季旱涝趋势预测有着重要现实意义。

(3) ENSO 实时预测。从 1997 年底开始，每年进行实时海温预测，并参加由中国气象局、国家海洋环境预报中心等业务部门组织的预测会商，IAP ENSO 预测系统的预测结果是其业务预测的重要参考。同时预测结果提供 IAP 短期气候预测系统，用于我国夏季旱涝趋势预测，从 1998 年到 2001 年均取得良好效果。

1.3 全球海洋资料同化系统

基于变分最优插值原理，设计建立了一个全球海洋资料同化分析系统，该系统是我国第一个（目前也是惟一的）可业务使用的海洋资料同化系统。

该系统采用 IAP 设计发展的 30 层全球大洋环流模式，利用二维空间变分和时间窗口方法，可对全球任何海洋区域进行同化分析。考虑到海温的空间分布特征，同化方案中的背景误差协方差矩阵采用了水平各向异性。在技术上，由于同化分析一般需要占用巨大计算机资源，因此在该同化系统中采用了替代技术，这样可以大大降低计算机内存资源的占用，在计算机资源不是很充分的条件下仍可顺利运行。

目前已有连续 11 年（1982~1992 年）太平洋海区同化产品，同化资料可补充海洋观测资料的不足，也可为短期气候预测提供海洋初值。

有关研究论文可参见文献[1~4]。

2 东亚区夏季气候可预测性研究

第一个基于海气耦合模式基础上的短期气候预测试验是由曾庆存等人^[5]完成的。之后，开展了一系列的回报试验和实时气候预测试验^[6~8]。实时预测的模式积分一般从 2 月份开始，预测结果包括降水等变量。最初的预报中，海温采用初始海温异常延续的方式来给定月平均海温，即用持续性预报的海温来预报大气，这种方式在有些年份是比较成功的，因为，海温的持续性比较好，有时可以达到 5~6 个月。近年来，随着 IAP 的 ENSO 预报系统的建立，开始采用“两步法”来预测大气部分的异常，即，先用 ENSO 预测系统来预报海温，再用大气环流模式（AGCM）来预测大气。这个方法似乎效果更好一些^[9]。

此外，还利用给定观测海面温度异常（SSTA）来运行 AGCM 的方式研究 AGCM

的预测效能, 即, 气候的可预测性问题。这些研究揭示了东亚区域夏季气候异常的可预测度在江南区域和我国东部沿海区域较高, 而在其他区域则基本较低。评估这种 SSTA 引起的可预测性通常都是用“信噪比”的方法, 即 SSTA 引起的信号与不确定性的比值^[10~12]。

利用 IAP AGCM (海面温度 (SST) 为上述 ENSO 预测系统的预测结果) 和日本东京大学气候系统研究中心 (CCSR) 的 AGCM (分辨率为 T42L20, SST 为实测月平均结果) 分别进行的实时和回报试验的 1998 年夏季降水距平的分布表明 (图略), 两个模式都大致合理地给出了包括长江流域多雨在内的夏季气候异常特征。利用 CCSR 的 AGCM 进行的一系列试验, 还说明了大气在春季的异常对夏季高纬区特别是亚洲区大气环流异常有重要作用, 对这一年来说是不可忽略的。但是, 夏季热带区气候异常主要是由海温控制, 因为只有在考虑了 SST 作用的试验中才能给出夏季热带区气候异常, 包括降水距平和大气环流异常的特征^[13]。

关于可预测性问题, 还应注意到预测东亚夏季气候异常的一个重要基础是它与 ENSO 的关系。研究表明, 这种关系不仅非常复杂, 而且有间断性, 就是说, 这种关系有时会强一些, 而有时会非常微弱, 甚至根本没有显著关系^[14~16]。

3 模式预测结果的订正

Wang 等^[17]提出了一个对模式预测夏季气候异常进行订正的方案, 这个方案可以表述如下:

$$P_{WZZ} = (M - M_{-1})S_1 / S_2 + O_{-1} - O_A, \quad (1)$$

而模式预测的异常量值为

$$P_{CM} = M - M_A, \quad (2)$$

式中, M 代表模式预测的某年某变量的夏季集合结果, 而 M_{-1} 为模式预测的前一年的相应结果, M_A 为相应的模式气候平均态的值; O_{-1} 和 O_A 分别为观测的对应值; S_1 和 S_2 分别代表观测和预测的夏季该变量的年际变化标准差; P_{CM} 和 P_{WZZ} 分别为未修正和已修正的异常值。

由公式 (1) 可看出, 通过系数 S_1 / S_2 对模式的年际变率进行了修正, 又由于气候的准 2 年信号可以被较好地模拟出来, $(M - M_{-1})S_1 / S_2$ 将非常接近于 $O_{-1} - O_A$ 。这样, 就有 $(M - M_{-1})S_1 / S_2 + O_{-1} - O_A \sim O - O_{-1} + O_{-1} - O_A = O - O_A$, 这里“ $\sim$ ”表示接近于。于是, 公式 (1) 即修正了模式预测结果的量级又修正了预测的气候异常符号。

为了说明该方法的效果, 他们选了 8 个典型区域来比较未修正的和已修正的预测结果与实测结果的相关系数。这 8 个区域分别为亚洲热带区 (40~110°E, 0~20°N), 东南亚区 (110~125°E, 0~20°N), 东亚季风区 (110~125°E, 20~40°N), 澳大利亚区 (120~150°E, 20~40°S), 热带东太平洋区 (180°E~90°W, 10°S~10°N), 中美洲区 (30~90°E, 10°S~10°N), 南极区 (180°E~90°W, 70~90°S), 以及欧亚中纬区 (40~

70°E, 20~50°N)。他们发现, 对 850 hPa 纬向风异常的预测结果而言, 修正后的结果远远好于未修正的结果, 而且, 修正后提前一个季节和提前一年的预测结果水平相当, 但是从 5 月份开始的预测结果明显好于从其他月份开始的预测结果。

4 土壤湿度条件的初始化

20 世纪 80 年代已有学者对春季土壤湿度异常之于夏季气候的影响作了研究^[18,19]。最近, Lin 等^[20]对此也进行了研究。为了能够表达土壤湿度异常对夏季气候的影响, 马柱国^[21]根据降水等气象变量与土壤湿度的经验关系设计了一个计算土壤湿度的方法。根据这个方法计算出的土壤湿度与实测土壤湿度的地理分布吻合较好。这个方案具有在短期气候预测中应用的较好前景。

5 跨季度及年度变化的模式预测试验——IAP 短期气候预测系统

作为最早开展短期气候预测的研究机构之一, 中国科学院大气物理研究所气候预测研究小组早在 1988 年就利用气候模式开展了跨季度汛期降水距平预测, 并获得了初步的成功^[5]; 随后在此基础上发展了一套海洋四维同化方法, 海气耦合积分方法, 集合预测方法、可信度和概率预测方法以及订正技术等, 逐步建立和完善了中国科学院大气物理研究所跨季度短期气候距平预测系统 (IAP PSSCA)^[6,7,22]。在对我国夏季风降水距平进行跨季度实时预测时, 他们采用的是“两步法”, 即先利用海气耦合模式预报出海温异常, 然后再利用经过修正后的海温异常来驱动大气环流模式进行集合预报。

利用 IAP PSSCA 对 1989~1994 年我国夏季旱涝形势的预测总的说来是比较成功的, 即大的形势和主要距平还能报出来 (或多少相象), 特别是对我国东部地区 (尤其是长江流域和我国南方) 的预测效果较好。例如 1989 年江淮流域夏季多雨, 1991 年发生在我国江苏和安徽的大洪水, 1992 年我国东北和华北的大旱, 1994 年我国南方的大涝以及中部的干旱, 1995 年江南北部多雨等等都预报得很好^[5,23]; 但是有的年份却不是很好, 例如对于 1993 年的预测就不是很成功, 形势分布都不像。

在利用 IAP PSSCA 进行实时预测的同时, 王会军^[10]还利用 IAP 大气环流模式研究了我国夏季降水异常的可预报性问题, 指出在我国的东部和南部相对而言其可预报性较高; 而林朝晖等^[24]通过对 1980~1997 年的夏季降水异常进行的系统性事后预报试验, 发现气候模式中陆面过程的改进可以在较大程度上改善短期气候预测的技巧, 特别在中国华北和东北地区的改善尤为显著。在此基础上进一步改进和完善了 IAP 短期气候预测系统, 结果使得短期气候预测又进了一步。

利用改进后的 IAP PSSCA 对 1998 年夏季中国降水距平的预报结果表明该系统的预测效果是较好的^[24]。对于 1998 年夏季我国大部分地区多雨, 尤其是长江流域、嫩江流域和新疆西北部的大正距平, 以及黄淮间的小负距平都预报得较好, 另外还正确地预报出位于中国东部海域以及日本的降水正距平区。虽然长江流域正距平的幅度与实测相比偏弱。对于 1999 年中国夏季的旱涝形势, 大多数的预报模式和方法都未能很好地预报出来。但 IAP PSSCA 却很好地预测出我国 1999 年南涝北旱的大范围降水形势, 对

于长江下游和新疆北部的强降水中心, 以及我国北方大部的少雨形势的预报与实测均较相符。但是对于我国华北地区存在的小范围降水正距平区, IAP PSSCA 并没有很好地预报出来; 另外 IAP PSSCA 预报的我国南方多雨区的范围也比实测要稍微偏北^[9]。

2000 年我国大部分地区尤其是北方地区为旱年, 主要雨带位于黄淮之间以及我国的西南和东南沿海, IAP PSSCA 均较好地预报出了这些大范围的降水异常特征。而且对于河套附近较强的降水负距平区也预报得很好, 另外对位于新疆的降水正距平区, IAP PSSCA 也很好地预测出来了。但是对于长江中下游流域的狭窄的降水负距平区, 模式未能预报出来, 这主要还是由于预测系统中气候模式分辨率太低的缘故。

多年来的实时预测试验结果表明, IAP PSSCA 对我国夏季大范围的降水异常形势有较好的预报能力, 但是该预测系统同样存在着一些不足之处, 如降水距平分布的细致结构与实测相比仍有一定的欠缺, 同时预报出来的降水异常幅值与实测相比偏弱等。这一方面需要通过进一步改进和完善气候模式, 引入性能良好的高分辨率模式来达到; 另外一个方面就是需要在预测过程中引入陆面状况的初始化过程; 同时还需要对 IAP PSSCA 的订正系统予以进一步的改进和完善。

参 考 文 献

- 1 周广庆、李旭、曾庆存, 一个可用于 ENSO 预测的海气耦合模式及 1997/1998 ENSO 预测, 气候与环境研究, 1998, 3, 349~357.
- 2 Zhou Guangqing, Zeng Qingcun and Zhang Ronghua, An improved coupled ocean-atmosphere general circulation model and its numerical simulation, *Progress in Natural Sciences*, 1999, 9, 374~381.
- 3 周广庆、曾庆存, IAP ENSO 预测系统预报技巧的时间依赖性及对 1999 年 La Niña 事件的预测, 气候与环境研究, 2000, 5, 109~117.
- 4 Zhou Guangqing and Zeng Qingcun, Predictions of ENSO with a coupled GCM, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, 18, 587~603.
- 5 曾庆存、袁重光、王万秋、张荣华, 跨季度气候距平预测试验, 大气科学, 1990, 14, 10~25.
- 6 Zeng Qingcun, Experiment of seasonal and extraseasonal prediction of summer monsoon precipitation, Proceedings of the International Conference on Monsoon Variability and Prediction, Trieste, Italy, 1994, 9~13, May, 452~459.
- 7 Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Li Xu et al., Seasonal and extraseasonal predictions of summer monsoon precipitation by GCMs, *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, 14(2), 163~176.
- 8 Lin Zhaohui, Li Xu, Zhou Guangqing, Zhao Yan and Zeng Qingcun, Extraseasonal prediction of summer rainfall anomaly over China with improved IAP PSSCA, *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, 23(4), 351~366.
- 9 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, 97~106.
- 10 王会军, 试论短期气候预测的不确定性, 气候与环境研究, 1997, 2, 333~338.
- 11 Wang Huijun, A preliminary study on the polar climate predictability, *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, 16, 361~366.
- 12 赵彦、郭裕福, 短期气候数值预测中海温和初始场作用的敏感性试验, 应用气象学报(增刊), 2000, 11, 21~30.
- 13 Wang Huijun, T. Matsuno and Y. Kurihara, Ensemble hindcast experiments for the flood period over China in 1998 by use of the CCSR/NIES atmospheric general circulation model, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 2000, 78(4), 357~365.
- 14 王会军, 关于我国几个人水年大气环流特征的几点思考, 应用气象学报(增刊), 2000, 11, 79~86.
- 15 Wang Huijun, The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970s, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, 18, 376~386.

- 16 Wang Huijun, Instability of the East Asian summer monsoon-ENSO relations, *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**, 1~11
- 17 Wang Huijun, Zhou Guangqing and Zhao Yan, An effective method for correcting the seasonal-interannual prediction of summer climate anomaly, *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, **17**, 234~240.
- 18 Shukla, J. and Y. Mintz, influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate, *Science*, 1982, **215**, 1498~1501.
- 19 Yeh, T. C., R. T. Wetherald and S. Manabe, The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change—a numerical experiment, *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112**, 474~485.
- 20 Lin Zhaohui, Bi Xunqiang, Wang Huijun and Zeng Qingcun, Dependence of the AGCM climatology on the method of prescribing surface boundary conditions and its climatological implication, *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16**, 593~607.
- 21 马杜国, 中国东部土壤湿度和区域气候变化的关系及一个土壤湿度反演模式的建立, 中国科学院大气物理所博士学位论文, 1999.
- 22 Li Xu, Zeng Qingcun and Yuan Chongguang, Experiments of Seasonal and Extraseasonal Prediction by Using Coupled GCM. Simulation of Interannual and Intraseasonal Monsoon Variability, WCRP-68, WMO / TD-No.470, March 1992.
- 23 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.
- 24 林朝晖、李旭、赵彦、周广庆等, IAP短期气候预测系统的改进及其对1998全国汛期旱涝形势的预测, 气候与环境研究, 1998, **3**(4), 339~348.

Reviews on Study of the Short-term Climate Prediction in China

Wang Huijun, Zhou Guangqing and Lin Zhaohui

(State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract This is an overview paper on the short-term climate prediction studies made in the Institute of Atmospheric Physics (IAP) Chinese Academy of Sciences (CAS) in China over the past 10 years. The first attempt of climate prediction was experimented by Zeng's group in 1989 by using the AGCM coupled with a tropical Pacific OGCM designed in IAP. In 1997, IAP established the first version of the ENSO prediction system by using the Tropical Pacific and Global Atmosphere CGCM. The predictability has been studied in IAP since 1996. Based on the model's ability on reproducing the biannual oscillation existed in the climate, Wang et al. designed an effective correction method for the seasonal climate prediction system. A system for empirical relationship between the atmospheric variables and the soil moisture was established, in order to take account the impact on the springtime soil moisture anomalies in the summer rainfall anomalies. IAP also studied the role of the global SST anomalies and the springtime anomalous atmospheric circulation on the summer flood over the Yangtze River Valley in 1998 by use of the AGCMs developed in IAP and the Center for Climate System Research at the University of Tokyo.

Key words: short-term climate prediction; climate model; review