

一个可供 ENSO 预测的海气耦合环流模式及 1997/1998 ENSO 的预测*

周广庆 李 旭 曾庆存

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

摘 要 利用中国科学院大气物理研究所设计发展的具有较高分辨率的热带太平洋和全球大气耦合环流模式, 设计了一个初始化方案, 建立了 ENSO 预测系统, 进行了系统性的预测试验。预测结果检验评估表明, 该预测系统表现出较强的预报能力, 赤道中东太平洋地区 (Nino 3 和 Nino 3.4) 海表温度距平预报相关技巧高于 0.52 的预报可持续 18 个月, 该预测系统可应用到试验性的海温预测实践中。利用该系统对 1997/1998 年 ENSO 进行了实际预测, 表明预测是成功的, 预测的海温距平已提供给今年我国夏季降水预测使用, 取得了良好的预测效果。

关键词 海气耦合环流模式 初始化 ENSO 预测 1997/1998 ENSO

1 引言

80 年代以来, 厄尔尼诺和南方涛动 (ENSO) 动力学与预测理论一直是许多国际研究计划的重要内容。目前, 国际上利用海气耦合动力学模式的 ENSO 预测产品已具有较大的参考价值。但是, 由于 ENSO 本身的复杂性, 目前还没有一个动力学模式能够非常全面地预报出 ENSO 的演变过程, 不同模式的预报技巧在空间分布上有较大差异, 同时也和预报个例有关^[1~4], 这说明 ENSO 预测问题还需深入研究。因此, 通过不同模式的预测试验, 加深对 ENSO 的认识是必要的, 同时不同模式间的取长补短也是目前提高 ENSO 预报技巧的一个有效途径。

国内在季度至年际预报方面已取得了一些进展, 其中中国科学院大气物理研究所已建成基于海气耦合环流模式的预测试验系统^[5], 但海洋模式的低分辨率限制了海温的预报时效, 不能用于 ENSO 的预测。

本文利用中国科学院大气物理研究所 (IAP) 自行设计发展的较高分辨率热带太平洋和全球大气耦合环流模式 (IAP TP-CGCM), 设计了一个初始化方案, 进行了系统性的 ENSO 预测试验, 并对 1997/1998 年 ENSO 演变过程做了实际预测。

2 模式及其初始化

本文所用耦合模式的大气部分是 IAP 两层全球大气环流模式^[6], 海洋部分是一个具

1998-11-12 收到

* 国家自然科学基金重点项目“大气环流季节变化及其年际变动的分析”(49735160) 和国家攀登项目“气候动力学和气候预测理论的研究”联合资助

有自由表面的热带太平洋环流模式, 模式范围为 $30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E} \sim 70^{\circ}\text{W}$, 它具有较高的分辨率(水平分辨率为 $1^{\circ} \times 2^{\circ}$; 垂直分为 14 层, 240 m 以上有 9 层)^[7]。大量数值模拟研究表明, 不论大气模式还是海洋模式对气候平均状态及其年际变化都具有很强的模拟能力^[7~9]。

耦合模式采用同步耦合方案, 即在热带太平洋区域, 大气和海洋每天相互交换一次通量; 在耦合方案中采用了海表强迫量“线性统计修正”技术, 它在控制“气候漂移”的前提下, 尽可能地保留了模式本身的行为特征^[10]。IAP TP-CGCM 100 年的数值积分表明, 耦合模式不仅正确模拟出了大气和海洋环流的气候平均状态和季节循环过程, 而且对 ENSO 振荡特征的模拟也十分成功, 这为 ENSO 预测奠定了基础。

如何获取有效的初值是天气、气候预测的关键。本文设计了一个海气耦合模式的初始化方案(图 1): 从耦合积分第 100 年的大气、海洋状态出发, 把 1981 年 11 月至 1997 年 12 月实测月平均海表温度异常(SSTA_{OI})叠加在耦合模式模拟的具有季节变化的气候海表温度(SST_{CGCM})上, 用所得的合成海表温度(SST)连续强迫大气模式, 将每个月终场作为预报所需的大气初值, 同时由这个大气模式积分输出的海表风应力和热通量连续强迫海洋模式生成每个月的海洋初值, 共计 194 组初值。

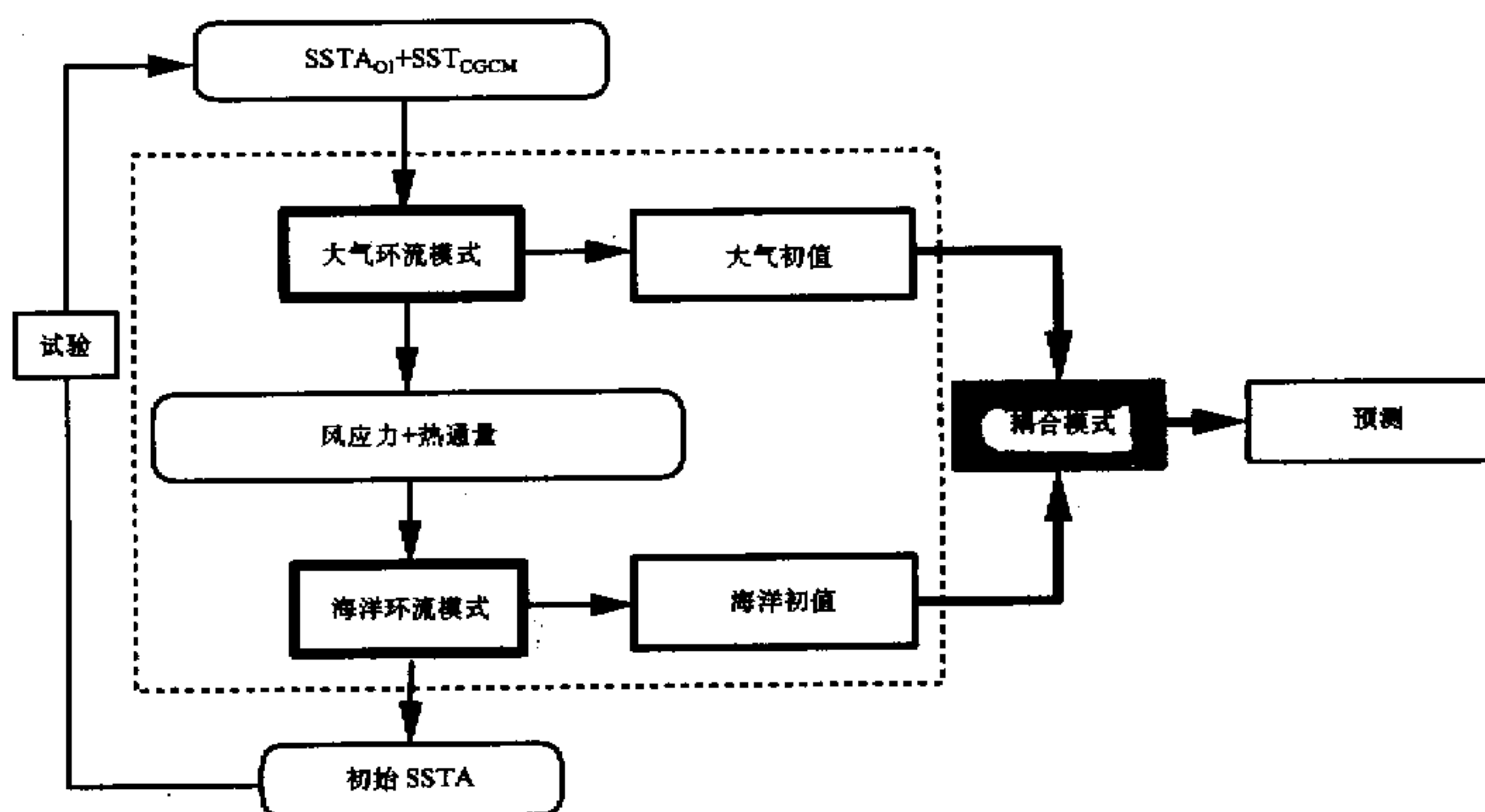


图 1 耦合模式初始化方案示意框图

事实上, 上述初始化过程相当于是在耦合状态下进行的, 用到实测 SSTA_{OI} 只是为了引入观测信息而使海气耦合系统处于正确的 ENSO 位相, 这样所得到的大气和海洋初始状态是相互协调的, 并且相对于所用的海气耦合模式也是自协调 (self-consistent) 的, 尽可能避免了预报启动阶段初值与模式不协调所引起的“冲击”(shock)。另外, 由于海表热通量观测的困难性, 本初始化方案采用 SST 而不是像国际

上其它初始化方案(无海洋同化)那样采用观测风应力做强迫源^[1,2,4], 在初始化过程中利用大气模式的输出, 可同时考虑动量通量和热量通量对模式海洋的作用, 有利于提高预报初值的准确性和协调性。

图 2 给出了模式初始化过程中再现的 Nino 3 区 (150~90°W, 5°S~5°N) SSTA 与实测 SSTA 的比较, 两者相关系数达到了 0.91; 不足的是对 1982/1983 年和 1997/1998 年两次强 El Niño 事件的模拟偏弱, 这在下面的预报中表现得更明显。总之, 上面设计的初始化方案是相当有效的。

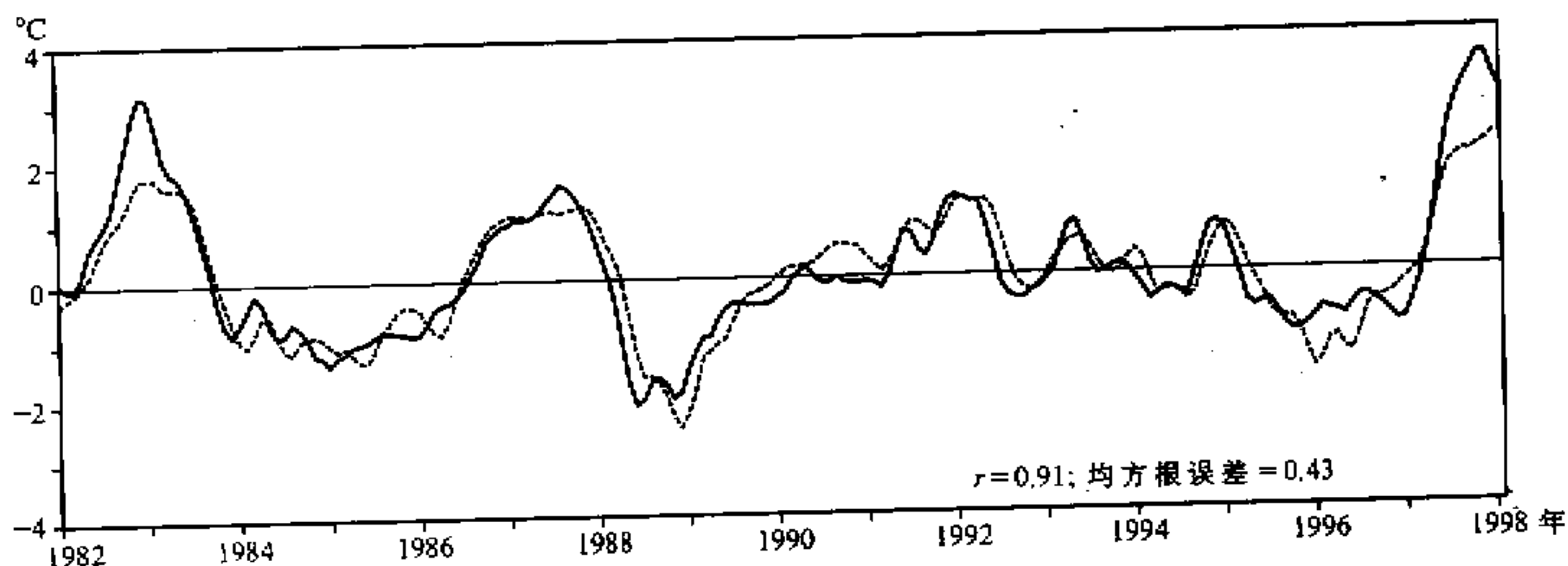


图 2 Nino 3 区初始化(虚线)与实测(实线) SSTA 的时间演变曲线

3 系统性预测试验

耦合模式分别从上述 194 组初值出发, 向前积分 2 年, 即做 24 个月的预报, 这样共有 194 个不同时刻的 2 年预报结果。下面对这 194 个预报结果进行分析、评估。

图 3 给出的是超前 6 个月的 Nino 3 区 SSTA 的预报和观测结果。总的来说, 预报与实况比较吻合, 距平相关系数达到 0.57, 但预报的 SSTA 强度比实测普遍偏低, 尤其是对 1982/1983 年和 1997/1998 年这样的极强 ENSO 年, 预报结果要比实测弱得多, 这与耦合模式本身所能产生的年际变率偏弱 (1°C 左右) 有关。预报结果的另一个

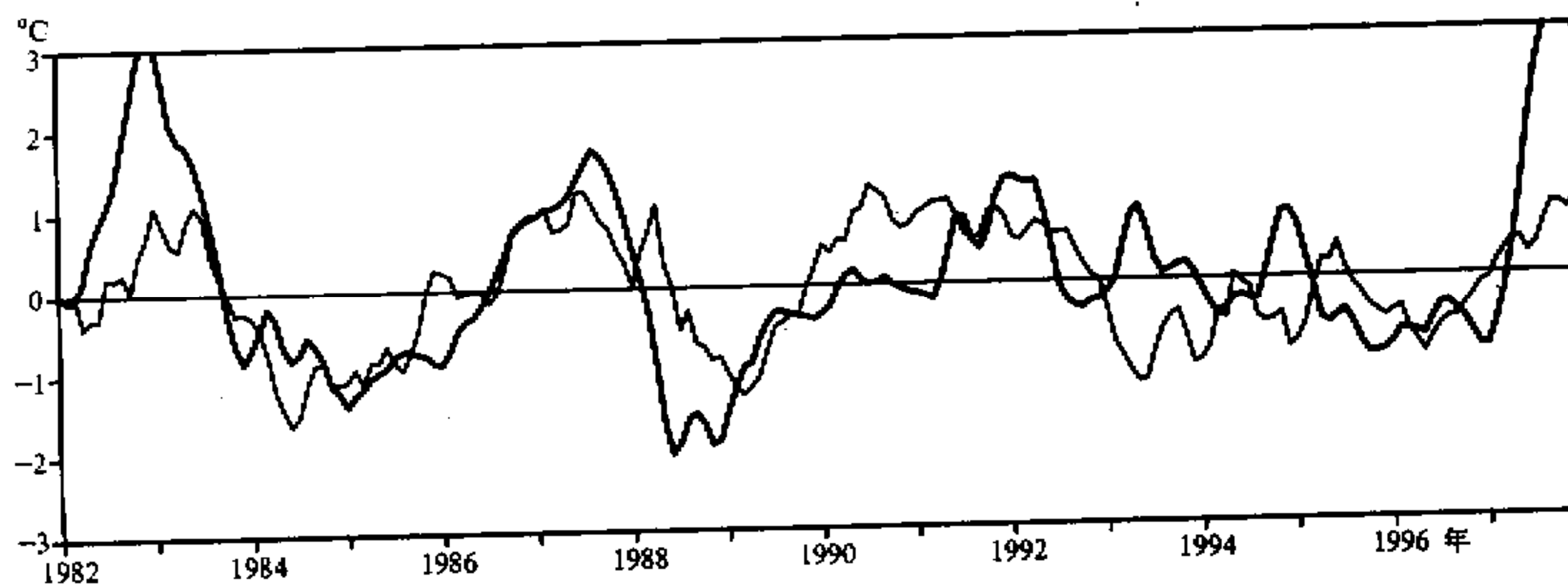


图 3 Nino 3 区超前 6 个月预报(细线)与实测(粗线) SSTA 的时间演变曲线

特征是 80 年代的预报好于 90 年代, 这是目前 ENSO 预报中的普遍现象, 说明 90 年代 ENSO 循环机制与 80 年代可能有所不同, 而目前耦合模式对 90 年代 ENSO 循环的再现能力还非常有限。

图 4 是对本预测模型的定量评估, 实线和长虚线分别表示模式预报和持续性预报的相关技巧 (预报与观测的相关系数)。模式预报技巧随着预报时间的延长逐渐降低, 但在至少 18 个月时间里都具有实际预报意义, 预报技巧均高于 0.5, 尤其是超前 5 个月以上的预报, 模式结果明显好于持续性预报; 在 1 年以内的预报中, 最低技巧出现在超前 8 个月的预报上, 但也达到了 0.54。在 5 个月以内, 模式预报技巧比持续性预报略低, 其原因主要是预报初值还不够精确。目前, 国际上其它动力学预报模型在未同化引入海洋次表层观测信息之前都存在同样问题, 因此海洋资料尤其是次表层资料的同化是提高 ENSO 预报技巧必不可少的。

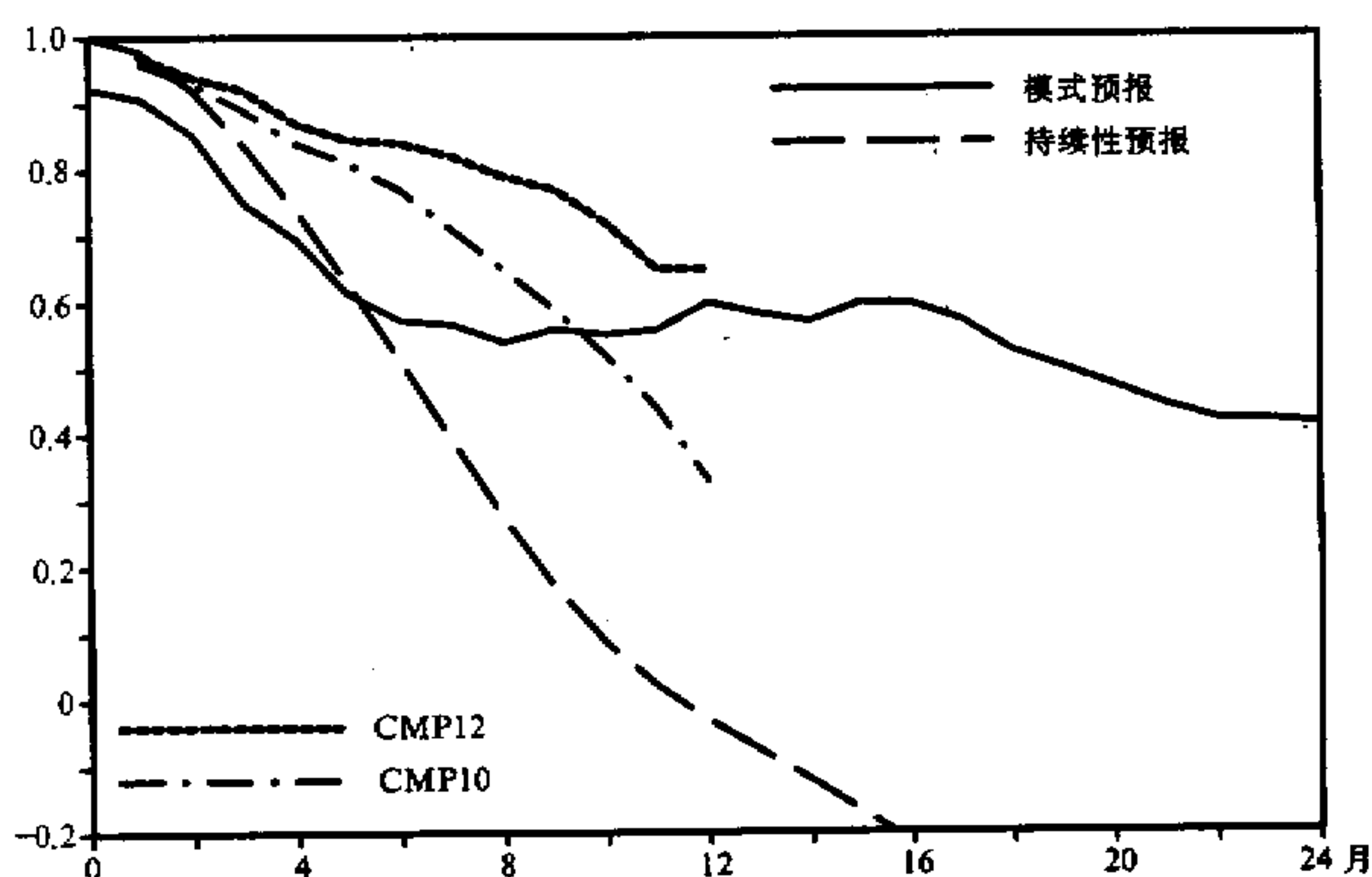


图 4 Nino 3.4 区 ($170^{\circ}\text{W}\sim 120^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$) SSTA 预报相关技巧 (预报与观测的相关系数)
横坐标为预报超前时间 (月)

为了便于比较, 在图 4 中同时给出了美国国家环境预报中心 (NCEP) 基于耦合环流模式的 ENSO 预测系统两个不同版本 (CMP10、CMP12) 的预测评估结果^[11]。CMP10、CMP12 在初始化过程中均采用了三维变分同化技术引入了海洋次表层温度信息, 使海洋初值更为准确; 而 CMP12 与 CMP10 相比, 在海洋同化分析和耦合模式两方面都做了改进。对比发现, 在预报的头 9 个月里, NCEP 模式的预报技巧高于我们的模式, 其初值采用了三维同化分析是一个主要原因; 9 个月以后的预报, 我们模式的技巧与 NCEP 最新版本 (CMP12) 的相当, 明显高于其旧版本 (CMP10)。由于 NCEP 的耦合模式具有更高的分辨率, 尤其是初值采用了海洋同化分析, 在预报的头几个月里其预报技巧是应该比我们的高一些; 但值得注意的是, 我们的模式在 9 个月以后的更长期的预报上显示出相当的潜力, 比如第 24 个月的预报技巧能达到 0.41, 明显高于 NCEP 的 CMP10 第 12 个月的预报技巧, 这说明耦合模式经过长期积分检验并能

够正确地模拟出 ENSO 循环特征对长时效的预报是极其重要的。

3 1997/1998 年 ENSO 的预测

1997 年爆发了自有记录以来最强的一次 ENSO 事件。这次 ENSO 过程的一个显著特征是在 1996 年底和 1997 年初, 西太平洋暖池次表层出现海温正异常, 其后在 1997 年春季 (3、4 月) 这种次表层的海温正异常在赤道上沿着季节性温跃层 (斜温层) 快速向东传播并且不断加强, 到达东太平洋后抬升至表面, 因此, 在海表面上表现为 1997 年春夏赤道东太平洋出现大范围的海温正距平, 而且不断加强, 最终导致一次强 El Niño 的爆发。所以, 耦合模式能否对这种西太平洋暖池次表层海温正异常的出现及其东传的特征进行正确地模拟、初始化以及预报对海表温度 (SST) 的预报起着关键的作用。对耦合模式 100 年数值积分结果的分析表明, 这种西太平洋暖池次表层海温异常的出现及其东传现象是热带太平洋年际气候变率的普遍特征^[12]。为了便于分析比较, 在这里先给出了耦合模式初始化过程中对 1997/1998 年赤道次表层海温异常演变过程的再现 (图 5)。虽然海温异常的强度比实测弱得多, 但位相传播过程与实测很接近, 这为海表温度的预报打下基础。

基于上述分析, 我们利用该预报模型对 1997/1998 年的 ENSO 全过程进行了预

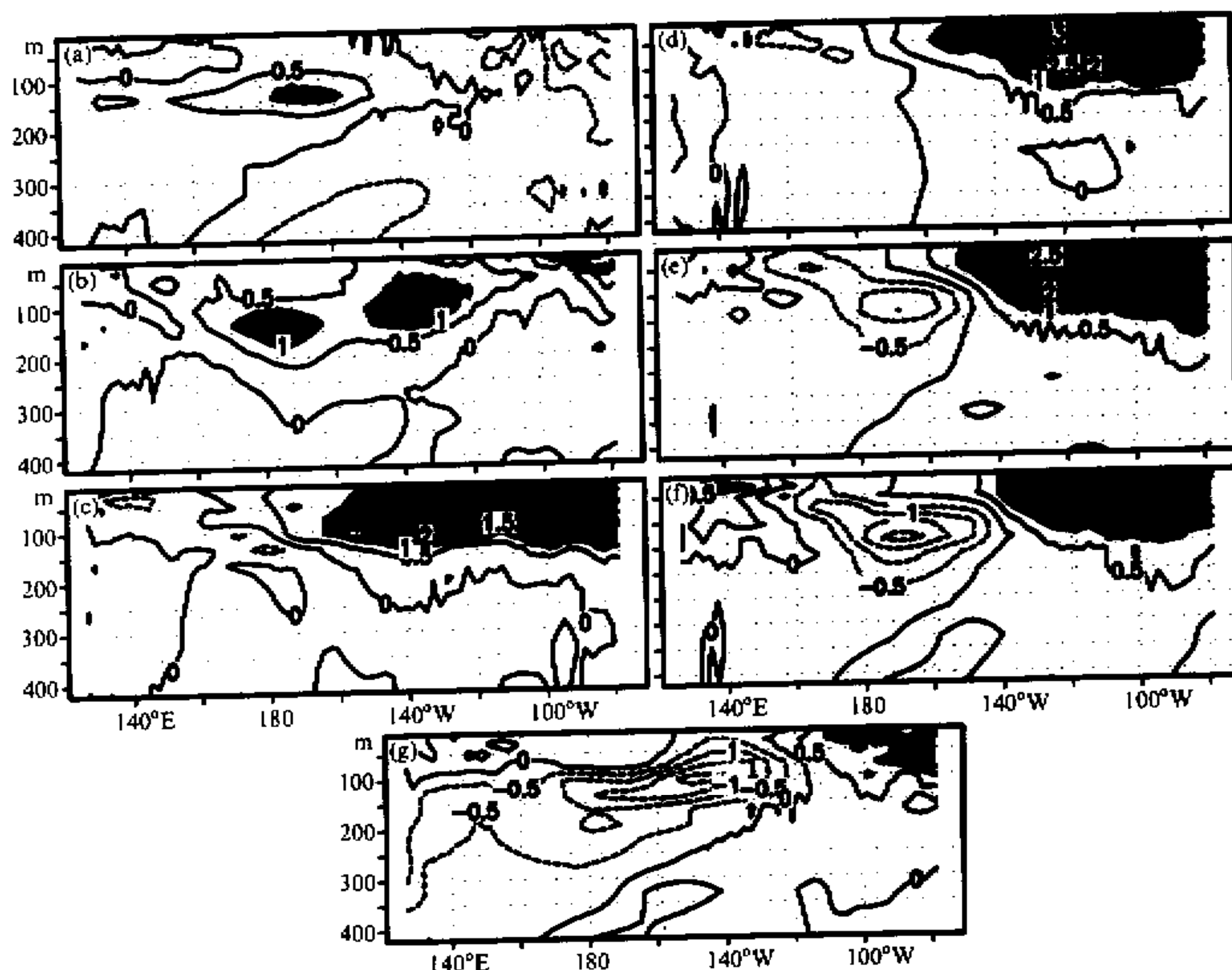


图 5 初始化模拟的 1997 年沿赤道海温垂直-纬向剖面
(a) 1996 年 12 月; (b) 1997 年 3 月; (c) 1997 年 6 月; (d) 1997 年 9 月;
(e) 1997 年 12 月; (f) 1998 年 3 月; (g) 1998 年 6 月

报。分别从 1996 年 4、5、6 月出发,耦合模式向前各预报 36 个月。此预报是 1997 年下半年做的,当时 El Niño 正处于发展阶段。图 6 是从上述 3 个初值预报的赤道次表层海温异常的演变过程的集成结果。对比实测和图 5,模式对赤道次表层海温位相的预报是成功的。图 7 给出了上述 3 个不同初值的 Nino 3 区 SSTA 的预测结果及其集成,表明这次 El Niño 在 1997 年春开始爆发,年底达到顶峰,从 1998 年开始逐渐减弱,在 1998 年夏季结束,并转为 La Nina。气候监测表明,上述预报的 ENSO 位相与观测是相当一致的,但强度明显偏弱。后者与耦合模式本身和预报初值的不足密切相关。

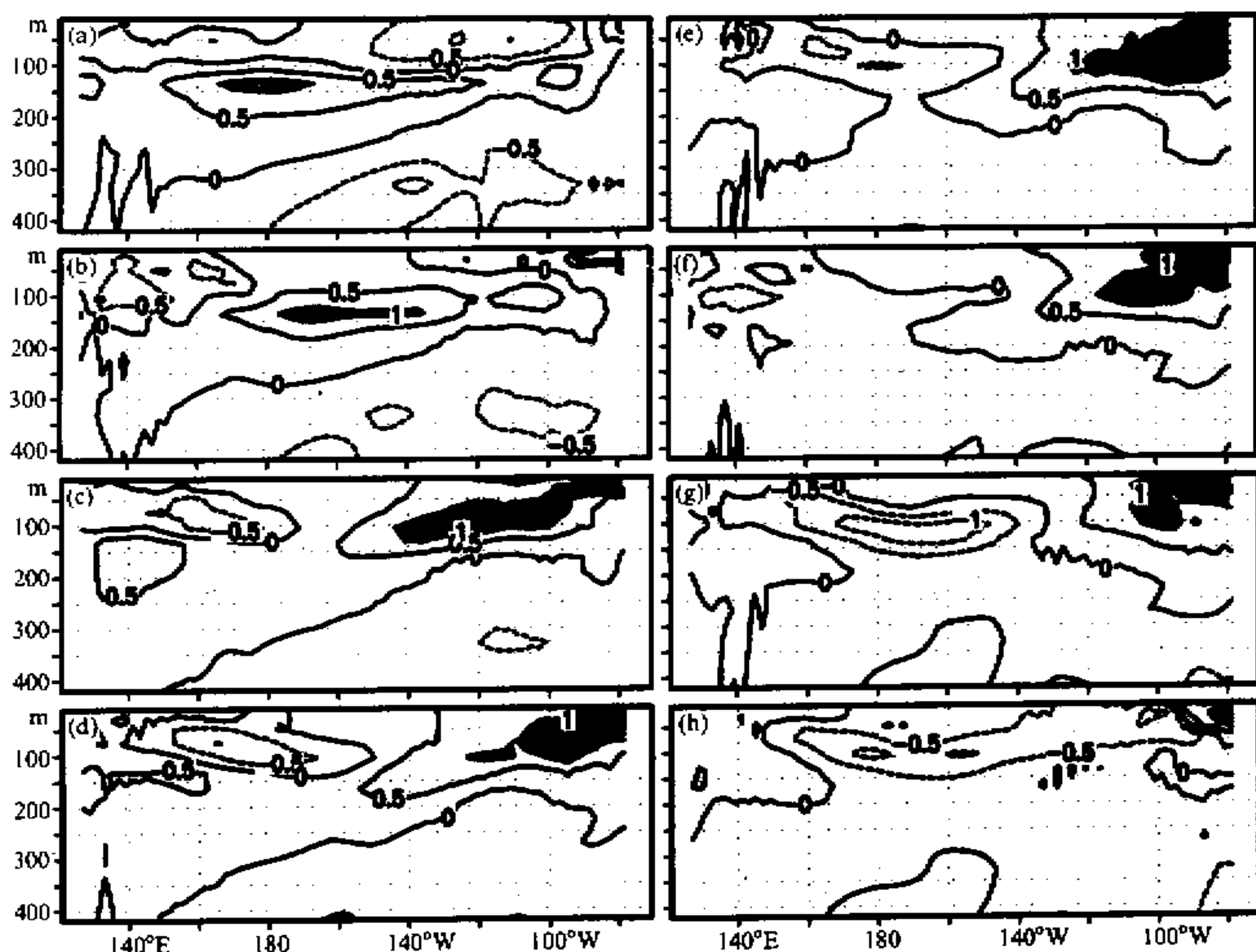


图 6 模式预报的 1997 年沿赤道的海温垂直-纬向剖面

(a) 1996 年 12 月; (b) 1997 年 3 月; (c) 1997 年 6 月; (d) 1997 年 9 月;
(e) 1997 年 12 月; (f) 1998 年 3 月; (g) 1998 年 6 月; (h) 1998 年 9 月

为了配合今年汛期降水预测,我们于今年 3 月初对这次 El Niño 未来的演变又做了预测。图 8 是预测的 Nino 3 指数,可见 El Niño 将逐渐减弱并于今年秋季结束。对比实际情况,预测 El Niño 衰减并结束是正确的,但预测结束的时间比实测晚了近 2 个月。NCEP CIMP12 同期预测结果(图略)表明,这次 El Niño 将持续到今年年底或明年初^[13]。相比之下,我们的预测更为准确。图 9 是预测的逐月 SSTA 的水平分布,这一预测结果已提供给汛期降水预测使用并取得了良好的效果^[14]。

4 结论

本文利用中国科学院大气物理研究所设计发展的热带太平洋海洋和全球大气耦合环

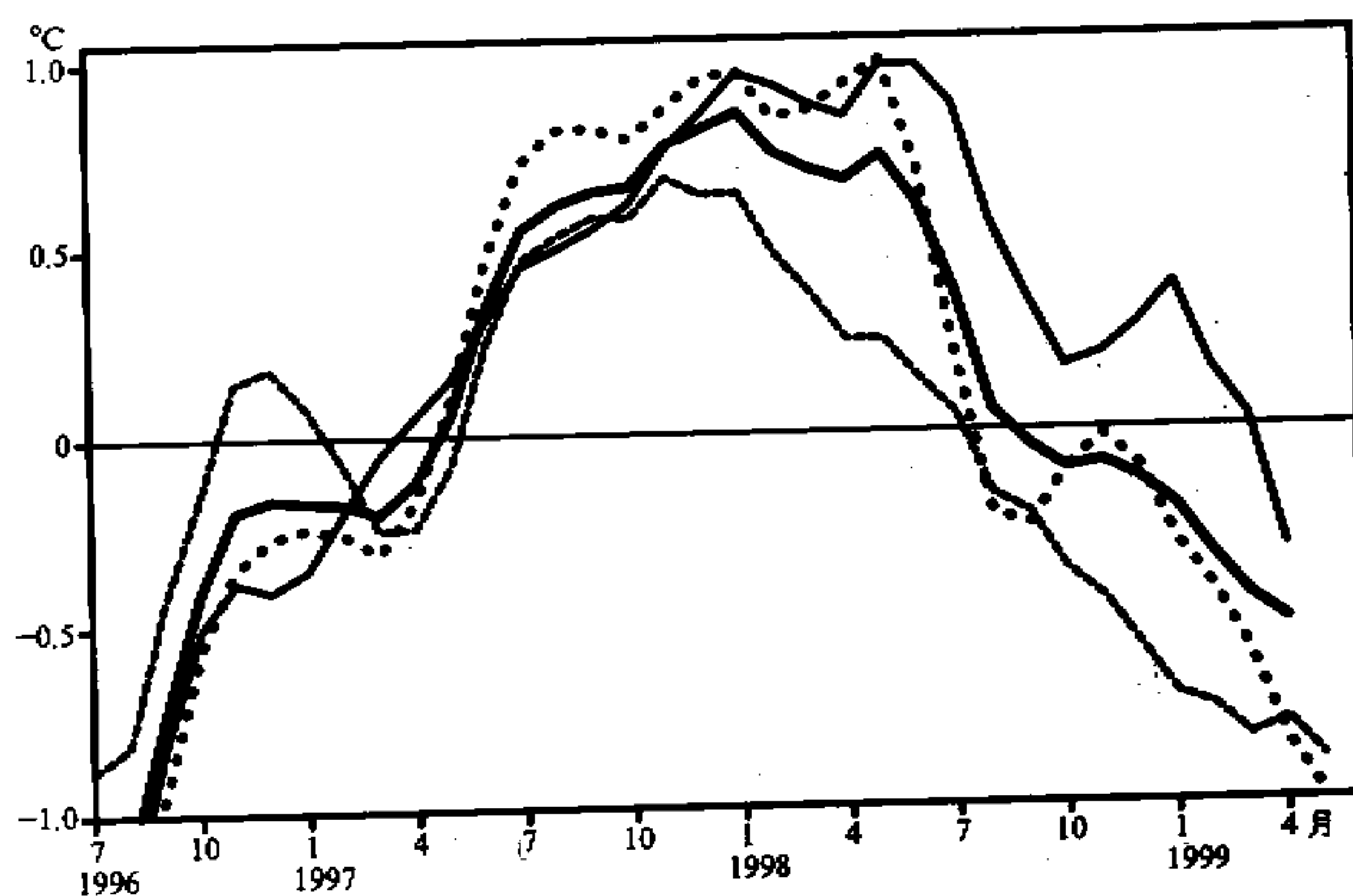


图 7 1997 / 1998 El Niño 事件全过程的预报
细实线、虚线和点线分别表示以 1996 年 4 月、5 月、6 月为初始时刻的 Nino 3 区 SSTA 的预测, 粗实线表示上述 3 个预报的集成

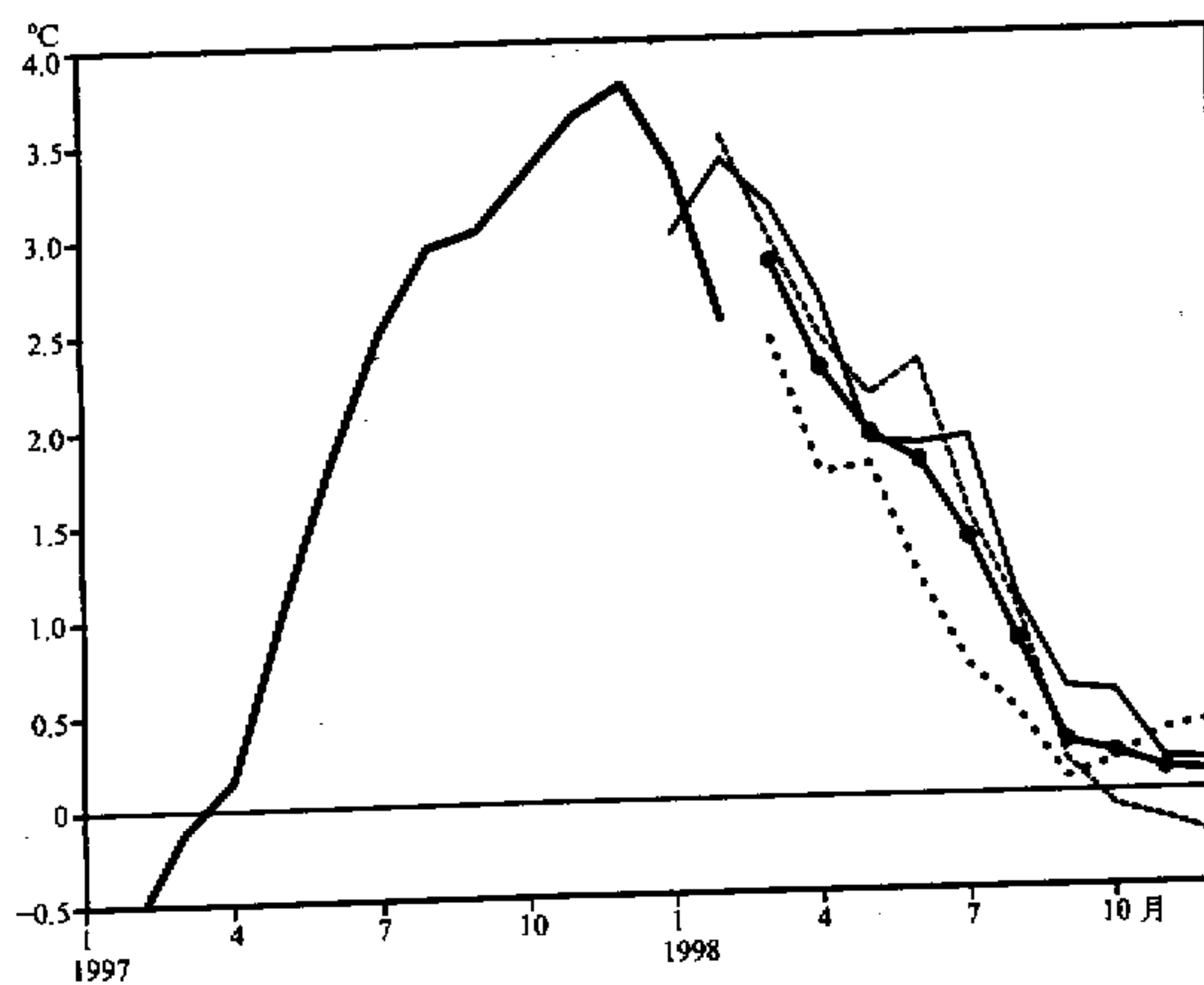


图 8 1998 El Niño 事件的预报
细实线、虚线和点线分别表示以 1998 年 1、2、3 月为初始时刻的 Nino 3 区 SSTA 的预测, 点实线表示上述 3 个预报的集成, 粗实线为观测

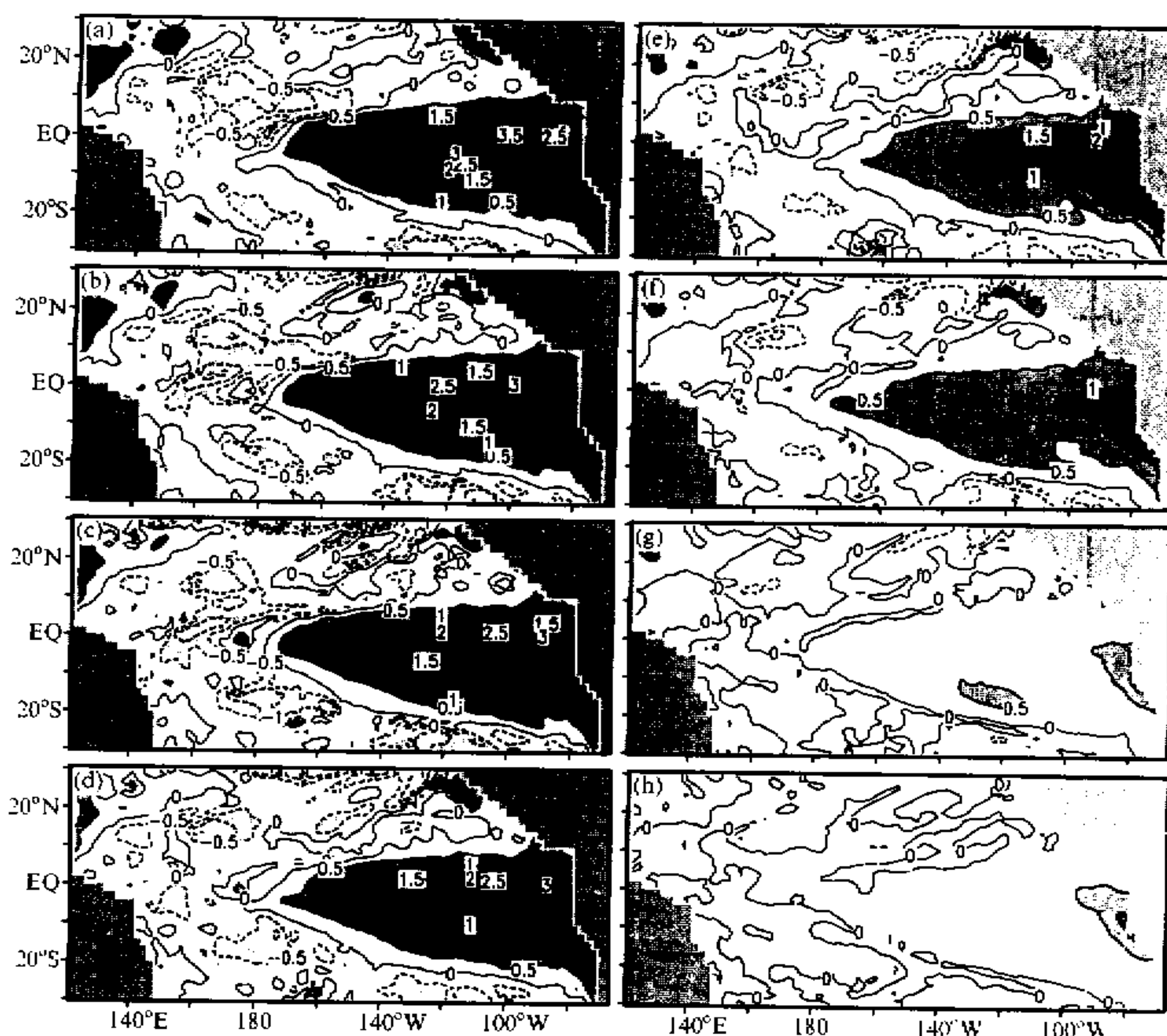


图9 分别以1998年1、2、3月为初始时刻预报的SSTA分布的集成结果
(a)~(h)分别为1998年3~10月的结果。等值线间隔 0.5°C

流模式，设计了一个初始化方案，进行了1982~1997年期间的共194个24个月的热带太平洋海表温度异常（SSTA）预测试验。结果表明，模式在超前3~18个月时间的预报上表现出较好的预报能力，预报技巧均在0.52以上，说明所设计的初始化方案是有效的，该模型可以应用到试验性的ENSO预测工作中；模式在长时效的预报上表现出相当的潜力，这是所采用的耦合模式具有模拟ENSO能力的一种体现，也说明了模式模拟ENSO能力对ENSO预测的重要性。当然，预报还存在相当的误差，这些误差既与耦合模式本身有关也与预报初值有关，需要对预报模式及其初始化进行改进，尤其应有效地引入海洋次表层的观测信息以提高初值的准确性，并对初值对预报的作用和影响做深入的研究。

利用这个预报模型，对1997/1998年ENSO全过程做了预测。结果表明，预报模式抓住了这次ENSO过程赤道次表层海温异常的演变特征，对海表温度异常演变的预报与实测也相当一致，但强度较弱。总之，对这次El Niño发生、发展等演变过程的预报是成功的；后续预测结果已提供给汛期降水预测使用，取得了良好的效果。

参 考 文 献

- 1 Cane, M. A., S. E. Zebiak and S. C. Dolan, 1986, Experimental forecast of ENSO, *Nature*, **321**, 827~832.
- 2 Latif, M., A. Sterl, E. Maier-Reimer and M.M. Junge, 1993, Structure and predictability of El Niño / Southern Oscillation phenomenon in a coupled ocean-atmosphere general circulation model, *J. Climate*, **6**, 700~708.
- 3 Ji, M., A. Leetmaa and V. E. Kousky, 1996, Coupled model prediction of ENSO during the 1980s and 1990s at the National Centers for Environmental Prediction, *J. Climate*, **9**, 3105~3120.
- 4 Kirtman, B. P., J. Shukla, B. Huang, Z. Zhu and E. K. Schneider, 1997, Multiseasonal prediction with a coupled tropical ocean-global atmosphere system, *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 789~808.
- 5 Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Li Xu et al., 1997, Seasonal and extra-seasonal prediction of summer monsoon precipitation by GCMs, *Advances in Atmospheric Sciences*, **14**(2), 163~176.
- 6 Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Zhang Xuehong et al., 1990, IAP-GCM and its application to the climate studies, in: *Climate Change Dynamics and Modelling*, Beijing: China Meteorological Press, 303~330.
- 7 Zhang R.-H., Endoh M., 1992, A free surface general circulation model for the tropical Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, **97**(C7), 11237~11255.
- 8 Sperber, K. R., Palmer T. N., 1995, Interannual tropical rainfall variability in general circulation model simulation associated with the atmospheric model intercomparison project, PCMDI Report, No.28, UCRL-ID-121725.
- 9 Zhang R.-H., Endoh M., 1994, Simulation of the 1986-1987 El Niño and 1988 La Nina events with a free surface tropical Pacific Ocean general circulation model, *J. Geophys. Res.*, **99**(C4), 7743~7759.
- 10 周广庆, 1996, 热带太平洋和全球大气耦合环流模式的设计和气候的数值模拟, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文.
- 11 Ji, M., Behringer D.W. and Leetmaa A., 1998, An improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization, Part II: the coupled model, *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1022~1034.
- 12 周广庆, 李崇银, 1999, 西太平洋暖池次表层海温异常与 ENSO 关系的 CGCM 模拟结果, 气候与环境研究 (待发表).
- 13 Barnston, T., M. Ji, A. Kumar, and A. Leetmaa, 1998, Forecasts of tropical Pacific SST using a comprehensive coupled ocean-atmosphere dynamical Model, *Experimental Long-Lead Forecast Bulletin*, **7**(1), 7~11.
- 14 林朝晖, 李旭, 赵彦等, 1998, IAP PSSCA 的改进及其对 1998 全国汛期旱涝趋势的预测, 气候与环境研究, **3**(4), 339~348.

A Coupled Ocean-Atmosphere General Circulation Model for ENSO Prediction and 1997/1998 ENSO Forecast

Zhou Guangqing, Li Xu, Lin Zhaohui and Zeng Qingcun

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract An ENSO forecast system was established by designing an initialization to the coupled atmospheric-oceanic general circulation model which was developed in the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, and systematic forecast experiments were performed. The results indicated that the correlation skill between the prediction and observation in eastern and central equatorial Pacific was above 0.52 up to at least 18 months in advance. By using this forecast system, the 1997/1998 El Niño was predicted successfully, and the benefit were obtained from the predicted SSTA to the prediction of the rainfall in China in summer.

Key words coupled ocean-atmosphere general circulation model initialization ENSO prediction 1997/1998 ENSO