

一个 ENSO 动力-相似误差订正模式及其后报初检验

孙丞虎^{1, 2} 李维京³ 任宏利³ 张培群³ 王冬艳⁴

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 南京信息工程大学大气科学系, 南京 210044

3 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

4 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘 要 为有效利用历史资料中的相似信息, 减小模式误差对 ENSO 这类跨季节-年际尺度预测问题的影响提高动力模式的预测水平。作者利用一种基于统计相似的模式误差订正方法, 以国家气候中心简化海气耦合模式为平台建立了相应的动力-相似误差订正 (DAEC) 模式, 并着重探讨了系统相似程度 (全相似或部分相似)、误差重估周期以及相似样本个数等因素对预报效果的影响。结果表明, 利用该方法可以有效地改善原有模式的预报性能, 其中“全相似”比“部分相似”更能反映海气耦合系统的相似程度, 从而对模式误差做出更为准确的估计, 使预报误差明显减小。海洋和大气的误差重估周期对结果也有较大影响, 在不同相似程度下分别存在着某种最优配置使得预报效果达到最佳。另外, 在对相似样本存在状况及影响的研究中则发现在当前资料长度内整体上只存在着有限个相似样本, 在此范围内随着样本取样数目的增加 DAEC 模式的预报性能逐渐提高。

关键词 动力-统计相结合 ENSO 预测 相似误差订正法

文章编号 1006-9895 (2006) 05-0965-12

中图分类号 P456

文献标识码 A

A Dynamic-Analogue Error Correction Model for ENSO Prediction and Its Initial Hindcast Verification

SUN Cheng-Hu^{1, 2}, LI Wei-Jing³, REN Hong-Li³, ZHANG Pei-Qun³, and WANG Dong-Yan⁴

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

4 National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract To further reduce the impact of model error on the short term climate prediction, on the basis of an analogue correction method of errors, which utilizes the analog information from the historical datasets to estimate the evolution of model errors, a dynamical-analogue error correction model for ENSO prediction based on NCCo intermediate ocean-atmosphere coupled model has been developed. The difference between this model and the NCCo model is only that an error correction sub-model is added in the ocean and atmosphere part respectively. The impact of some basic model parameters as mentioned follows on prediction results are investigated to get the optimal parameters choices; firstly, the effect of analogue degree including the part analogue and comprehensive analogue is compared, the results exhibit that in a coupled system the comprehensive analogue is much better than the part analogue for the model in this paper, because the former can really depict the analogue degree between the current initial value and its historical partners, thus leading to a well estimation of model error. Secondly, the investigation on the effect

收稿日期 2006-05-11, 2006-06-12 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40375025, 40575036

作者简介 孙丞虎, 男, 1978 年出生, 在读博士生, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: sunch@cma.gov.cn

of the re-estimate period of error (RPE) denotes that RPE is also a crucial parameter to this model. Usually, there is an optimal combination between the RPE of atmosphere and ocean model under different analogue degrees to make a good prediction. Furthermore, the results in this paper also display that there are finite analogue samples in the datasets that the authors hold, and the hindcasting skill has a linear response to the analogue sample sizes due mainly to the fact that more analogue samples can supply more error information to the model thus leading to better estimation of model error and more improvement of prediction skill. Based on the above parameter choices, the initial verification in this paper shows that the hindcast skill of this model is better than that of NCCo model for the SST prediction of the tropical Pacific Ocean, which may imply its potential application to real-time prediction.

Key words combination of statistical and dynamical method, ENSO prediction, analogue error correction method

1 引言

目前,短期气候的预测方法主要依靠动力和统计两种方法,两者分别从确定论和概率论两种不同的角度解决预测问题,但就效果而言两者各有千秋。动力学方法虽然物理意义明确,但它对于历史资料利用甚少。而统计学方法又恰恰相反,它虽利用了大量的历史资料,但缺乏对物理知识的有效应用。从方法论角度看,两种方法互相结合、取长补短,才是解决短期气候预测问题的一条正确途径。但究竟该如何实现动力和统计的有效结合,却一直是个令人困惑的问题。对此,顾震潮^[1]很早就指出了在数值预报中引入历史资料的可能性和必要性,随后,许多气象工作者^[2~8]相继开展了一系列卓有成效的研究工作并取得了令人鼓舞的进展。

在影响短期气候预测水平的诸多因素中,模式误差是一个主要因素。而为降低其影响,一个很有效的办法就是对误差进行系统性的订正^[9~16]。当前,一般是利用多年的历史回报和观测事实所建立的某种统计关系对预报结果进行订正。但这类方法,由于样本量的限制导致统计关系并不稳定,以至在一定程度上影响了预测效果的改善。对于模式误差我们若能知道它的函数形式,那么当前面临的问题自然可迎刃而解,但现实是它作为模式中的一个未知部分,在形式上是未知的。因而,通过直接求解其函数形式来减少模式误差的办法显然面临着诸多不易克服的困难,那么这一问题又该如何解决?事实上,对此类问题可通过解第二类反问题的办法来解决^[17, 18],即利用历史观测资料中的信息作为方程的特解来估计其通解的大致形式^[19~22]。然而,历史资料的数量是如此之大,使用全部的历史资料显然很不现实,那么又该如何利用历史资料?对此,任宏利和丑纪范^[23]提出了一种利用历

史相似信息估计模式误差的方法。其在月尺度预报中,已利用复杂模式进行了初步应用并证明是十分有效的^[23~26],但对于 ENSO 预测这类的跨季节-年际尺度预测问题却尚未进行尝试。而要将该方法应用于复杂、精细的季节-年际预测模式,目前尚有诸多机理性和技术性的问题亟待解决,如:这种方法用于季节-年际预测时是否依然有效?在海气耦合模式中需要怎样的相似程度才能合理地反映该耦合系统的相似特征?相似样本的取样个数对预报结果会有多大程度的影响?针对上述问题,本文将以国家气候中心简化海气耦合模式为平台,构建相应的动力-相似误差订正模式,并将初步讨论系统相似程度、误差重估更新周期以及相似样本个数等模式参数对预报结果的影响,以期探索该方法在季节-年际预测中的应用前景为其进一步在复杂、精细模式上的应用提供借鉴。

2 相似误差订正法

实际上,对跨季度预测问题依然可认为是一种初值问题^[27~29],因此相似误差订正法^[23]在此领域同样适用。不失一般性,当前海-气耦合模式可表示为如下算子方程的形式:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi + F(\varphi) = 0, \quad (1)$$

$$\varphi|_{t=t_0} = \varphi_0, \quad (2)$$

式中, φ 为 N 维的模式状态向量, φ_0 为耦合系统的初值, F 为微分算子。而一个能够精确刻画系统实际状态的准确海-气耦合模式则应有如下特征:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi + F(\varphi) + E(\varphi) = 0, \quad (3)$$

$$\varphi|_{t=t_0} = \varphi_0, \quad (4)$$

式(3)中 $E(\varphi)$ 表示在当前海气耦合模式(1)式中尚未得到描述的过程,即模式误差项,显然对这一

项, 我们并不知道其具体函数形式。当观测误差、资料分析误差很小时(即观测误差远小于模式误差), 预报误差可以认为主要源于模式误差。而此时, 模式误差 $E(\varphi)$ 可以由历史上的相似初值所提供的误差信息来大致估计, 即

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi + F(\varphi) + E(\bar{\varphi}) = 0, \quad (5)$$

其中, $E(\bar{\varphi})$ 为与初值 φ 的历史相似初值 $\bar{\varphi}$ 进行回报时得到的回报误差, 也称“相似误差”。由此可见, 该方法的基本思想是如果两个初值是相似的, 那么在某个有效的时段内, 它们的误差分布也将相似。实际上, 这并不难理解, 因为在相似的初始条件下, 现实系统未来的演变在一段时间内将比较相似, 如在 $\text{lorenz}^{[30]}$ 的统计研究中就可看到这一点。同样, 对于用来描述现实的数值模式, 在相似的初条件下, 其在一段时间内的预报值也会相似。那么, 则不难想象上述数值模式的预报误差在这一时段内也会有相似的演变特征(如图 1 所示)。这样我们即可利用历史资料所提供的相似误差 $E(\bar{\varphi})$ 去估计实际误差 $E(\varphi)$, 从而在一定程度上减小模式误差的影响, 改善动力模式的预测效果, 同时也实现了统计和动力的有机结合。

3 ENSO 季节-年际预测中相似误差订正方案之设计

3.1 基本思路

ENSO 季节-年际尺度预测中, 相似误差订正方法的释用与月尺度预报有所不同。在月尺度相似-动力预测中因为主要考虑大气初值的影响, 所以仅靠大气状态的相似就能从历史资料中找到合适的相似样本, 从而可明显地改善预测效果^[23~26]。但对 ENSO 预测这类的跨季节-年际尺度预测问题, 它包含着海洋和大气两种分量的相互作用。因此, 选取相似样本时, 同时考虑两者的相似性应该才是合理的, 但实际结果是否如此? 为此, 本文将对海洋、大气均相似(全相似)和仅海洋相似(部分相似), 两种不同的相似程度对预报结果的影响加以讨论, 以便为季节-年际预测问题中相似的选取提供依据。

对于一个高度非线性的系统, 数值预报结果对初始条件的微小误差非常敏感, “多初值集合”预报^[31]针对这一问题应运而生。因此在现阶段的气候模式预测实践中, 为消除内部混沌过程的影响,

通常采用多个初值的集合预报方案。同理, 当我们利用历史相似估计模式误差时, 在大量的历史资料中往往也能找到多个与当前初值相似的历史初值, 进而得到多个模式误差的估计值, 它们代表着实际模式误差的各种可能分布。因此, 利用多个历史相似模式误差去估计实际的误差, 显然要比依赖单一历史相似时更为合理。且目前的月尺度相似动力试验也表明^[23~26], 当考虑多个历史相似时的确能够有效地提高预报效果。

3.2 方案设计

利用上述相似误差订正法的基本思想, 我们首先以国家气候中心 ENSO 预测系统中的 NCCo 简化海气耦合模式为试验平台, 建立了相应的动力-相似误差订正模式(DAEC), 以便探讨相似误差订正方法在跨季度-年际预测中应用的可能性。NC-Co 简化海气耦合模式^[32]是国家气候中心在 ZC87 模式^[33]的基础上改造发展形成的, 改变了一些计算函数, 建立了模式的前、后处理过程, 并采用了一个新初始化方案, 即在初始化过程中, 用观测值代替了模式模拟的海表温度异常和风应力异常。其中海洋模式垂直方向为 2.5 层, 水平范围是一个 (29°N~29°S, 124°E~80°W) 的矩形热带太平洋区域, 水平分辨率为 2.0°×0.5°经纬度。大气模式是一个水平范围可扩展到全球热带的 Gill 型浅水模式, 水平分辨率为 5.625°×2.0°经纬度。模式的积分时间步长是 10 天, 模式提供的预测变量主要包括热带太平洋海表温度距平和 Niño 3 指数(因篇幅限制本文将只给出 Niño 3 指数的预测结果)。另外, 本文中的模式初始场分别利用佛罗里达州立大学(FSU)提供的月平均海表风应力场、NCEP 整理的最优插值海表温度资料(oiisst, 1982~2004 年)和美国 CAC 的海温资料(1979~1981 年)。因目前 NCCo 模式业务预报中使用的海表温度资料是自 1979 年开始的, 为了能与业务预报的结果作对比, 本文上述资料的时间长度也取为 1979~2004 年, 与其保持一致。另外, 为便于对比, 本文对 NCCo 简化海气耦合模式和相应的 DAEC 模式均进行了 1979~2003 年共 25 年的回报试验。试验中模式均自每个月的中旬开始进行时效为 12 个月的预报, 共进行了 300 个回报试验, 其中 NCCo 模式的结果记为 CTRL, DAEC 模式的结果用 DAEC 表示。对于 DAEC 模式, 主要有如下几个影响因素需要考虑:

(1) 相似性判据: 进行相似误差订正之前, 需要从历史资料中选取若干个与初始场相似的历史相似样本。为了简单起见, 本文仅以历史样本与初值间的欧氏距离作为相似程度的判据 (这里称做 0 阶时间相似), 距离越小则表示样本之间越相似。

(2) 相似程度: 前文中已谈到对 ENSO 的预报问题, 由于涉及到海洋和大气两种分量的相互作用, 因此在选取历史相似样本时需要研究其相似性, 到底是该由海洋状态的相似 (部分相似), 还是由海洋和大气状态均相似 (全相似) 来表征才最好。本文中, 海洋的相似性通过海表温度来衡量, 而整个耦合系统的相似性则通过海表温度和风场共同表征。且为消除不同物理量单位的影响, 首先对资料进行了标准化。

(3) 误差重估周期 (RPE): 在本文发展的相似误差订正模式中需要在模式积分一段时间之后, 对模式变量添加“历史相似误差项” (也可看作是误差强迫项或张弛因子) 进行误差订正, 以减小由于误差累积而使模式发生的“漂移”。然而, 如何在模式积分过程中添加历史相似误差则需考虑如下因素的影响: 首先, 历史相似误差能否代表真实误差与我们可获得的历史相似样本质量的好坏有关。目前由于历史资料长度的限制, 我们若想找到一些理想的历史相似样本存在着相当大的困难^[34], 这意味着历史相似误差只能在某一有限的时段内和真实误差保持“相似”, 此时的相似误差可看作是真实误差的一种有效近似 (可参见图 1)。但在此时期之外, 由于相似误差与真实误差已不再相似, 再用其来估计真实误差显然并不合适。因此, 在动力相似预报中通常会在经过一定的时间间隔以后, 重新选取新的历史相似样本^[25, 26] 以便继续估算下一时段的模式误差, 此时相似更新的目的主要出于对相似持续能力的考虑。然而, 除了相似持续能力的影响, 我们还需考虑的是由于在积分过程中对模式变量添加了相似误差“强迫项”, 会迫使模式向这一“强迫源”适应, 使模式表现出新的演变特点, 从而将导致模式误差“演变行为”的改变, 因此在继续向模式中添加“误差强迫项”之前有必要依据新的模式状态对即将添加的“强迫项”进行重新估算。此时“重新估算”的目的则是为了适时调整“强迫源”使之适应模式状态的发展趋势 (因为此时误差估算所需的历史相似样本可能同初始的依然相同), 对于两

次误差订正的间隔这里称之为“误差重估周期” (RPE), 这种误差重估的办法实际上综合考虑了相似更新和误差订正的影响。另外, 对于海气耦合系统由于其存在着海洋和大气两种性质完全不同的流体介质, 因此还需研究如何配置两者的误差重估周期, 使得经过误差订正后的海气耦合模式能在保证整体协调的基础上, 通过自身的动力调整使模式状态更趋近于实况, 从而使预报效果达到最优。

(4) 误差的估计: 这里首先需要运行模式以获取历史相似初值在预报时段内的误差分布情况。此外, 由于我们采取了由多个历史相似样本去估计真实误差的办法, 因此还存在着如何由多个相似模式误差估计真实误差的问题, 为简单起见, 这里采用了一种与距离加权内插方法类似的相似离差加权方法来估计模式误差^[23]。而由于资料所限, 本文仅对模式中的海表温度和风应力两个变量进行订正, 显然这样做会在一定程度上影响结果的改善。

(5) 相似样本的选取: 一般来说, 选取相似时应挑选与初始场在同一季节的历史相似场, 但由于文中资料长度的限制我们将其扩展到相邻的季节中。同样, 由于资料的缘故, 本文进行 1979~2003 年的回报试验时, 历史相似样本的选取原则为: 首先, 从当前预报年以外的年份中依次选取各年中与当前初值间欧氏距离最小的样本作为“初级样本库”成员, 然后再从“初级样本库”中挑选出距离最小的前 M 个成员作为 DAEC 模式的相似样本成员。需要注意的是, 由于资料的限制, 这种依赖样本间的欧氏距离大小判断样本是否相似的方法可能会引入并不合适的样本, 如文献^[34]中就发现对于不同的环流类型它们与历史上最相似的环流类型间的欧氏距离的差别竟可达 1 倍以上, 这意味着若按某一严格的判断标准则在某些情况下会没有样本能满足相似的条件。因此, 在本文中为方便起见, 我们在寻找当前资料状况下存在的“真实相似样本”的个数以及探讨相似样本个数对预报效果的影响时, 主观地将 M 的取值范围设定为 $1 \sim N/3$ 个, N 为历史资料库的总年数, 文中 $N=24$, 故样本成员取在 $1 \sim 8$ 个之间共做 8 类试验。

另外, 为了能够清楚地体现 DAEC 方法的作用, 避免问题的复杂化, 文中所有结果均为模式直接输出结果而未对其再做任何后处理。

4 ENSO 动力相似误差订正模式回报试验

4.1 相似程度和误差重估周期的影响及 24 年回报结果

为便于结果分析,此节中我们仅以相似样本个数取为 6 个时的结果,分析相似程度和误差重估周期的影响,其余 7 组试验的结果因与之类似,故不再给出。我们首先给出了部分相似时(即海洋相似,记为 DAEC-P),不同海洋和大气误差重估周期(RPE)配置下,1979~2003 年共 300 个预报初值对 Niño 3 指数的平均预报效果,这里预报效果的评价仅以 6 个月和 12 个月预报时效的累积绝对误差来表示(表 1)。由表 1 可见,“部分相似”的情况下(DAEC-P),大气和海洋无论采用怎样的误差重估周期,其结果都优于控制试验(表略)。如控制试验中,6 个月累积误差为 5.51℃,12 个月达 13.55℃;而在 DAEC-P 试验中,6 个月的累积绝对误差在 4.66~5.33℃之间,12 个月则在 11.37~13.53℃之间。并且,由表 1 还可看出误差重估周期(RPE)对结果也有很大影响,其中大气的 RPE 越短预报误差越小,而海洋 RPE 越长(以不超过 30 天为好)则预报效果越好。若考虑整体预报效果,则不难发现大气和海洋的 RPE 分别为 10 天和 30 天时为最佳配置,此时模式预报效果最好。

若与“部分相似”(DAEC-P)的结果相比,则从表 2 中不难发现“全相似”(大气-海洋均相似,记作 DAEC-C)的预报误差更小,这表明“全相似”

标准能更合理地反映整个海气耦合系统的相似程度,因而其估计的模式误差更准确并导致预报误差的显著减小。为了说明这一情况,图 1 给出了一个具体的个例。图 1 中 NCCo 模式的初始场位于 1981 年 7 月第 2 旬,在系统“全相似”和“部分相似”标准下在历史资料中分别寻找与之对应的最为相似的历史相似初值。结果找到“全相似”标准下初值位于 1996 年 5 月第 1 旬,而“部分相似”的初值则在 1989 年 6 月第 3 旬。图 1 中的结果说明,

表 1 部分相似时在不同海洋、大气 RPE 下 300 个初值平均的 6 个月(12 个月)累积绝对误差(单位:℃)

Table 1 The mean accumulated errors (℃) over 6 and 12 (in parentheses) month periods for three hundred initial values under different combinations of oceanic and atmospheric RPE for the part analogue case

海洋 Oceanic RPE	大气 Atmospheric RPE		
	10 d	20 d	30 d
10 d	5.33 (13.53)		
20 d	4.90 (11.85)	5.11 (12.65)	
30 d	4.66 (11.37)	4.83 (11.91)	4.96 (12.08)

表 2 同表 1, 但为全相似标准时

Table 2 Same as Table 1, but for the comprehensive analogue case

海洋 Oceanic RPE	大气 Atmospheric RPE		
	10 d	20 d	30 d
10 d	4.96 (12.14)		
20 d	4.73 (11.37)	4.93 (11.70)	
30 d	4.75 (11.00)	4.81 (11.48)	5.00 (11.57)

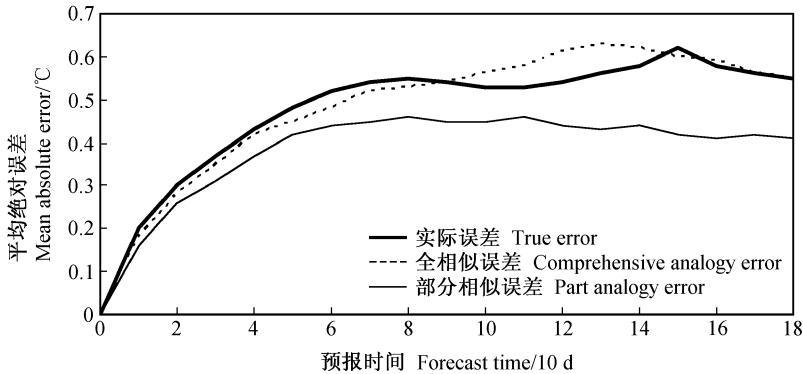


图 1 NCCo 模式热带太平洋地区海表温度预报不同相似误差与真实误差的对比(模式初值位于 1981 年 7 月 2 旬,全相似所选初值在 1996 年 5 月第 1 旬,部分相似在 1989 年 6 月第 3 旬)

Fig. 1 The contrast between the mean true forecasting errors and different analogy ones for SSTA of the tropical Pacific Ocean (29°S–29°N, 124°E–80°W) by the NCCo model (The current model initial value is in the 2nd dekad of Jun 1981, while the comprehensive initial value is in the 1st dekad of May 1996 and the part case is in the 3rd dekad of Jun 1989)

两种不同的相似初值所对应的预报误差在一段时间内与实际误差的演变特征确实十分相似,两者均可在一定程度上反映实际误差的特征。但就两种误差同真实情况的相似程度而言,“全相似”标准下的误差估计显然比“部分相似”的更接近真实误差。此外,就 RPE 的影响而言,其与“部分相似”时的影响基本相同,其最优的 RPE 配置也为海洋 30 天和大气 10 天。

通过上述试验,我们不难得到 DAEC 模式在这两种不同的相似程度下,大气和海洋 RPE 参数的最佳组合。基于上述最佳控制参数组合,本文将进一步对比它们在 1980~2003 年内的回报效果。其中“部分相似”时 RPE 参数取大气 10 天,海洋 30 天,结果记作 DAEC-P;“全相似”时 RPE 同样取大气为 10 天,海洋为 30 天,记做 DAEC-C。

首先,计算了 1980~2003 年共 24 年回报的 Niño 3 指数的距平相关系数和平均绝对误差随预报时效的变化。由图 2a 可见,DAEC-P 和 DAEC-C 在 12 个月的预报时效内误差均要小于控制试验(CTRL)。例如,对控制试验其在第 12 个月时误差达 1.39℃,而 DAEC-P 和 DAEC-C 则分别为 1.15℃和 1.02℃。再对比 DAEC-C 和 DAEC-P 的结果,则可以发现前者的预报技巧要明显高于后者(虽然此例中后者在前 6 个月的预报效果略高于前者),特别是

经计算后,我们发现前者 12 个月的累计误差较控制试验可减小 20.0%,而后者只能减少 16.8%(表略)。

对于距平相关系数(图 2b),同样发现 DAEC 模式的结果在 9~12 个月的预报时段内都明显高于控制试验。如在 6 个月时,控制试验的相关系数只有 0.17 左右,而 DAEC 的结果则均在 0.3 以上。再对比 DAEC-C 和 DAEC-P 的结果,则可发现前者在 12 个月的预报时段内相关系数都高于控制试验,而后者只有 9 个月左右。

4.2 相似样本数的估计及其影响

上述研究表明,“全相似”标准更能合理反映耦合系统的相似程度,故我们将其作为 DAEC 模式中相似程度参数的标准设置,以便进一步开展对其他问题的讨论。实际上,DAEC 模式能否有效地减小模式误差并改善其预报性能,一个关键性的问题在于它能从历史资料中获得多少有关实际误差的信息。而信息量的多少在一定程度上将取决于相似样本的数目,然而在当前的资料状况下我们究竟能获得多少真实的相似样本?并且预报效果的好坏与相似样本的取样数目之间又存在着怎样的联系?为解决这些问题,本文首先将通过下述指标来考察当前资料中真实相似样本的存在情况,此后将进一步讨论 DAEC 模式预报结果与相似样本取样个数间的联系:

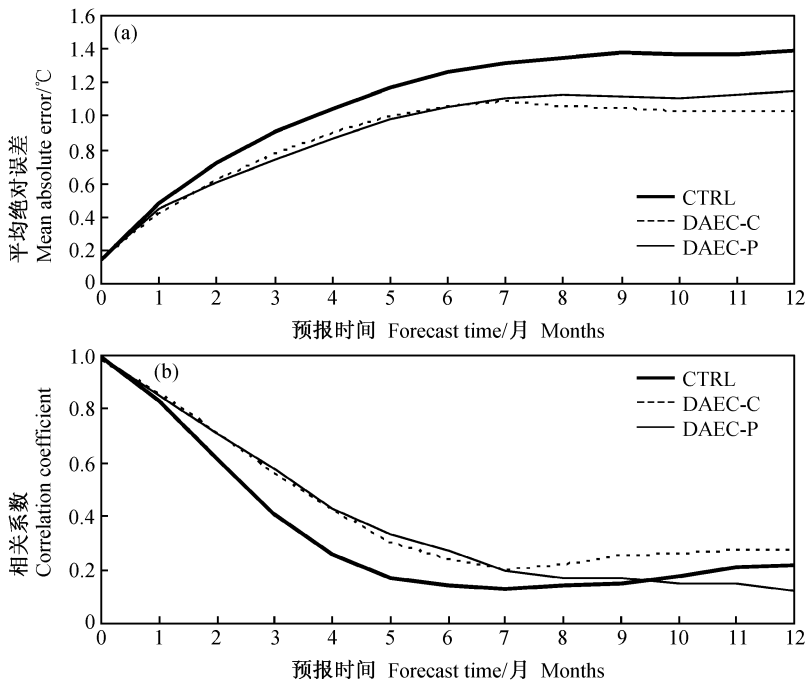


图2 1980~2003年 Niño 3 指数预报随时间的变化:(a) 平均绝对误差;(b) 距平相关系数

Fig. 2 The predicted Niño 3 index with lead times for the 1980-2003 period: (a) The mean absolute errors; (b) the correlation coefficient

$$R_i = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K r_{i,j}$$

为 DAEC 模式取 i 个样本对 1980~2003 年进行回报时, $K=6$ 种误差重估周期配置下 (参见表 1、2), Niño 3 指数预报的平均相关系数。

$$E_i = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K e_{i,j}$$

为 K 种误差重估周期配置下 Niño 3 指数预报的平均绝对误差。

图 3 给出了 R 和 E 随样本取样数目变化的情况, 由图可见, 当取样个数小于 5 个时, 随着样本数的增加距平相关系数从 0.38 逐渐增大到 0.40 左右, 误差则从 12.4℃ 迅速减少到 11.45℃ 左右。但当样本数大于 5 个时, 相关系数迅速减小, 同时误差迅速增加且变化很不稳定。这表明在本文所使用的 24 年历史资料中, 整体而言至多存在 5 个真实的相似样本, 在这 5 个相似样本中随着取样个数的逐渐增加, 可获取的误差信息亦逐渐增多, 从而使模式预报性能逐渐得到改善。而当样本取样数大于 5 个时, 由于混入了实质上并不相似的样本 (伪相

似样本), 从而将一部分虚假的模式误差信息混入了真实信息中, 导致模式预报性能下降。

由上述结果, 我们不难发现当相似样本个数取为 5 个时, 其试验结果要明显好于其余 7 组。而经更进一步的分析后, 我们还发现当误差重估周期参数取为海洋 20 天、大气 10 天时, 此时的结果在同类中又是最好的 (表略)。因此基于上述参数设置, 本文给出了 DAEC 模式和 NCCo 模式 (即控制试验) 对 1980~2003 年 Niño 3 指数的回报结果。由图 4 可见, 相对于控制试验 DAEC 模式的结果在整个预报时段内都好于前者。特别是对提前 10 个月以后的预报 DAEC 模式的相关系数保持在 0.4 左右, 而控制试验只有其一半左右。就误差而言, 此时控制试验已达 1.4℃ 左右, 但 DAEC 稳定在 0.9℃ 左右。此外, 本文还统计了两者在 12 个月预报时段内的平均预报效果 (表略), 结果表明控制试验的平均相关系数在 0.29 左右, 累计绝对误差为 13.78℃, 而 DAEC 模式则分别是 0.45 和 10.69℃。相比之下, DAEC 模式的距平相关系数提高了约 54.7%, 而累计误差则减少了约 25%。

4.3 回报个例

4.3.1 1997/1998 年 El Niño 事件的回报对比

1997/1998 年发生了 20 世纪最暖的一次 El Niño 事件, 作为一种极端气候事件, DAEC 模式若想从历史资料中提取有效信息, 是具有一定难度的, 那么实际中 DAEC 模式是否具有一定的预报能力? 对此我们将进一步加以分析。

与文献[35]类似, 我们将此次 El Niño 事件也分为: (1) 前兆-爆发阶段; (2) 发展-转换阶段; (3) 成熟-衰亡阶段, 其中模式初值分布在上述不同阶段。在前兆-爆发阶段 (图 5a、b), DAEC 模式可提前 8~10 个月左右预报出暖事件的发展趋势, 而原模式的预报几乎是失败的, 基本不能提供什么有效的信息。而在发展-转换 (图 5c、d) 和成熟-衰亡 (图 5e、f) 阶段, 不难发现两种模式均能较为准确地预报出暖事件未来的发展形势, 两者的预报技巧基本相当。

因此, 就此次暖事件发展的不同阶段来看, DAEC 模式的预报技巧要高于原模式, 对于这次极端事件依然能够从有限的历史信息中捕捉到模式误差的真实信息, 从而在一定程度上提升了原有模式的预报性能。

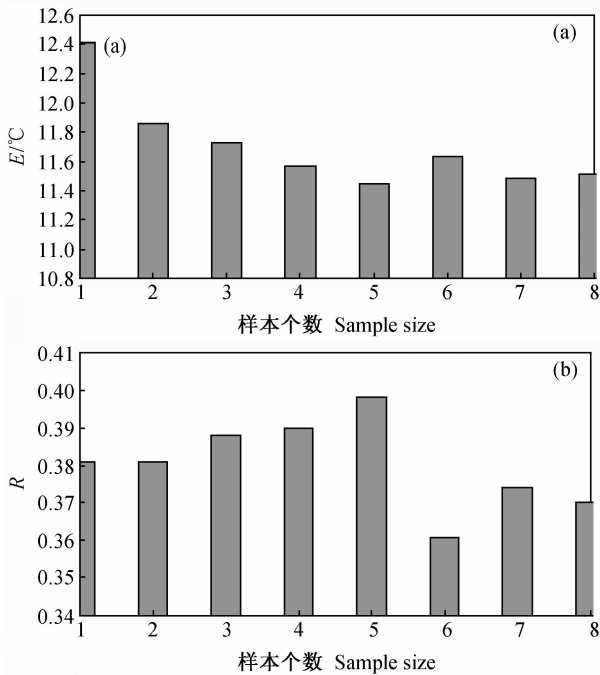


图 3 1980~2003 年 Niño 3 指数预报随样本个数变化的情况: (a) 平均绝对误差 E ; (b) 平均距平相关系数 R
Fig. 3 The Niño 3 index prediction with the change of sample sizes for the 1980 - 2003 period: (a) The mean absolute errors E ; (b) the mean correlation coefficient R

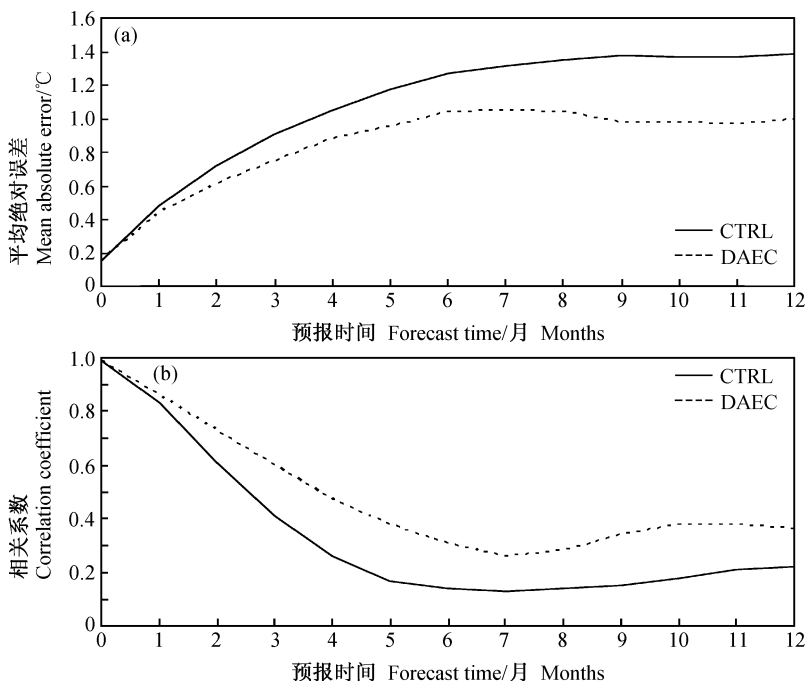


图4 1980~2003年 Niño 3 指数预报随预报时效的变化: (a) 平均绝对误差; (b) 相关系数。DAEC 模式参数为 5 个相似样本, 误差重估周期为海洋 20 天、大气 10 天

Fig. 4 The predicted Niño 3 index with lead times for the 1980–2003 period: (a) The mean absolute errors; (b) the correlation coefficient. The parameters in the DAEC model are 5 analogy samples, and the re-estimate period of error (RPE) is 20 days for the ocean model and 10 days for the atmosphere model

4.3.2 1999/2000 年 La Niña 事件

有不少研究都曾指出 Z-C 模式对冷事件的预测能力要明显弱于其对暖事件的预测能力, 那么 DAEC 模式的性能如何? 现以 1999/2000 年间的 La Niña 事件为例加以分析。

1999/2000 年间的 La Niña 事件是 20 世纪 90 年代以来最强的一次冷事件, 图 6 中给出了两种模式初值分别以 1998 年 1~6 月和 1998 年 7~12 月两个不同时期为预报起始月的预报结果。当模式初值位于 1998 年 1~6 月间时, 由图 6a、b 中不难看出此时原模式和 DAEC 模式均能很好的预报出 Niño 3 区海温向冷位相发展的趋势, 而 DAEC 模式预报的 Niño 3 指数要更为接近实况。但对初值位于 1998 年 7~12 月间的预报, 原模式已基本丧失了对此次冷事件后期发展形势的把握, 预报结果显示 Niño 3 区海温将向暖位相发展, 与实际情况相反。而对于 DAEC 模式, 其结果表明未来一年内 Niño 3 区海温依旧会处于冷位相阶, La Niña 事件可能会继续发展。由此可见, 对于此次 La Niña 事件 DAEC 模式在不同时期的预报与原模式相比预报技巧也都有着一定程度的提高。此外, 我们还进

一步检验了两种模式对 2002~2003 年间的 El Niño 事件的预报结果, 令人遗憾的是两者的结果均不理想, 具体原因尚有待于进一步的分析 (因篇幅所限, 本文不讨论)。

综上所述, 就目前结果看来这种基于历史相似的模式误差订正方法可在一定程度上减少预报误差, 改善模式预报性能, 然而, 我们也应清楚地意识到, 虽然该方法的应用已初步表现出令人鼓舞的一面, 但目前的结果依然不够理想。究其原因, 一方面同本文所使用的资料样本长度较短, 难以找到理想的历史相似样本有关 (这方面的改进工作将在以后的工作中给出), 另一方面, 也与我们进行模式误差订正时, 由于资料的限制目前只能对部分变量进行订正, 从而在一定程度上破坏了模式的内在协调性^[36]有很大关系。

5 结论与讨论

为了在短期气候动力预测领域, 既充分利用目前动力学发展的成就, 又能充分利用长时间历史资料的有利信息。本文利用一种基于历史相似的模式误差订正方法, 以 NCC 简化海气耦合模式为平台

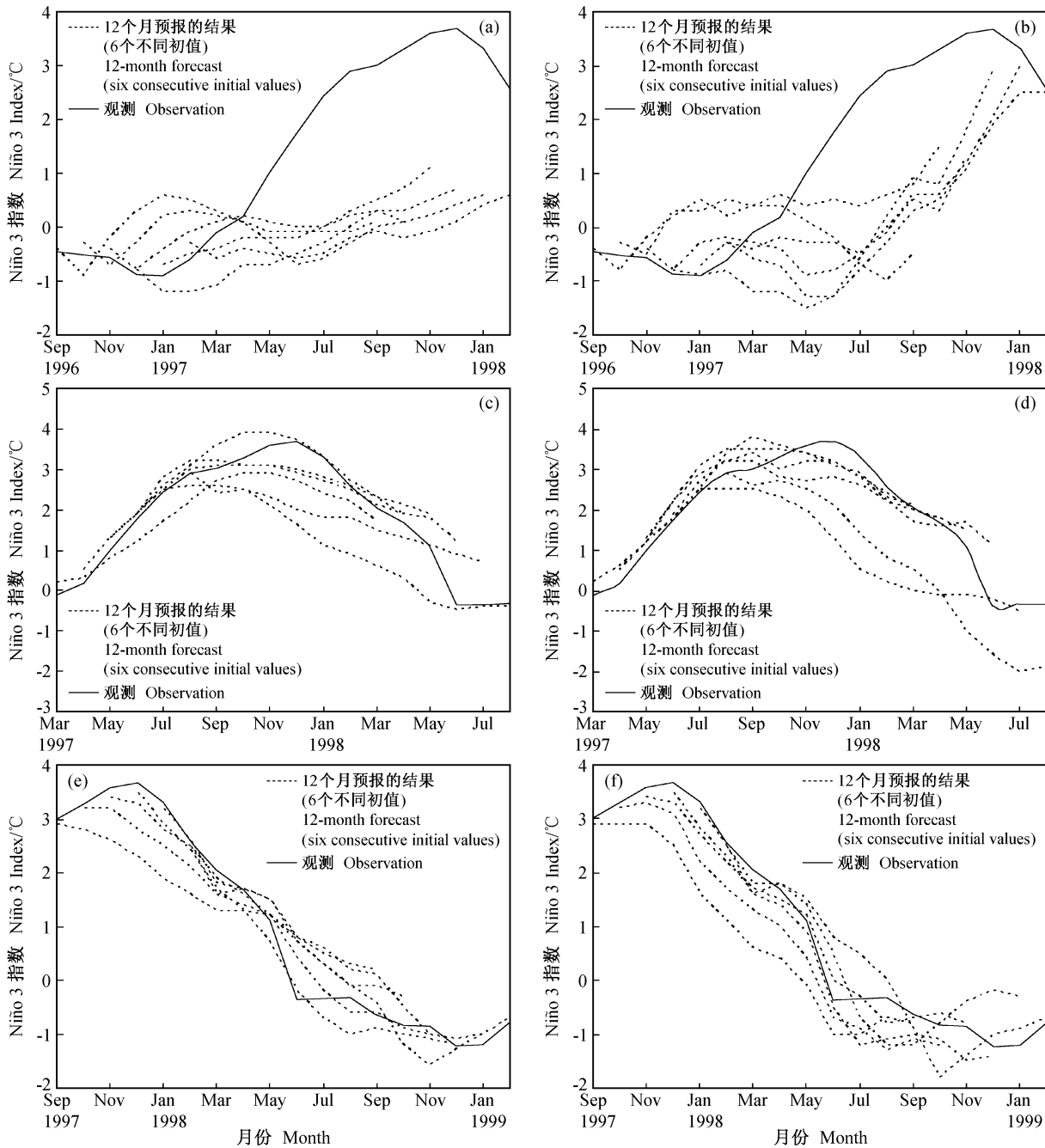


图 5 1997/1998 年 El Niño 事件模式 CTRL (a、c、e) 和 DAEC (b、d、f) 对不同发展阶段 Niño 3 指数的回报结果:(a、b) 前兆-爆发阶段;(c、d) 发展-转换阶段;(e、f) 成熟-衰亡阶段

Fig. 5 Niño 3 index observed and predicted by CTRL (a, c, e) and DAEC (b, d, f) in the different phases of 1997/98 El Niño event: (a, b) The antecedent and onset phase; (c, d) the development and transition phase; (e, f) the mature and decay phase

构建了相应的相似误差订正模式，并初步探讨了相似程度、误差重估周期、相似样本个数等因素对预报结果的影响。结果表明，在 ENSO 预测中无论是在全相似（大气-海温全相似）还是部分相似（仅海洋相似）的情况下，该方法均能有效地降低预报误

差提高预报准确率，但全相似较部分相似结果更佳。这也表明全相似能更合理地反映海-气耦合系统的相似状态，从而更为准确地估计模式误差的真实特征。通过对误差重估周期的讨论，我们发现海洋和大气的误差重估周期对结果也均有较大影响，

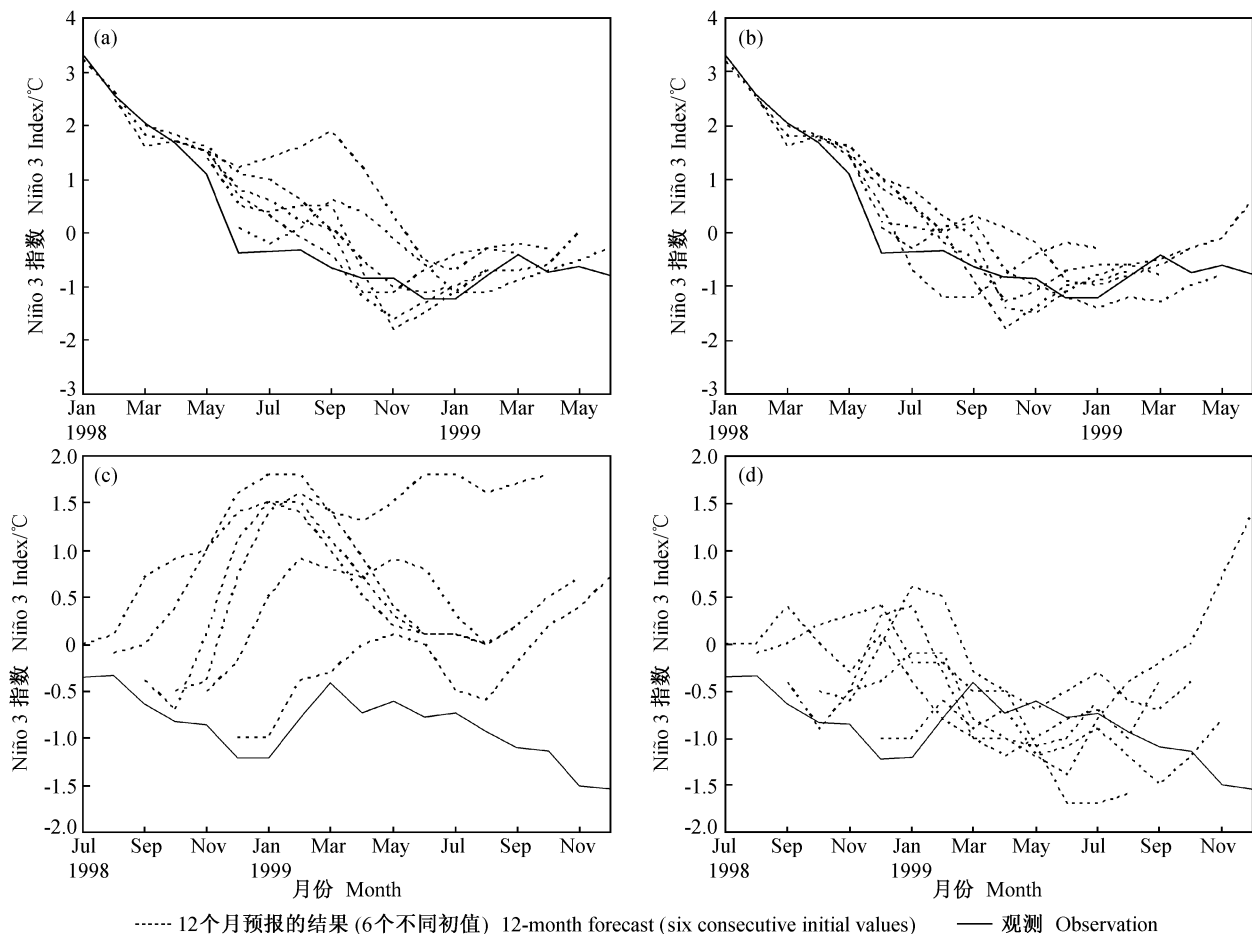


图 6 1999/2000 年 La Niña 事件模式 CTRL (a, c) 和 DAEC (b, d) 对不同阶段 Niño 3 指数的回报结果: (a, b) 初值为 1998 年 1~6 月; (c, d) 初值为 1998 年 7~12 月

Fig. 6 Niño 3 index observed and predicted by CTRL (a, c) and DAEC (b, d) in the different phases of 1999/2000 La Niña event: (a, b) The initial values are from Jan to Jun 1998; (c, d) the initial values are from Jul to Dec 1998

在不同相似程度下分别存在着某种最优配置,使得预报效果达到最优。而进一步对相似样本存在状况及其影响的研究,则发现当前资料长度下整体只存在着有限个相似样本,在此范围内随着取样数目的增加,模式预报性能会随之提高。

上述研究实际上仅考虑了系统相似程度、误差更新周期和相似样本取样个数对 ENSO 预报效果的影响,然而不同的相似性判据、误差估计方法对预报结果又有怎样的影响?在同样的资料状况下,DAEC 模式对预报的改善效果究竟会在多大程度上受模式误差的影响?这些问题还有待在以后的工作中进一步分析和讨论。

致谢 在本文完成过程中,丑纪范院士提出了许多宝贵的意见,李清泉、赵宗慈研究员和李威也提供了很多无私的帮助。另外,本文在修改过程中审稿专家也提出了诸多有益的建议,作者在此表示由

衷的感谢。

参考文献 (References)

- [1] 顾震潮. 天气数值预报中过去资料的使用问题. 气象学报, 1958, **29** (3): 176~184
Gu Zhenchao. The use of past data in numerical weather forecast. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 1958, **29** (3): 176~184
- [2] 郑庆林, 杜行远. 使用多时刻观测资料的数值天气预报新模式. 中国科学, 1973, (2): 289~297
Zheng Qinglin, Du Xingyuan. A new model of numerical weather prediction by using multi-time observed data. *Scientia Sinica* (in Chinese), 1973, (2): 289~297
- [3] 丑纪范. 天气数值预报中使用过去资料的问题. 中国科学, 1974, **17** (6): 814~825
Chou Jifan. A problem of using past data in numerical weather prediction. *Scientia Sinica*, 1974, (6): 635~644
- [4] 黄建平, 王绍武. 相似-动力模式的季节预报试验. 中国科学

- (B 辑), 1991, **21** (2): 216~224
- Huang Jianping, Wang Shaowu. The experiment of seasonal prediction using the analogy-dynamical model. *Science in China* (Series B), 1992, **35**(2): 207~216
- [5] Huang Jianping, Yi Yuhong, Wang Shaowu, et al. An analogue-dynamical long-range numerical weather prediction system incorporating historical evolution. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1993, **119**: 547~565
- [6] 曹鸿兴. 大气运动的自忆性方程. 中国科学(B 辑), 1993, **23** (1): 104~112
- Cao Hongxing. Self-memorization equation in atmospheric motion. *Science in China* (Series B), 1993, **36** (7): 845~855
- [7] 曹鸿兴, 蒋维东, William G J. 自忆谱模式及其初步应用. 大气科学, 1998, **22** (1): 119~126
- Cao Hongxing, Jiang Weidong, William G J. Self-Memory spectral model and its preliminary application. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1998, **22** (1): 119~216
- [8] 谷湘潜. 一个基于大气自忆原理的谱模式. 科学通报, 1998, **43** (9): 909~917
- Gu Xiangqian. A spectral model based on atmospheric self-memorization principle. *Chinese Science Bulletin*, 1998, **43** (20): 1113~1116
- [9] Glowacki T J. Statistical corrections to dynamical model predictions. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**: 2614~2628
- [10] Zeng Qingcun, Zhang Banglin, Yuan Chongguang, et al. A note on some methods suitable for verifying and correcting the prediction of climate anomaly. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1994, **11** (2): 121~127
- [11] Barnston A G., Smith T M. Specification and prediction of global surface temperature and precipitation from global SST using CCA. *J. Climate*, 1996, **9**: 2660~2697
- [12] Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Li Xu, et al. Seasonal and extraseasonal prediction of summer monsoon precipitation by GCMs. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, **14**: 163~176
- [13] Feddersen H, Navarra A, Ward M N. Reduction of model systemic error by statistical correction for dynamical seasonal prediction. *J. Climate*, 1999, **12**: 1974~1989
- [14] Yang X Q, Anderson J L. Correction of systematic errors in coupled GCM forecasts. *J. Climate*, 2000, **13** (12): 2072~2085
- [15] 曾庆存, 林朝晖, 周广庆. 跨季度动力气候预测系统 IAP DCP- II. 大气科学, 2003, **27** (3): 289~303
- Zeng Qingcun, Lin Zhaohui, Zhou Guangqing. Dynamical extraseasonal climate prediction system IAP DCP2 II. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (3): 289~303
- [16] Chen Hong, Lin Zhaohui. A correction method suitable for dynamical seasonal prediction. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, **23** (3): 425~430
- [17] 邵吉东, 丑纪范. 数值天气预报中的两类反问题及一种数值解法——理想试验. 气象学报, 1994, **52** (2): 129~137
- Gao Jidong, Chou Jifan. Two kinds of inverse problems in NWP and a numerical method——ideal field experiment. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, **52** (2): 129~137
- [18] 范新岗, 丑纪范. 提为反问题的数值预报方法与试验 I: 三类反问题及数值解法. 大气科学, 1999, **23** (5): 543~550
- Fan Xingang, Chou Jifan. Methods and experiments of numerical prediction raised as inverse problem. Part I: Three kinds of inverse problems and numerical solutions. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (5): 543~550
- [19] 邱崇践, 丑纪范. 改进数值天气预报的一个新途径. 中国科学(B 辑), 1987, (8): 903~910.
- Qiu Chongjian, Chou Jifan. A new approach to improve the numerical weather prediction. *Science in China* (Series B) (in Chinese), 1987, (8): 903~910
- [20] 邱崇践, 丑纪范. 预报模式识别的扰动方法. 大气科学, 1988, **12** (3): 225~232
- Qiu Chongjian, Chou Jifan. A perturbation method of model recognition of numerical weather prediction. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 1988, **12** (3): 225~232
- [21] 邱崇践, 丑纪范. 预报模式的参数优化方法. 中国科学(B 辑), 1990, **20** (2): 218~224
- Qiu Chongjian, Chou Jifan. The method of optimizing parameterization in numerical prediction model. *Science in China* (Series B) (in Chinese), 1990, **20** (2): 218~224
- [22] Andrea F D, Vautard R. Reducing systematic errors by empirically correcting model errors. *Tellus*, 2000, **52A**: 21~41
- [23] 任宏利, 丑纪范. 统计动力相结合的相似误差订正法. 气象学报, 2005, **63** (6): 988~993
- Ren Hongli, Chou Jifan. Analogue correction method of errors by combining both statistical and dynamical methods together. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (6): 988~993
- [24] 鲍名, 倪允琪, 丑纪范. 相似-动力模式的月平均环流预报试验. 科学通报, 2004, **49** (11): 1112~1115
- Bao Ming, Ni Yunqi, Chou Jifan. The experiment of monthly mean circulation prediction using the analogy-dynamic model. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49** (12): 1296~1300
- [25] 任宏利, 张培群, 李维京, 等. 基于多个参考态更新的动力相似预报方法及应用. 物理学报, 2006 (待刊)
- Ren Hongli, Zhang Peiqun, Li Weijing, et al. A new method of dynamical analogue prediction based on multi-reference-state updating and its application. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2006, in press

- [26] 任宏利, 丑纪范. 在动力相似预报中引入多个参考态的更新. 气象学报, 2006 (待刊)
Ren Hongli, Chou Jifan. Updating of multi-reference states introduced in dynamical analogue prediction. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), in press
- [27] Pielke R A. Climate prediction as an initial value problem. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, **79**: 2743~2746
- [28] Palmer T N. A nonlinear dynamical perspective on climate prediction. *J. Climate*, 1999, **12**: 575~591
- [29] Pielke R A, Liston G E, Eastman J L, et al. Seasonal weather prediction as an initial value problem. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 19463~19478
- [30] Lorenz E N. Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues. *J. Atmos. Sci.*, 1969, **26**: 636~646
- [31] Buizza R, Miller M, Palmer T N. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF EPS. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, **125**: 2887~2908
- [32] 李清泉, 赵宗慈. NCC 简化海气模式的建立和数值模拟. 气象学报, 2000, **58**: 790~803
Li Qingquan, Zhao Zongci. The development of NCC intermediate ocean-atmosphere coupled model and its numerical simulation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58**: 790~803
- [33] Zebiak S E, Cane M A. A model El Niño–Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 2262~2278
- [34] Van den Dool H M. Searching for analogues, how long must we wait? *Tellus*, 1994, **46A**: 314~324
- [35] 岳彩军, 陆维松, 李清泉. 初始强迫风场对 Zebiak-Cane 海气耦合模式预报能力的影响研究. 热带气象学报, 2005, **21**: 506~516
Yue Caijun, Lu weisong, Li Qingquan. The effect of initialization impact wind on Zebiak-Cane coupled ocean-atmosphere model predictability. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2005, **21**: 506~516
- [36] Klinker E, Sardeshmukh P D. The diagnosis of mechanical dissipation in the atmosphere from large-scale balance requirements. *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**: 608~627