

李维京, 郑志海, 孙丞虎. 2013. 近年来我国短期气候预测中动力相似预测方法研究与应用进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 341–350, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12311. Li Weijing, Zheng Zhihai, Sun Chenghu. 2013. Improvements to dynamical analogue climate prediction method in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 341–350.

近年来我国短期气候预测中动力相似预测方法 研究与应用进展

李维京 郑志海 孙丞虎

国家气候中心, 北京 100081

摘 要 鉴于当前短期气候预测中, 纯粹使用动力学方法尚不能完全满足气候预测业务的需要, 因此有必要在策略上采取动力和统计相结合的办法。在具体实现手段上, 简要介绍了从历史资料中提炼预测信息, 发展了一种基于历史相似误差订正的相似—动力短期气候预测新方法。分别在月、季节以及 ENSO 等短期气候预测领域相继开展了试验和应用, 取得了一些令人鼓舞的初步结果, 为下一步深入开展有关短期气候预测科学的研究提供了些许借鉴。

关键词 短期气候预测 动力相似 预报误差

文章编号 1006-9895(2013)02-0341-10

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12311

Improvements to dynamical analogue climate prediction method in China

LI Weijing, ZHENG Zhihai, and SUN Chenghu

National Climate Center, Beijing 100081

Abstract Because the dynamical climate prediction model is ineffective for skillful forecasting on a weekly to intra-annual scale in the East Asia region, the combination of a dynamical and statistical prediction method has been suggested as an optimal strategy. To realize the technique, a forecasting error correction method by utilizing historical analogue information was developed in China. The current applications show that this new method can significantly improve prediction skill in extended range, monthly, seasonal, and El Niño–Southern Oscillation (ENSO) prediction and hence have encouraged us to further explore operational applications for this method in the future.

Keywords Short-range climate prediction, Dynamical analogue, Forecasting error

1 引言

我国受到东亚季风气候影响, 气候年际变化大, 旱涝灾害频繁发生, 短期气候预测成为气象业务的重点工作内容之一。但是, 在东亚气候区, 短期气候预测业务的预测能力十分有限, 我国降水的短期预测业务水平基本上在 60%~70% (国家气候中心预报评分 (PS 评分)), 长江流域降水的预测正

确率也基本在 50% 左右。究其原因, 主要是目前气候预测中使用的国内外各种气候模式的可预测性, 基本上可信度高的存在于热带地区, 在东亚季风区等热带外地区预测技巧尤其低下 (王会军, 1997), 这也是目前短期气候业务预测水平不高的根本科学原因。

鉴于单纯依赖统计方法或动力模式进行气候预测, 尚不能从根本上满足东亚地区短期气候预测

收稿日期 2012-10-13, 2012-11-15 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2013CB430200、2010CB950501, 国家自然科学基金资助项目 41105070

作者简介 李维京, 男, 1955 年出生, 研究员, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: liwj@cma.gov.cn

业务的要求,人们开始考虑采用统计—动力相结合的预测策略来弥补统计方法和动力学方法各自的不足。在诸多的气候预测方法中,着眼于大气和海洋中广泛存在的相似性,利用自然历史相似进行未来天气和气候演变的预报,是一个经典实用的可行方法。在天气预报和短期气候预测中曾得到广泛的采用(Barnett and Preisendorfer, 1978; Livezey, 1994; Van den Dool, 1994)。在我国相似预报策略的发展上,并没有局限于纯粹统计相似预报领域,而是提出可以将统计相似和动力模式预测结合起来,发展动力相似预报的策略,如丑纪范(1979)提出可以把要预报的场视为叠加在历史相似上的一个小扰动,就可以把天气学统计相似预报的预报经验吸收到数值预报中来。此后,基于简化气候模式的相似—动力模式被陆续发展起来(邱崇践和丑纪范, 1989; 黄建平和王绍武, 1991; Huang et al., 1993)。近几年以来,为了能够利用复杂气候模式实现动力相似预报策略,丑纪范先生带领的课题组(鲍名等, 2004; 任宏利和丑纪范, 2005; 郑志海等, 2009)进一步提出了从历史相似的层面估计依环流型而变的模式预报误差,将相似—动力模式的研发问题转化为相似预报误差的订正问题,基本实现了将传统相似预报策略扩展到延伸期、月、季节到年际气候预测领域。目前的试验表明,这种新方法对气候预测准确率有明显提高,比起传统统计相似预报也更有发展和应用前景。

2 相似误差订正理论与方法

传统的动力相似预报方法,由于需要将数值模式改写为以历史相似为基本态的“相似扰动模式”,在实际应用上困难颇多。为此,丑纪范从应用层面提出:如果采用利用动力模式历史回报的预报误差信息推断未来预报误差倾向的办法,即可将相似预报模式的研发问题,转化为数值模式误差的预估问题,把统计预报的优势应用到动力数值模式改进上来。

它的基本原理简述如下:数值天气预报是一初边值问题,数值模式可表示为 $\psi_T = M(\psi_0)$,其中 $\psi_0 \in R^n$ 为初始时刻 t_0 的近似真实的观测场, $\psi_T \in R^n$ 为 T 时刻的预报场, M 为非线性数值模式。数值模式 M 只是实际大气真实演变过程(记为 H)的近似,模式误差(记为 E)来源于 M 与 H 之间的差异,它也是初值的函数,即:

$$E(\psi_0) = H(\psi_0) - M(\psi_0). \quad (1)$$

对数值模式而言,误差项中既包含了模式本身缺陷所导致的误差,也包含了初边值条件中的误差和信息不足。针对预报误差,从反问题的角度出发减小数值模式的预报误差,将模式变量的预报问题转化为数值模式误差项的预报问题,发展并提出了一种可应用于复杂模式的相似—动力方法(邱崇践和丑纪范, 1989; 黄建平和王绍武, 1991; Huang et al., 1993; 鲍名等, 2004; 任宏利和丑纪范, 2005)利用历史上与当前初值相似的预报误差项估计预报中未知的误差项 E 。通过将当前的初始场 ψ_0 看成是历史相似上的一个小扰动, $\psi_0 = \tilde{\psi}_i + \psi'_i$,同时 $\|\psi'_i\| \ll \|\psi_0\|$ 。将历史相似参考态 $\tilde{\psi}_i$ 代入(1)式,有:

$$E(\tilde{\psi}_i) = H(\tilde{\psi}_i) - M(\tilde{\psi}_i) \quad (2)$$

其中, $H(\tilde{\psi}_i)$ 为第 i 个相似参考态的实际演变,即观测实况,这部分是已知的, $M(\tilde{\psi}_i)$ 为模式预报,它可通过数值模式计算获得,也是已知的。因此,可计算出相似参考态的预报误差 $E(\tilde{\psi}_i)$ 。由于 ψ_0 与 $\tilde{\psi}_i$ 非常接近,可以将 $E(\tilde{\psi}_i)$ 在 ψ_0 附近进行一阶 Taylor 展开,并且当 $\|\psi'_i\|$ 足够小时有:

$$E(\tilde{\psi}_i) = E(\psi_0 - \psi'_i) \approx E(\psi_0) - \psi'_i \left. \frac{\partial E}{\partial \psi} \right|_{\psi=\psi_0} \quad (3)$$

可从大量的历史资料中寻找找到 k 个非常接近的历史相似,则有:

$$E(\psi_0) \approx \frac{1}{A} \sum_{i=1}^k a_i E(\tilde{\psi}_i) + \frac{1}{A} \left. \frac{\partial E}{\partial \psi} \right|_{\psi=\psi_0} \sum_{i=1}^k a_i \psi'_i, \quad (4)$$

式中 a_i 为根据相似程度所确定的权重,其中 $A = \sum_{i=1}^k a_i$ 。当 $\sum_{i=1}^k a_i \psi'_i$ 尽可能小的情况下:

$$E(\psi_0) \approx \frac{1}{A} \sum_{i=1}^k a_i E(\tilde{\psi}_i), \quad (5)$$

相当于用历史相似对应的预报误差信息来估计当前的预报误差。该方法的优点是:不需重新建立相似预报数值模式,即可实现对历史相似信息的利用。它不但考虑了模式的系统性误差,还包含了与相似初值相近环流型的模式误差演变信息,且不涉及预报误差与模式变量具体的函数形式,避免了直接建立预报误差与模式变量统计联系的困难,具有良好的可移植性(Ren et al., 2009; 郑志海, 2010)。

3 延伸期一月气候预测中的应用

目前,世界上主要的数值预报中心均在试图进行有技巧的延伸期一月预报。中短期天气预报本质上是一个初值问题,海温等外强迫可简单地认为是

持续不变的，而季—年际尺度的可预报性则主要来自地球系统中的慢变分量，如海表温度（SST）、雪盖、土壤湿度等，属于边值问题。延伸期一月气候预测与其它尺度的预测有很大的不同，它处于中期天气预报和季—年际预报之间，初始场的信息随着预报时效的增长而逐渐减弱，以 SST 为代表的外强迫所起的作用也没完全显现，因此，它既是初值问题，也是边值问题，这在理论上决定了该时间尺度的预报非常困难。

为了提高国家气候中心的月尺度气候预测水平，鲍名等（2004）探索相似误差订正方法，在国家气候中心 T63 复杂业务模式中的试验，初步显示出这一方法对月平均环流预报技巧改进的可行性。随后，任宏利和丑纪范（2005，2006，2007）、任宏利等（2006）进一步提出可以考虑误差订正时相似的更新和多个相似态的问题，并发展了一种考虑多相似态更新的方法。对于这一方法，表 1 给出了其在北半球热带外地区 31 个个例中冬、夏半年月平均 500 hPa 高度场的预报评分情况。可以看到，冬半年的预报技巧明显高于夏半年，大约有 0.1 的差距，相似误差订正方法（ADEF）在冬半年距平相关系数（ACC）超过了 0.5 的业务可用最低标准，这一结果是令人振奋的，说明它具有业务应用前景；即便是夏半年 ACC，也有参考意义，这比现在气候预测业务平均要明显提高，气候业务预测结果（OPRF）无论在冬半年或夏半年的预报技巧都比 ADEF 的距平相关系数低 0.1。对于均方根误差（RMSE）的比较，ADEF 在冬半年可比 OPRF 减小约 20 个 gpm，这是很显著的预报效果，夏半年

改善相对小些。

表 1 北半球热带外地区 31 个个例中冬、夏半年月平均 500 hPa 高度场的距平相关系数（ACC）和均方根误差（RMSE）评分（任宏利，2006）

Table 1 The 31 cases anomaly correlation coefficients (ACCs) and root mean square errors (RMSEs) of the monthly mean forecast and the real observation of 500-hPa height field for northern hemispheric extratropics (Ren, 2006)

预报方案	冬半年 (10月20日 至次年3月20日)		夏半年 (4月20日 至9月20日)	
	ACC	RMSE (gpm)	ACC	RMSE (gpm)
OPRF	0.420	60.21	0.321	40.82
ADEF	0.520	41.58	0.425	32.85
ADEF-OPRF	0.100	-18.63	0.104	-7.97

图 1 进一步给出了 31 个个例的北半球热带外地区 500 hPa 高度场月平均预报 ACC 评分比较，可以看到，除了极个别情况外，ADEF 性能相对比较稳定，ACC 低于 0.3 的只有 5 例，低于 0.2 的只有 1 例。对于很多 OPRF 结果很差的个例，ADEF 的效果仍较好，但也存在二者预报都很差的个例，例如，2005 年 10 月 20 日的月平均环流预报就是失败的。而且，各个成员的 ACC 分布差别是很大的，有的甚至小于 0，在集合平均与离散度之间未看出必然联系。另外，由于 2005 年夏季以来，OPRF 集合成员由 32 个增加到 40 个，并且去掉了提前 40 天预报的后 30 天月预报集合成员，使其预报效果相比于以前的改善也比较明显。

图 2 展示了 31 个个例的北半球热带外地区 500 hPa 高度场月平均预报 RMSE 评分比较，可以看到，

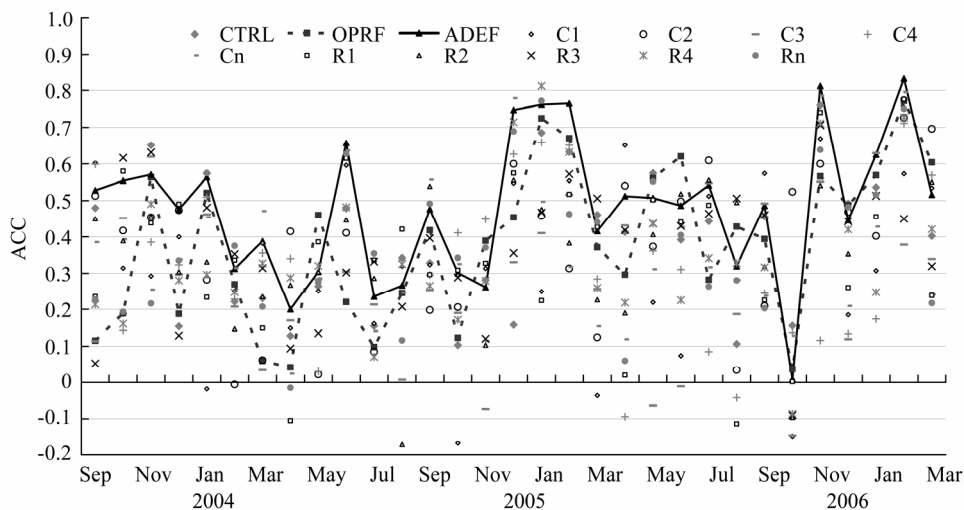


图 1 对北半球热带外地区 31 个月平均 500 hPa 高度场预报的 ACC 评分（任宏利，2006）

Fig. 1 The 31 cases ACCs of the monthly mean forecast and the real observation of 500-hPa height field for northern hemispheric extratropics(Ren, 2006)

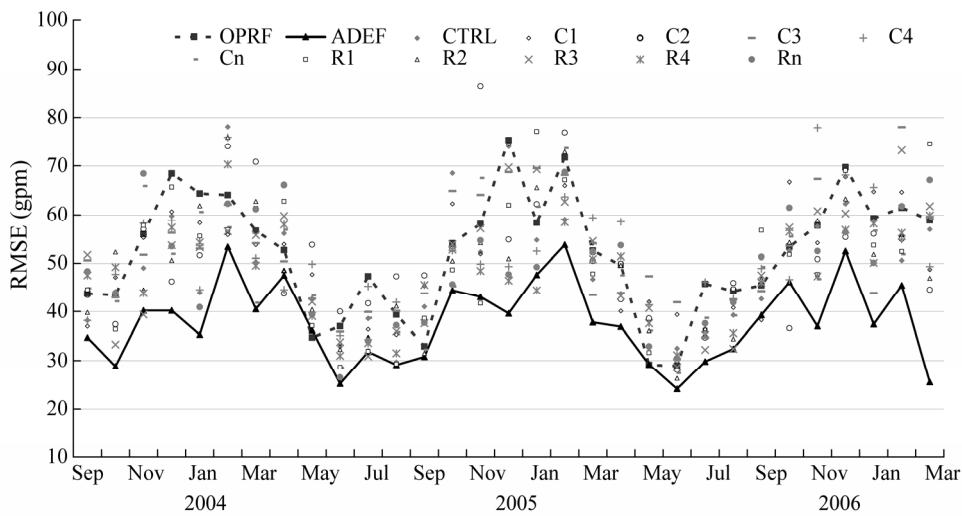


图2 同图1, 但为 RMSE。(任宏利, 2006)

Fig. 2 Same as in Fig.1, but for RMSE (Ren, 2006)

RMSE 曲线呈现规则的年变化, 冬季最大而夏季最小; 几乎所有 ADEF 的 RMSE 都位于 OPRF 的下方, 这在冬半年更为明显。而且, ADEF 曲线也几乎都位于其 11 个成员 RMSE 的下方, 这一点比图 1 中 ADEF 曲线位于绝大多数成员 ACC 的上方还要显著, 而且, 各个成员的 RMSE 分布差别要比 ACC 图上的成员分布小得多, 这些都充分反映了 ADEF 在减小模式预报误差方面的良好性能, 而即便改进后的 OPRF, 其 RMSE 仍是同以前一样大。总体而言, 这种集合新方法在减小预报误差和提高预报技巧两方面都有不错的能力, 相比之下, 在预报误差削减方面更为显著一些, 这与最初相似一动力方法为了减小误差的基本思想是一致的。但由于模式预报仍受环流型影响, ADEF 也不例外, 这可能与模式性能以及相似性受环流型可预报性的影响有关, 还有待于进一步研究。

这一方法在延伸期预报应用时, 我们发现相似预报误差订正方法可能存在两个根本困难: 一是数值模式对初值敏感, 因此需要考虑如何保证相似初值间预报的误差演变规律具有一致性; 二是相似场的选取, 由于数值模式的自由度巨大, 要对这么大自由度变量在历史上找到很好的相似, 在现有的历史资料条件下是很困难的 (郑志海等, 2010)。丑纪范和郑志海 (2010)、Zheng et al. (2012) 提出在利用相似误差订正方法进行延伸期预报时, 可以采用可预测分量和混沌分量分离的策略, 即基于大气系统的混沌特性, 从误差增长的角度在数值模式中分离了可预报分量和不可预报的随机分量, 将可预报

分量定义为在预报时段内误差增长较慢的分量, 它对初值小的误差不甚敏感。通过在预报过程中滤除随机分量, 保留可预报性较高的分量, 建立起针对可预报分量的数值模式, 避免小尺度分量预报误差的快速增长对预报效果的影响。同时, 结合历史资料, 利用相似一动力方法对可预报分量的预报误差进行订正, 达到减小模式误差和从统计角度考虑随机分量对可预报分量影响的目的。结果表明, 该方法能有效提高数值模式对可预报分量的预报技巧, 从空间分布上体现为对可预报性较高的地区改进更为明显; 从空间尺度上看, 改进最为明显的是 0 波, 其次是超长波和天气尺度波, 与各尺度的可预报性有很好的 consistency。下面具体给出这一方法的试验结果:

图 3 给出了 2004~2008 年 1 月 16 日 12 时的 5 个相互独立的个例, 作为初始场的预报与实况的 ACC 评分情况, 从中可以看出, 相似一动力方法 (ADA) 的 ACC 评分显著优于可预报分量数值模式。ACC 的改进程度存在明显的地区差异, 北半球热带外地区主要在 10 天以后略有提高, 但 10 天以前略低于可预报分量的数值模式 (NMPC); 对可预报性较强的南半球热带外和热带地区提高非常明显, 几乎都优于 NMPC, 尤其是在南半球热带外地区, 改进尤为显著。同时值得注意的是, 对全球而言, ADA 的 ACC 评分随着时间降低速率要低于 NMPC, 这对延长预报时效有重要作用。

为了进一步说明该特征, 图 4 给出了 500 hPa 各区域的候平均和 6~15 天平均预报情况。从图中

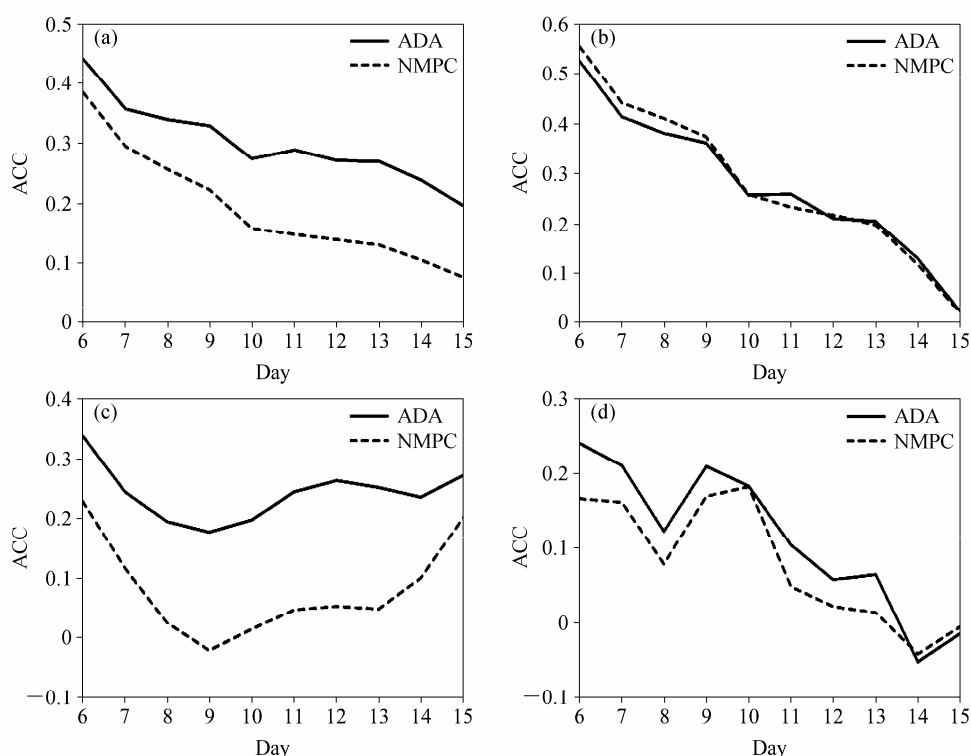


图3 5个个例平均的各区域500 hPa 高度场逐日预报与实况的ACC: (a) 全球; (b) 北半球热带外; (c) 南半球热带外; (d) 热带。(Zheng et al., 2012)
Fig. 3 The 5 cases mean ACCs of the daily forecast and the real observation of regional 500-hPa height field for the globe (a), northern hemispheric extratropics (b), southern hemispheric extratropics (c), and tropics (d). (Zheng et al., 2012)

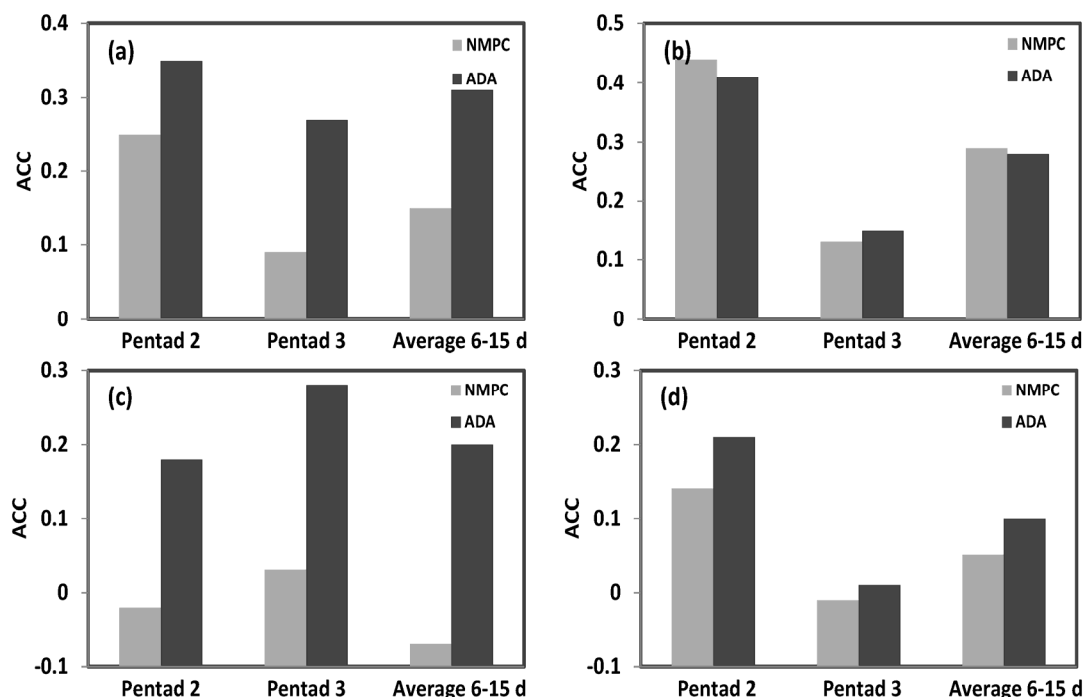


图4 各区域500 hPa 高度场候平均预报与实况的ACC: (a) 全球; (b) 北半球热带外; (c) 南半球热带外; (d) 热带。(Zheng et al., 2012)
Fig. 4 ACCs of the pentadly forecast and the real observation of regional 500-hPa height field for the globe (a), northern hemispheric extratropics (b), southern hemispheric extratropics (c), and tropics (d). (Zheng et al., 2012)

可以看出，平均环流均有明显改进，对不同层次而言（图略），改进程度从低层到高层依次减小，这和逐日环流预报类似。尤其值得注意的是，不论是

ACC 还是 RMSE，ADA 对第 3 候的改进程度明显大于第 2 候，这是令人鼓舞的，尤其是对更长时间尺度（如 10~30 天）的预报具有指示意义，这对

利用该方法进行 10~30 天延伸期预报尝试提供了信心。结果表明,该方法能有效提高数值模式对可预报分量的预报技巧,从空间分布上体现为对可预报性较高的地区改进更为明显;从空间尺度上看,改进最为明显的是 0 波,其次是超长波和天气尺度波,与各尺度的可预报性有很好的一致性。

集合预报是考虑初始条件和模式不确定性的有效途径。因此,在延伸期预报中对具有不同特性的可预报分量和随机分量采用不同的集合预报方案和策略,发展了基于延伸期可预报性的集合预报方法(PBEP)(郑志海等,2012)。该方法从考虑模式不确定性的角度,用多个模式误差订正方案在预报过程中订正模式误差,以此来减小模式对可预报分量的预报误差;对于不可预报的随机分量,则从历史资料中从气候概率的角度来给出其概率分布,避免模式误差的影响。图 5 给出了这一方法中各区域 500 hPa 高度场候平均预报与实况的 ACC 评分情况,与逐日环流预报类似,PBEP 在各个地区和时段预报技巧都显著高于国家气候中心的业务集合预报系统(EPS),对全球而言,第 2 候和第 3 候平均的 ACC 评分分别提高了 0.15 和 0.13, RMSE 减小了 13.52 gpm 和 12.28 gpm(图略);6~15 天平均的 ACC 评分则提高了 0.12, RMSE 减小了 12.36 gpm。分区域来看,PBEP 对各个区域的预报技巧均

有提高,其中 6~15 天平均的 ACC 在热带地区提高最多,达到了 0.28,南半球热带外地区次之,为 0.17,北半球热带外地区则提高了 0.07;RMSE 则分别是北半球热带外地区减小了 18.50 gpm,南半球热带外地区和热带地区都减小了 9.46 gpm。不论是 ACC 还是 RMSE,第 2 候的技巧提高都明显高于第 3 候。上述试验结果表明,相比于国家气候中心的业务动力延伸集合预报系统,该集合预报方法对全球各区域环流预报技巧均有提高,对不同空间尺度的波也有不同程度的改进,显示出潜在的业务应用前景。

4 季节气候预测中的应用

在季节气候预测的应用实践中,由于数值模式的可预报期限依赖于初始误差,如果季节时间尺度的预测结果对初值很敏感,相似年之间初值的差异所产生的误差分布的不确定性将掩盖相似年提供的误差修正信息,那么基于相似的误差订正会受到影响。为了减小这种误差分布不确定性的影响,郑志海等(2009)利用海气耦合模式(CGCM)集合预报结果和再分析资料,采用方差分析方法来提取数值模式对初值相对不够敏感的可预报分量,将其作为对象进行历史相似选取和误差订正,在此基础上提出基于季节可预报分量的相似误差订正新方

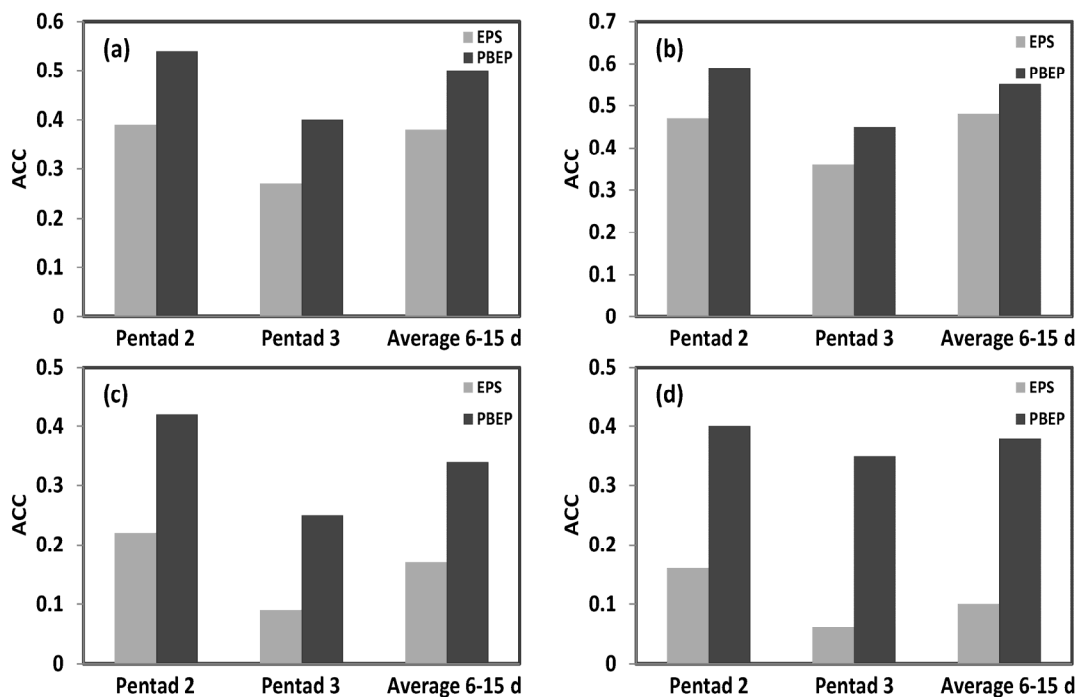


图 5 同图 4,但是为基于延伸期可预报性的集合预报方法(PBEP)(郑志海等,2012)

Fig. 5 Same as in Fig. 4, but for predictability-based extended-range ensemble prediction method (PBEP) (Zheng et al., 2012)

法 (FACEPC)。将该方法应用到国家气候中心季节气候业务预测模式实验中, 对不同区域给出有针对性的相似选取指标和预报方案, 25 年的交叉检验结果表明, 夏季降水和环流的预报技巧评分相对于系统误差订正有明显提高, 在发生中等及以上强度 ENSO 事件年和可预报分量贡献较大地区的预报技巧提高更为显著, 特别是中国区域降水和关键区环流的预报技巧均有提高, 显示出气候预测业务应用前景。同时, 初步敏感性实验显示相似因子和资料长度的改变对预报均有显著影响。

表 2 给出了这一方法对不同区域夏季降水量的预测与实况的 25 年平均 ACC 评分比较, 可以看到, 与系统误差订正 (SPEC) 相比, FACEPC 的预报性能有明显改善。SPEC 在各个区域的 25 年平均 ACC 几乎都小于 0, FACEPC 在 3 个区域都提供了正技巧。其中亚洲地区的 25 年平均 ACC 从 -0.08 提高到了 0.19, 提高了 0.27。对中国而言, 关键的东部地区降水也提高了 0.1, 显示出将该方法应用到实时预测中的前景。同时表 2 还给出了 25 年中 FACEPC 的预报评分高于 SPEC 的个数, 可以看到, 对亚洲、中国和中国东部三个区域的预报技巧提高年数分别为 23 年、14 年和 15 年, 提高比例分别为 92%、56%和 60%。

表 2 不同区域夏季降水量的预测与实况的 25 年平均 ACC 评分比较 (郑志海等, 2009)

Table 2 The 25-year mean ACCs of regional summer precipitation forecast and the observation (Zheng et al., 2009)

预测方案	亚洲	中国	中国东部
	10°S~65°N, 40°E~180°	20°N~55°N, 75°E~135°E	20°N~45°N, 105°E~120°E
SPEC	-0.08	-0.01	-0.08
FACEPC	0.19	0.04	0.02
ACC _{FACEPC} -ACC _{SPEC}	0.27	0.05	0.1
ENSO 年 ACC _{FACEPC} -ACC _{SPEC}	0.33	0.1	0.27
(ACC _{FACEPC} -ACC _{SPEC}) > 0 年数	23	14	15

注: ENSO 年代表发生中等及以上强度的 ENSO 事件年

图 6 给出了各区域基于 FACEPC 的 ACC 评分相对于 SPEC 改进的年际变化情况。可以看出, 对亚洲区域几乎所有的年份 FACEPC 均优于 SPEC。对中国东部地区, 在发生了中等及以上强度 ENSO 事件的 1983 年、1987 年、1988 年、1992 年、1997 年、1998 年、1999 年和 2000 年中, 除 1997 年外

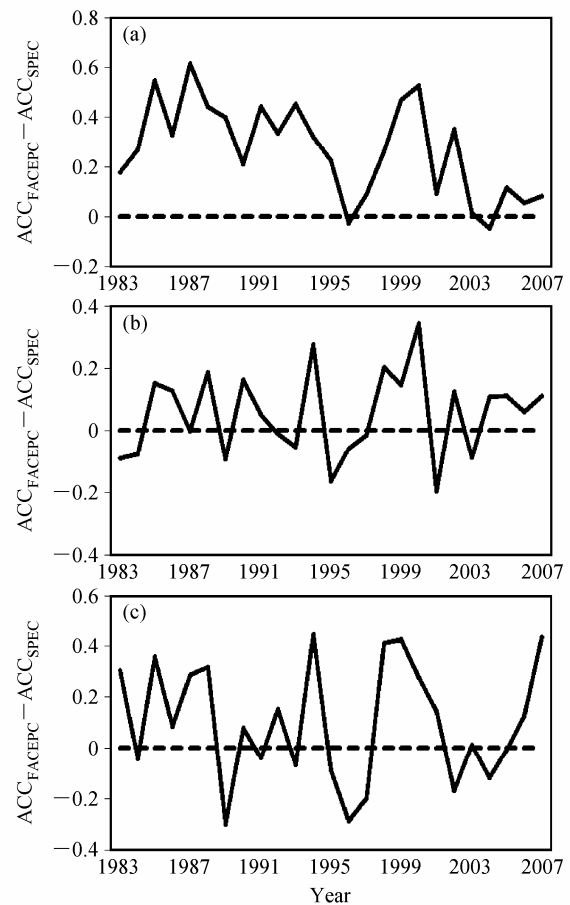


图 6 基于 FACEPC 与 SPEC 的夏季降水预测和实况的 ACC 之差 (FACEPC 减去 SPEC): (a) 亚洲 (10°S~65°N, 40°E~180°); (b) 中国 (20°N~55°N, 75°E~135°E); (c) 中国东部 (20°N~45°N, 105°E~120°E)。(郑志海等, 2009)

Fig. 6 The difference of ACCs (FACEPC minus SPEC) of regional summer precipitation forecast and the observation: (a) Asia (10°S~65°N, 40°E~180°); (b) China (20°N~55°N, 75°E~135°E); (c) eastern China (20°N~45°N, 105°E~120°E). (Zheng et al., 2009)

的其他年份, FACEPC 与 SPEC 的 ACC 之差均超过了 0.15, 提高非常明显。从表 2 中还可看出, 亚洲地区、中国地区和中国东部地区在发生中等及以上强度的 ENSO 事件年的平均 ACC 分别提高了 0.33、0.1 和 0.27, 都高于 25 年的平均提高值。已有研究表明在外强迫异常 (特别是 SST 异常) 较强的年份, 全球部分地区的可预报性更强, 而 FACEPC 在外强迫异常信号较强的年份提高更多, 这表明 FACEPC 能有效利用历史相似信息改进模式可预报分量的预报, 部分弥补数值模式对外强迫异常响应不足的缺点。

在上述工作的基础上, 王启光等 (2011)、杨杰等 (2012) 还针对长江中下游和华北地区开展了有针对性的误差订正工作, 通过对前期因子进行筛

选, 确定长江流域相似误差场的多因子优化组合, 并结合加权集合平均的方法, 提出了基于优化多因子组合的客观定量化预测技术。结合动态多因子组合建立了华北汛期降水的订正模型, 并充分考虑前期异常信号, 进一步构建了基于前期异常信号的汛期降水相似订正预报方案。结果表明, 对两个区域的模式预报技巧均有提高。

5 ENSO 预测中的应用

鉴于 ENSO 所代表的年际气候变率信号, 对全球气候异常均有重要的影响。针对 ENSO 预报问题相似误差订正方法的应用研究也得到了发展 (孙丞虎等, 2006)。

在 ENSO 等季节—年际尺度预测中, 相似误差订正方法的使用必须考虑海洋和大气两种分量的相互作用。因此, 选取相似样本时, 需要同时考虑两者的相似性, 即需要分析单一考虑海洋状态的相似 (部分相似), 或是综合考虑海洋和大气状态的相似性 (全相似) 对预测技巧的影响问题。为简单起见, 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一起衡

量, 且为消除不同物理量单位的影响, 对资料进行了标准化处理。同时, 为消除内部混沌过程的影响, 我们也采用了利用多个历史相似进行相似误差订正的办法。而在试验平台的选择上, 为了便于业务应用, 我们采用了国家气候中心 ENSO 预测系统中的 NCCo 简化海气耦合模式, 发展了 ENSO 动力—相似误差订正系统, 初步实现了相似误差订正方法在 ENSO 预测中的应用。

通过 1979~2003 年共 25 年的回报试验发现, 对于回报的 Niño3 指数的距平相关系数和平均绝对误差, 无论是部分相似还是全相似, 在 12 个月的预报时效内误差均小于控制试验。例如, 控制试验在第 12 个月时误差达 1.39°C, 而部分相似和全相似分别为 1.15°C 和 1.02°C (图 7a)。若再对比全相似和部分相似的结果, 则可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%。对于距平相关系数 (图 7b), 同样发现相似误差订正模式的结果在 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

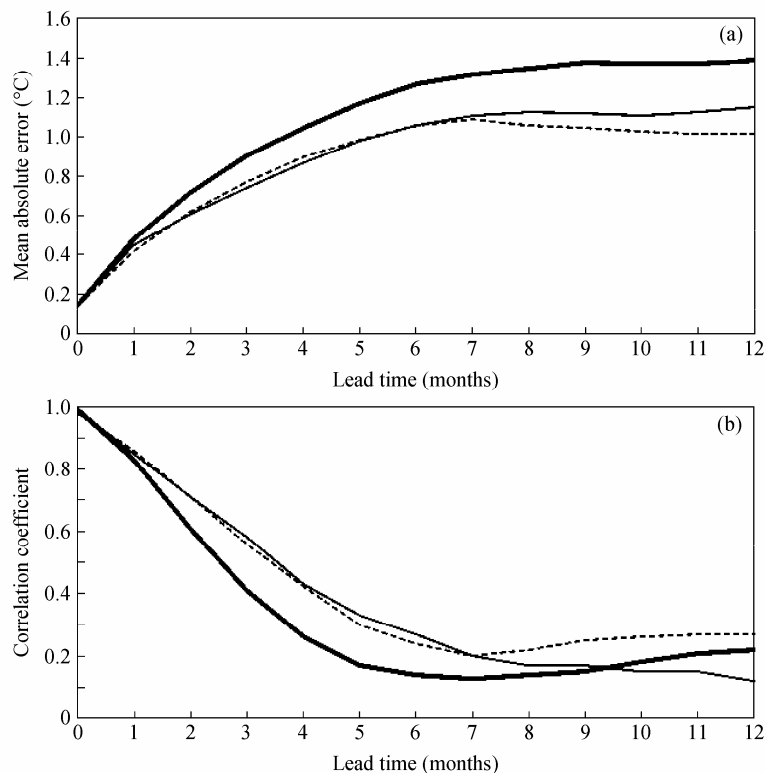


图 7 1979~2003 年 Niño3 指数预报随预报时效的变化: (a) 平均绝对误差 (单位: °C); (b) 距平相关系数。粗实线: 控制试验; 细实线: 部分相似, 虚线: 全相似。(孙丞虎等, 2006)

Fig. 7 The predicted Niño3 index vs. forecast lead time for the 1979–2003 period: (a) The mean absolute errors; (b) the correlation coefficient. The thick solid line: control experiment; thin solid line: partial analogy; dotted line: comprehensive analogy (Sun et al., 2006)

制试验的相关系数只有 0.17 左右, 而相似误差订正的结果则均在 0.3 以上。再对比全相似和部分相似的结果, 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。上述结果也表明了, 在现有资料条件下相似误差订正这一方法在 ENSO 预报中也有一定的应用前景。

6 结语

目前, 使用气候动力数值模式进行短期气候预测还存在许多不足之处, 因此在预测策略上采取动力—统计相结合、从历史相似资料中提炼信息以提高预测技巧的方式不失为一条可行之路。在现有模式和资料条件下, 深入开展动力—统计相结合的预报策略和方法研究, 对于提高短期气候预测水平是非常重要的。我们在动力相似预报策略研究基础上, 发展了相似—动力短期气候预测系统, 并开展了其在月、季节以及 ENSO 尺度的气候预测试验和应用, 取得了一些令人鼓舞的初步结果, 从而为下一步深入开展有关气候预测理论与方法研究提供了一些借鉴。

当前的气候预测系统发展方式将基础研究与业务需求紧密连接在一起, 并且融合了国内外先进的理论研究成果和发展理念, 这是我们在今后始终应该坚持的。在未来气候预测技术研发中, 仍有很多重要方面必须加以考虑, 例如, 延伸期低频分量预测、极端气候事件的预测、气候概率预测等等, 将相似—动力气候预测系统发展成为一个完善的短期气候预测的业务系统。

参考文献 (References)

鲍名, 倪允琪, 丑纪范. 2004. 相似—动力模式的月平均环流预报试验 [J]. 科学通报, 49 (11): 1112–1115. Bao Ming, Ni Yunqi, Chou Jifan. 2004. The experiment of monthly mean circulation prediction using the analogy-dynamical model [J]. Chinese Science Bulletin, 49 (12): 1296–1300.

Barnett T P, Preisendorfer R. 1978. Multifield analog prediction of short-term climate fluctuations using a climate state vector [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 35: 1771–1787.

丑纪范. 1979. 长期数值天气预报的若干问题 [C]// 中长期水文气象预报文集. 北京: 水利电力出版社, 216–221. Chou Jifan. 1979. Some problems of long-range numerical weather prediction[C]// Collection of Middle and Long-Range Hydrometeorological Prediction. Beijing: China Water Power Press (in Chinese), 216–221.

丑纪范, 郑志海, 孙树鹏. 2010. 10~30 d 延伸期数值天气预报的策略思考—直面混沌 [J]. 气象科学, 30 (5): 569–573. Chou Jifan, Zheng Zhihai, Sun Shupeng. 2010. The think about 10-30 days extended-range

numerical weather prediction strategy-facing the atmosphere chaos [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 30 (5): 569–573.

黄建平, 王绍武. 1991. 相似—动力模式的季节预报试验 [J]. 中国科学 (B 辑), 21 (2): 216–224. Huang Jianping, Wang Shaowu. 1992. The experiment of seasonal prediction using the analogy-dynamical model [J]. Science in China (Series B), 35 (2): 207–216.

Huang Jianping, Yi Yuhong, Wang Shaowu, et al. 1993. An analogue-dynamical long-range numerical weather prediction system incorporating historical evolution [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 119: 547–565.

Livezey R E, Barnston A G, Gruba G V, et al. 1994. Comparative skill of two analog seasonal temperature prediction systems: Objective selection of predictors [J]. J. Climate, 7: 608–615.

邱崇践, 丑纪范. 1989. 天气预报的相似—动力方法 [J]. 大气科学, 13 (1): 22–28. Qiu Chongjian, Chou Jifan. 1989. An analogue-dynamical method of weather forecasting [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 13 (1): 22–28.

任宏利, 丑纪范. 2005. 统计—动力相结合的相似误差订正法 [J]. 气象学报, 63 (6): 988–993. Ren Hongli, Chou Jifan. 2006. Analogue correction method of errors by combining both statistical and dynamical methods together [J]. Acta Meteorologica Sinica, 63 (6): 988–993.

任宏利. 2006. 动力相似预报的策略和方法 [D]. 兰州大学博士学位论文, 95pp. Ren Hongli. 2006. Strategy and methodology of dynamical analogue prediction [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, 95pp.

任宏利, 丑纪范. 2006. 在动力相似预报中引入多个参考态的更新 [J]. 气象学报, 64 (3): 315–324. Ren Hongli, Chou Jifan. 2006. Introducing the updating of multi-reference states into dynamical analogue prediction [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (3): 315–324.

任宏利, 张培群, 李维京, 等. 2006. 基于多个参考态更新的动力相似预报方法及应用 [J]. 物理学报, 55 (8): 4388–4396. Ren Hongli, Zhang Peiqun, Li Weijing, et al. 2006. A new method of dynamical analogue prediction based on multi-reference-state updating and its application [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 55 (8): 4388–4396.

任宏利, 丑纪范. 2007. 动力相似预报的策略和方法研究 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37 (8): 1101–1109. Ren Hongli, Chou Jifan. 2007. Strategy and methodology of dynamical analogue prediction [J]. Science in China (Series D), 50 (10): 1589–1599.

Ren Hongli, Chou Jifan, Huang Jianping, et al. 2009. Theoretical basis and application of an analogue-dynamical model in the Lorenz system [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 26 (1): 67–77.

孙丞虎, 李维京, 任宏利, 等. 2006. 一个 ENSO 动力—相似误差订正模式及其后报初检验 [J]. 大气科学, 30 (5): 965–976. Sun Chenghu, Li Weijing, Ren Hongli, et al. 2006. A dynamic-analogue error correction model for ENSO prediction and its initial hindcast verification [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 965–976.

van den Dool H M. 1994. Searching for analogues, how long must we wait? Tellus, 46 (3): 314–324.

王会军. 1997. 试论短期气候预测的不确定性 [J]. 气候与环境研究, 2 (4): 333–338. Wang Huijun. 1997. On the uncertainty of the short-term climate prediction [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2 (4): 333–338.

王启光, 封国林, 郑志海, 等. 2011. 长江中下游汛期降水优化多因子组

- 合客观定量化预测研究 [J]. 大气科学, 35 (2): 287–297. Wang Qiguang, Feng Guolin, Zheng Zhihai, et al. 2011. A study of the objective and quantifiable forecasting based on optimal factors combinations in precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 287–297.
- 杨杰, 赵俊虎, 郑志海, 等. 2012. 华北汛期降水多因子相似订正方案与预报试验 [J]. 大气科学, 36: 11–22. Yang Jie, Zhao Junhu, Zheng Zhihai, et al. 2012. Estimating the prediction errors of dynamical climate model on basis of prophase key factors in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36: 11–22.
- 郑志海, 任宏利, 黄建平. 2009. 基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值实验 [J]. 物理学报, 58: 7359–7367. Zheng Zhihai, Ren Hongli, Huang Jianping. 2009. Analogue correction of errors based on seasonal climate predictable components and numerical experiments [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 58: 7359–7367.
- 郑志海. 2010. 基于可预报分量的 6~15 天数值天气预报业务技术研究 [D]. 兰州大学博士学位论文, 69pp. Zheng Zhihai. 2010. Operational technology research of 6–15 days numerical weather prediction based on predictable components [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, 69pp.
- 郑志海, 封国林, 丑纪范, 等. 2010. 数值预报中自由度的压缩及误差相似性规律 [J]. 应用气象学报, 21 (2): 139–148. Zheng Zhihai, Feng Guolin, Chou Jifan, et al. 2010. Compression for freedom degree in numerical weather prediction and the error analogy [J]. Chinese Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21 (2): 139–148.
- 郑志海, 封国林, 黄建平, 等. 2012. 基于延伸期可预报性的集合预报方法和数值试验 [J]. 物理学报, 61 (19): 199–203. Zheng Zhihai, Feng Guolin, Huang Jianping, et al. 2012. Predictability-based extended-range ensemble prediction method and numerical experiments [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 61 (19): 199–203.
- Zheng Zhihai, Huang Jianping, Feng Guolin, et al. 2012. Forecast scheme and strategy for extended-range predictable components [J]. Science China (Earth Sciences), doi:10.1007/s11430-012-4513-1.