

# 最优多因子动态配置的东北汛期降水相似动力预报试验\*

熊开国<sup>1</sup> 封国林<sup>2,3</sup> 黄建平<sup>1</sup> 丑纪范<sup>1</sup>

XIONG Kaiguo<sup>1</sup> FENG Guolin<sup>2,3</sup> HUANG Jianping<sup>1</sup> CHOU Jifan<sup>1</sup>

1. 半干旱气候变化教育部重点实验室,兰州大学大气科学学院,兰州,730000

2. 国家气候中心气候研究开放实验室,北京,100081

3. 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室,北京,100029

1. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

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

3. Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2010-05-15 收稿,2011-02-10 改回.

**Xiong Kaiguo, Feng Guolin, Huang Jianping, Chou Jifan. 2012. Analogue-dynamical prediction of monsoon precipitation in Northeast China based on dynamic and optimal configuration of multiple predictors. Acta Meteorologica Sinica, 70(2):213-221**

**Abstract** Based on the National Climate Center (NCC) of China operational seasonal prediction model results for the period 1983–2009 and the US National Weather Service Climate Prediction Center merged analysis of precipitation in the same period, together with the 74 circulation indices of NCC Climate System Diagnostic Division and 40 climate indices of NOAA of US during 1951–2009, an analogue-dynamical technique for objective and quantitative prediction of monsoon precipitation in Northeast China is proposed and implemented. Useful information is extracted from the historical data to estimate the model forecast errors. Dominant predictors and the predictors that exhibit evolving analogues are identified through cross validating the anomaly correlation coefficients (ACC) among single predictors, meanwhile with reference of the results from the dynamic analogue bias correction using four analogue samples. Next, an optimal configuration of multiple predictors is set up and compared with historical optimal multi-predictor configurations and then dynamically adjusted. Finally, the model errors are evaluated and utilized to correct the NCC operational seasonal prediction model results, and the forecast of monsoon precipitation is obtained at last. The independent sample validation shows that this technique has effectively improved the monsoon precipitation prediction skill during 2005–2009. This study demonstrates that the analogue-dynamical approach is feasible in operational prediction of monsoon precipitation.

**Key words** Analogue-dynamical prediction, Monsoon precipitation, Correction of errors, Dynamic and optimal configuration

**摘要** 基于中国气象局国家气候中心季节预报业务模式 27 a(1983—2009 年)预报结果和同期美国气候预报中心组合降水分析(CMAP)资料及国家气候中心气候系统诊断预报室 74 项环流指数和 NOAA 40 个气候指数(1951—2009 年),提出了客观量化的最优多因子动态配置汛期降水相似-动力预测新技术,并对中国东北地区汛期降水进行了预报试验。利用历史资料有用信息估算模式预报误差原理,选取 4 个历史相似年对应模式误差来估算当前模式预报误差。通过单因子交叉检验距平

\* 资助课题:公益性行业科研专项(GYHY200806005)、国家自然科学基金(40930952 和 41075058)和国家科技支撑计划(2007BAC29B01 和 2009BAC51B04)。

作者简介:熊开国,主要从事短期气候预测研究。E-mail: kaiguoxiong@163.com  
通信作者:封国林,主要从事气候变化研究。E-mail: fenggl@cma.gov.cn

相关系数确定主导因子及演化相似因子,结合当前及前期优化多因子组合配置确定预报因子集,最后利用历史相似年对应模式误差来估算当前模式预报误差并订正国家气候中心季节预报业务模式的预报结果,得到预报的汛期降水。对2005—2009年进行独立样本检验的结果表明,此技术对中国东北地区汛期降水有一定预报技巧。证实了利用历史资料估计业务模式预报误差的另类途径是可行的,显示了在业务预报应用中的潜在能力。

关键词 相似-动力预报,汛期降水,误差订正,动态最优配置

中图法分类号 P456.1 P457.6

## 1 引言

近几十年来,由于各种气候灾害频繁发生,短期气候预测逐渐成为国际上被广泛关注的重要课题。中国地处东亚季风区,自然条件复杂,气候变化剧烈。汛期降水的多寡和雨带的分布都受到东亚夏季风的控制(竺可桢,1934),汛期降水异常可引发大范围的旱涝灾害,从而给社会经济和人民生活带来重大影响。围绕以汛期降水预报为焦点的季节预报问题关乎国计民生,对中国社会经济发展、建设和谐社会起着重要的作用,一直是中国国家防灾减灾工作的重中之重。近几年来,在全球变暖的背景下气候异常和极端气候事件频发,客观上增加了中国国家和社会对于提高季节气候预报准确率的需求。

中国东北地区属于干温大陆性季风气候区,大量资料表明,夏季洪涝和干旱等极端灾害气候事件异常活跃,近几年来,在全球变暖背景下,旱涝发生频率更有增加的迹象。对于东北汛期降水的成因,中国学者从多个角度进行了较详细的分析。在大气环流方面,相关研究表明西太平洋副热带高压脊线变化、夏季东北冷涡强度和夏季北极偶极子异常等均和东北汛期降水呈较高相关(沙万英等,1998;何金海等,2006;武炳义等,2008);刘宗秀等(2003)在研究北太平洋涛动区500 hPa高度场季节变化特征对中国东北地区降水的影响时发现,当北太平洋涛动区前冬500 hPa高度场呈负位相时,东北地区夏季降水偏多,反之,东北地区夏季干旱少雨;海温方面,孙力等(2003)发现当前期冬季和春季甚至是前一年夏季赤道中东太平洋海温如果处于异常偏暖(冷)状态,并且,西风漂流区具有较明显的海表温度负(正)距平分布时,则东北大部分地区夏季降水具有整体偏多(少)的倾向;白人海(2001)则指出,北大西洋冬季海表温度出现南暖北冷异常时东北地区夏季降水偏多。除大气环流和海温异常可能对东北汛期降水产生影响外,众多的研究表明,欧亚、青藏高原

冬春季积雪及北半球雪盖均对东北地区的汛期降水产生一定的影响(翟盘茂等,1997;陈兴芳等,2000)。

虽然总体上对影响东北地区汛期降水的因子已有一定的认识,然而预报实践证明,影响东北地区汛期降水的因子非常多,且复杂。一方面,还有一些影响东北地区汛期降水的关键因子没有被发现,另外,即便知道了所有影响因子,但事实上区域汛期降水多是多种因子综合作用的结果,而且不同年代,因子的配置特征不同。因此,有效利用现有历史资料深入认识汛期降水形成机制以提高东北地区汛期降水预报水平是亟待解决的问题。

短期气候预测主要有两种方法,即物理统计方法和数值模式的动力学方法。二者各有优势和缺陷,总体来看,动力季节预报虽然被寄予厚望,但实际效果并不很理想。普遍的共识是:统计学方法与动力学方法要相互借鉴,取长补短,融合发展(丑纪范,2003)。围绕如何更有效结合的问题,国际上开展了广泛的研究(Thomas, 1970; Mo, et al, 2002; Tippett, et al, 2005)。中国学者顾震潮(1958)提出将数值预报从初值问题改为演变问题,从而可以利用近期实况演变资料,并指出了数值天气预报中使用历史资料的重要性和可行性;丑纪范(1986)从原则上讨论了在长期预报中实现动力和统计相结合的作法。围绕统计和动力相结合的问题,基于不同原理的动力统计相结合的预报方法被提出,例如使用过去演变资料的多时刻预报方法(郑庆林等,1973;Chou,1974)、相似动力方法(邱崇践等,1989;黄建平等,1991;Huang, et al,1993)、基于大气自记忆原理的方法(曹鸿兴,1993;谷湘潜等,1998;Feng, et al, 2001;封国林等,2001;鲍名等,2004)等,数值试验证明这些方法都显示了一定的预报技巧。

近年来,随着观测资料的增多和模式性能的不断改进,短期气候预测快速发展(任宏利等,2005,2007a;郑志海等,2009),但目前的业务水平依然不

高,仍需进一步提升预报水平(王绍武,2001;Barnston, et al, 2005;任宏利等,2007b)。

本文针对中国东北区域(40°—55°N, 110°—135°E,共77个格点),基于相似-动力结合方法,通过寻找与初始场相似的历史信息对动力模式的误差进行预报的思路,提出了最优多因子动态配置汛期降水相似-动力预测新技术,并对中国东北地区进行实际业务模式的汛期降水预报试验。

## 2 资料

目前,中国国家气候中心(NCC)已经建立了包含季节尺度在内的短期气候预测业务系统(丁一汇等,2002;李维京等,2005)。中国国家气候中心海-气耦合模式的水平分辨率为 $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ 。本文利用海-气耦合模式生成的1983—2009年回报和预报数据,选用2月底起报的每年6—8月集合平均结果,并将其插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 空间。将美国气候预报中心组合降水分析(CMAP)资料的总降水量作为实况观测资料,汛期降水预报误差场即这两者的差值场。历史相似选自国家气候中心气候系统诊断预报室的74项环流指数及NOAA 40项气候指数。

## 3 相似-动力的基本原理

一般来讲,数值预报是作为偏微分方程的初值问题提出来的,可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial \psi}{\partial t} + L(\psi) = 0 \\ \psi(x, t_0) = \psi_0(x) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\psi(x, t)$ 为模式预报变量, $x$ 和 $t$ 分别为空间坐标和时间, $L$ 是 $\psi$ 的微分算子,对应于实际的数值模式。 $t_0$ 为初始时刻, $\psi_0$ 为初值。 $t > t_0$ 时刻的值可由初值进行数值积分得到 $\psi$ 或者其泛函 $P(\psi)$ 。实际大气所满足的模式表示为

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + L(\psi) = E(\psi) \quad (2)$$

式中, $E(\psi)$ 为模式的误差算子,反映模式中未知的总误差项,即模式误差。从动力学观点来看,所掌握的历史资料就是满足式(1)的一系列特解。

数值模式是大气实际行为的一种近似,现有的模式离足够精确还相距甚远,多年来人们一直在努

力使模式尽可能精确完善。这种努力一般是从正面来进行的,即考虑如何使模式具有更可靠的物理基础及更精确的数值方法,以此来减小模式误差 $E(\psi)$ 。但无论模式怎样发展,误差仍将是客观存在和相当可观的。实际上,尽管无法知道控制大气运动的精确方程,但所掌握的大量观测资料可视为满足大气运动方程的一系列特解。因此,可从反问题的角度利用这些观测资料所提供的信息来弥补模式的缺陷,达到减小模式误差的目的。

大气是一个强迫耗散的非线性系统,存在着系统状态向外源适应。长期业务预报的经验表明,在相似的初始场和边界条件下,大气状况的演变往往也相似。因此,对于任一初值 $\psi$ ,可考虑使用与 $\psi$ 相似的历史实况 $\tilde{\psi}$ 所提供的模式误差信息,把预报场视为叠加在历史相似上的一个小扰动,引入历史相似对应的预报误差信息来估计当前的模式预报误差,将动力预报问题转化为模式预报误差的估计问题。

## 4 研究方案

一般而言,不同区域汛期降水的形成机制不同,即影响汛期降水的因子不同,而且,即使同一外强迫,由于对物理过程认识不足,物理参数化方案缺陷等内在因素的影响,模式对其响应在不同区域可能也会千差万别,从而导致模式预报误差在不同区域的差异。然而对于同一区域,在外强迫相似的条件下,由于大气有向外强迫适应的特征,因此,模式误差也存在一定的相似,由此,可以通过相似误差对模式预报结果进行订正从反问题角度来弥补模式缺陷。本工作基于相似-动力基本原理,旨在对东北地区汛期降水模式预报误差进行相似订正,以提高模式对东北地区汛期降水预报准确率。图1即是最优多因子动态配置汛期降水相似-动力预报流程图。

基于1983—2009年汛期降水CMAP资料和NCC季节预报业务模式预报结果得到27 a汛期降水模式预报误差集;其后将114项指数作为1368个影响因子,基于相似-动力基本原理,选取4个相似年,对每个影响因子都进行单因子交叉检验预报试验,给出单因子交叉检验距平相关系数(ACC)排序;针对单因子交叉检验距平相关系数排序,确定主导因子及演化相似因子集;对存在演化相似因子进

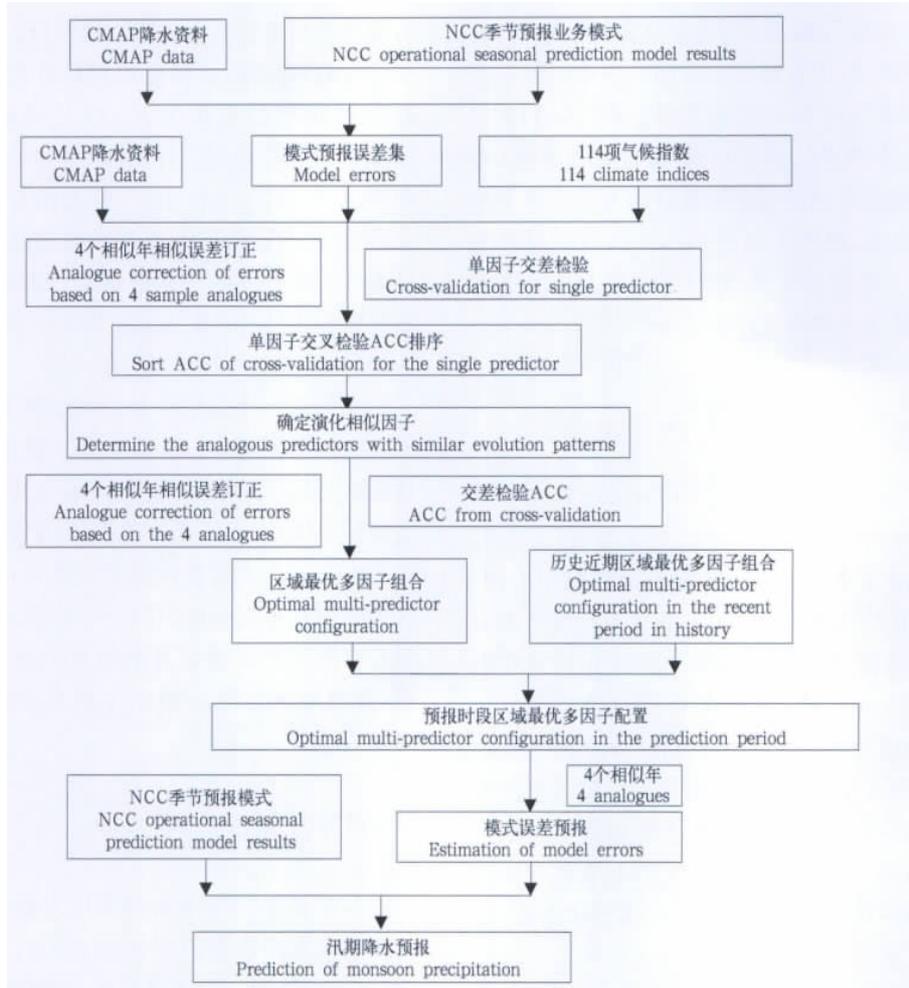


图 1 最优多因子动态配置汛期降水相似-动力预报流程

Fig. 1 Flowchart of the analogue-dynamical prediction of monsoon precipitation based on dynamic and optimal configuration of multiple predictors

行组合配置试验,通过交叉检验距平相关系数得到区域预报年前期最优多因子组合,结合历史近期最优多因子组合得到预报时段内稳定关键最优多因子配置,进行模式误差预报并对模式预报结果进行订正,给出订正后的模式预报结果。

#### 4.1 相似场的选取

相似场的选取直接影响相似-动力预报的结果。合适的相似场选取方法和相似场个数能有效地提高预报技巧。一般而言,在一定时间尺度内,相似场的相似程度越高,也即初始场和历史场越接近,其气候的演变过程与历史越相似,对于动力模式而言,当前模式误差与历史模式误差也越接近。因此,相似场的选取显得尤为重要。众多研究者将欧氏距离作为选取相似年的条件且选取 4 个历史最相似年对应的模式误差的平均作为预报年的模式误差(鲍名等,

2004;任宏利等,2007a),相关算法为

$$R = \left[ \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i (\phi'_{ij} - \phi'_{ik})^2}{\sum_{i=1}^m \omega_i} \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中,  $\phi'_{ij}$  和  $\phi'_{ik}$  分别代表  $j, k$  两个时刻的场,  $\omega_i$  为权重。欧氏距离  $R$  越小则说明初始场和历史场越相似。基于相似-动力基本理论,选取 4 个相似场,预报误差可表示为

$$\hat{E}(\phi_0) = \sum_{j=1}^4 b_j \hat{E}(\tilde{\psi}_j) / \sum_{j=1}^4 b_j = \sum_{j=1}^4 a_j \hat{E}(\tilde{\psi}_j) \quad (4)$$

式中,  $\hat{E}(\tilde{\psi}_j)$  为历史相似初值  $\tilde{\psi}_j$  对应的模式误差,  $a_j = b_j / \sum_{j=1}^4 b_j$  为归一化权重系数,  $b_j$  为待定系

数。

#### 4.2 区域影响因子的选取

对于影响中国东北地区汛期降水的因子,中国学者进行了广泛的研究(翟盘茂等,1997;沙万英等,1998;陈兴芳等,2000;白人海,2001;刘宗秀等,2003;孙力等,2003;何金海等,2006;武炳义等,2008)。本文区域影响因子均选自中国国家气候中心气候系统诊断预报室的74项环流指数和NOAA 40项气候指数。即使同一个环流指数,由于月份不同分布也存在差异,因此,作为边界条件和外强迫对短期气候预测模式响应程度也存在很大差异,一个环流指数可视为12个影响因子,114个环流指数即包含了1368个影响因子。

选取区域影响因子应遵循物理意义明确同时又与模式误差有一定联系的原则。气候系统是一个非线性复杂系统,一般而言,一个地区的汛期降水不可能由一个气候因子决定,通常是多个气候因子共同作用的结果,而且,不同时期影响汛期降水的影响因子也不同,不同因子在不同时期存在不同预报技巧。因此,如何选取区域影响因子及最优动态组合配置是汛期降水预报的一个重要课题。本文最优多因子动态配置选取因子原则和流程如下(以2009年预报为例):

(1) 单因子交叉检验选取影响区域汛期降水因子距平相关系数排序。针对单因子对1983—2006、1983—2007和1983—2008年3个时段进行交叉检验,给出每个时段单因子交叉检验距平相关系数排序。之所以在对2009进行预报时只考虑前期3个时段,在于东北汛期降水有2—4 a周期(孙力等,2000),试验也证明基于预报前期3个时段得到的最优多因子动态配置能取得较稳定的预报效果。

(2) 区域主导因子的确定。从3个时段单因子交叉检验距平相关系数排序中确定至少一个对提高区域汛期降水预测距平相关系数有较大贡献的主导因子。单因子交叉检验试验发现,对于一个区域而言,除个别时段外,至少有一个因子在多个时段自始至终对该区域汛期降水预报起主导作用,对降水预报的贡献具有稳定性。因此,确定该因子为该区域汛期降水预报主导因子(例如4月东太平洋涛动)。

(3) 确定演化相似因子。针对不同时段,哪些因子在预报过程中起着重要作用是预报中需要首先确定的。不管是从单因子交叉检验距平相关系数

上,还是从降水与因子的相关系数分析中均可以看出,影响东北地区汛期降水的因子非常多,究竟哪些因子对东北地区汛期降水预报真正起重要作用,哪些因子只是存在虚假相关,面对这样的问题,提出了演化相似的概念。实践证明采用演化相似方法是选取真正对提高汛期降水相似-动力预报技巧有贡献的因子的好方法之一。它一方面去除了部分对汛期降水没有影响的因子对汛期预报的干扰,同时,演化相似相当于在一个气候指数中只选取一个影响因子,从而极大地压缩了因子的自由度。选取演化相似因子的过程为:首先,在单因子交叉检验距平相关系数排序中选取那些相似误差订正预报距平相关系数大于系统误差订正预报的因子;然后在选出的因子中搜索属于相同气候指数的因子,若有多个因子同属于一气候指数,则认为这个气候指数存在演化相似,也即若对于一个气候指数,在其所属的因子中有多个因子对提高汛期降水预报有技巧则认为此气候指数存在演化过程相似,从而将对提高汛期降水预报最有技巧的因子视为演化相似因子。

(4) 最优多因子配置的确定。基于每个时段演化相似因子集,寻找最优因子组合,使得此时段交叉检验距平相关系数值达到最高。在每个时段最优多因子组合中取相同的因子——即交集,建立该区域优化组合因子集确定最优多因子配置。

对于多因子组合的选取,随着因子个数的增多,自由度明显增大,以致计算量显著增大,此外,噪声问题及因子间的相关关系会导致误差的非线性增长,而研究表明(Mo, et al, 2002),通过经验正交函数分解(EOF)方法能有效压缩自由度同时消除部分噪声的影响,本质上降低了因子场的维度。

对多因子的标准化场 $\psi_{m \times n}$ 进行经验正交函数分解记为

$$\psi_{m \times n} = V_{m \times n} T_{n \times n} \quad (5)$$

式中, $m, n$ 分别为时空维度, $V_{m \times n}$ 为标准化正交基(场), $T_{n \times n}$ 为时间系数(主分量)。为简单起见,可由累积解释方差大于一定阈值的前 $h$ ( $h < m$ )个主分量来反映原变量场变化的大部分信息,以此压缩因子场的维数。本文取累积方差贡献率达到80%时的经验正交分析主分量个数,即

$$\psi_{m \times n} = V_{m \times n} T_{n \times n} \approx V_{m \times h} T_{h \times n} \quad (6)$$

#### 4.3 区域影响因子的敏感性试验

众所周知,利用历史资料提高短期气候预测准

准确率,对于线性系统而言,所用历史资料越多越好,而对于非线性系统则在巧不在多。大气系统为非线性复杂系统,通过有限的因子组合配置压缩自由度提取可预报分量,提高短期气候预测技巧是目前发展的有效途径。

图 2 为 3 个时段因子个数对距平相关系数影响的敏感性试验。图中 1983—2006 指的是对 1983—2006 年进行多因子组合交叉检验,其他依此类推。对于汛期降水相似-动力预报而言,由图 2 可以看出并不是影响因子个数越多越好,总体上,距平相关系数都是随着影响因子个数的增加呈先增大后减小趋势。当影响因子个数从 1 逐渐增加组合到 10 左右时,各时段距平相关系数都迅速增大至一较大值,随着影响因子个数的继续增多,在 11—40 时 3 个时段的距平相关系数均达到一个相对稳定值且维持较高的预报技巧,超过 40 个影响因子时,随着影响因子个数增加迅速减小。另一方面,对于单个因子,预报距平相关系数普遍都在 0.2 以下,而最优多因子组合预报的距平相关系数普遍都在 0.35 以上,甚至有的能达到 0.4,较单个因子具有明显的预报技巧。因此,目前条件下多因子组合配置下的汛期降水相似-动力预报方法仍然是提高短期气候预测水平行的有效方法。

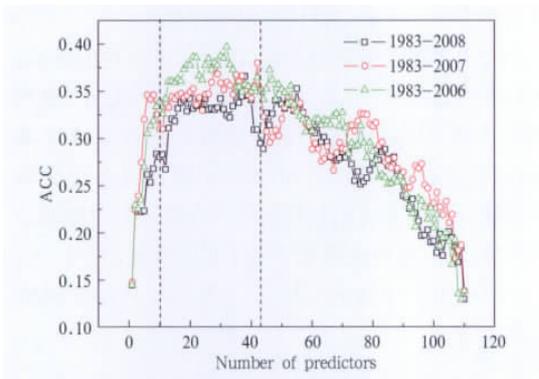


图 2 因子个数对距平相关系数影响的敏感性试验  
Fig. 2 ACC versus number of predictors for three time periods

4.4 影响因子物理性质

表 1 为东北地区 2009 年汛期降水相似-动力预报最优多因子配置。考虑到业务应用、模式起报时间及相关影响因子更新等一系列问题,本工作暂时仅将 1 月因子视为预报年当年前期因子,而将 2—12 月因子视为预报年前年因子。表中单因子交叉

表 1 东北地区 2009 年汛期降水预报最优多因子配置  
Table 1 The optimal multi-predictor configuration for prediction of monsoon precipitation in Northeast China in 2009

月份	预报因子	交叉检验 经验正交 分析	与实际降水/模式 误差第 1 主分量对应 时间系数相关系数
1	东亚槽强度	0.08	-0.20/-0.08
2	南海副热带高压北界	0.02	-0.18/0.15
4	东太平洋涛动	0.14	0.33/-0.11
4	热带北大西洋指数	0.05	-0.38/0.21
6	太平洋暖池	0.01	-0.35/0.35
7	印缅槽	-0.02	-0.11/-0.03
10	印度副热带高压脊线	0.001	-0.42/0.41
10	亚利桑那和新墨西哥 荒漠草原平均降水	-0.005	-0.16/0.27

检验距平相关系数均为 1983—2008 年的值,而相关系数则分别来自该因子与东北地区汛期降水及中国国家气候中心季节预报模式预报误差第 1 主分量对应时间系数。

东北地区汛期降水相似-动力预报最优多因子集中处于主导地位的因子是 4 月东太平洋涛动,也称为东太平洋-北太平洋型(EP-NP)遥相关(Bell, et al,1995)。此因子在 1983—2008 年交叉检验的距平相关系数为 0.14(表 1),而在 1983—2006 及 1983—2007 年的距平相关系数分别为 0.14 和 0.15,在这 3 个时段单因子交叉检验距平相关系数排序中除在 1983—2006 年排序第 2 外,在后两时段均排序第 1,充分体现了该因子在东北汛期降水预测中的重要性。图 3 和 4 分别为预报年前年该因子

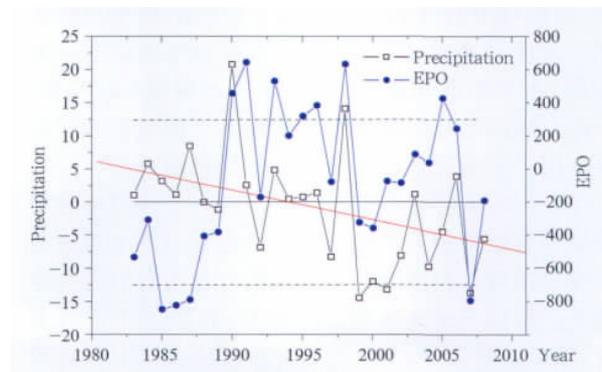


图 3 4 月东太平洋涛动指数与东北地区汛期降水第 1 主分量对应时间系数的相关关系  
(图中均为距平百分率值,气候值取 1983—2002 年平均)

Fig. 3 The relationship between the EPO in April and the PC1 of monsoon precipitation in Northeast China  
All values are anomaly percentage, and the climate value is the average from 1983 to 2002

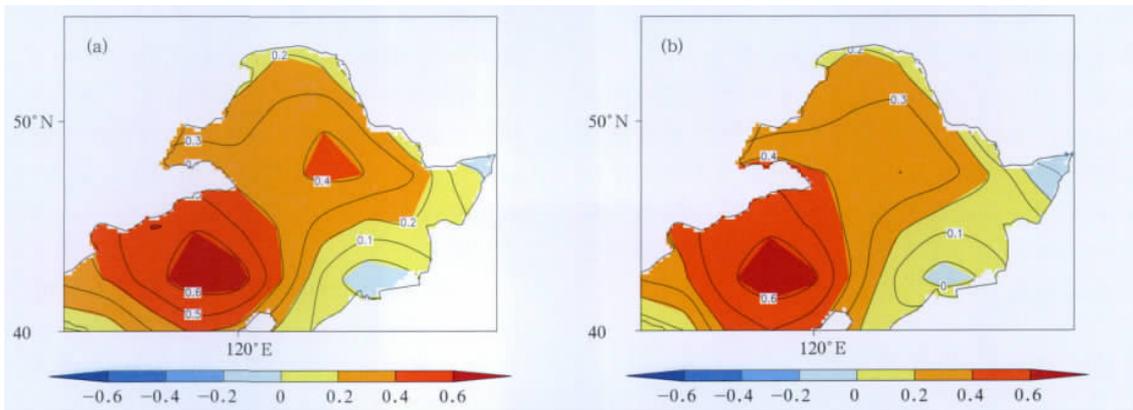


图 4 4 月东太平洋涛动指数和东北汛期降水及模式误差的相关系数分布  
(a. 同实况, b. 同模式误差)

Fig. 4 Distributions of the correlation coefficient between the EPO in April and  
(a) observed monsoon precipitation, and (b) model errors in Northeast China

同东北地区汛期降水经验正交函数分解第 1 主分量距平百分率的关系及该因子同东北汛期降水和中国国家气候中心季节预报模式预报误差相关系数的空间分布。尤其由图 4 可以看出,前年 4 月东太平洋涛动不管是和东北地区汛期降水还是同模式预报误差均存在较好的空间相关性,在整个东北地区都表现为较强的正相关,尤以东北地区南部最为明显,部分区域相关系数通过了 0.01 信度检验。由此可见,预报年前年 4 月东太平洋涛动确实为东北汛期降水影响因子,具有明显的物理意义。由于中国国家气候中心季节预报模式对于汛期降水气候态的描述比较准确,因此,总体上因子与降水及模式误差的相关系数分布大体一致,这从其他因子与降水及模式误差的相关系数的分布图中也可以看出(图略)。

之所以在单因子交叉检验距平相关系数排序中而非在因子和实际降水或模式预报误差的相关系数中选取主导因子及演化相似,这也是受大气系统的复杂性、非线性影响。一般而言,区域汛期降水多为多因子共同作用的结果,因子和降水或者模式预报误差的相关性好,其预报效果未必就好(这可能是本文选取的影响因子与前人选取的影响因子(翟盘茂等,1997;陈兴芳等,2000;何金海等,2006;武炳义等,2008))不同的原因之一。从表 1 中也可以看出,4 月东太平洋涛动与东北地区汛期实际降水及模式误差经验正交函数分解第 1 主分量的相关系数分别为 0.33 和 -0.11,均没有通过 0.05 信度检验,但其交叉检验距平相关系数却排序第一;而 10 月印度副

热带高压脊线与实际降水及模式误差经验正交函数分解第 1 主分量的相关系数均通过了 0.05 的信度检验,但其距平相关系数仅为 0.001,因此,通过单因子交叉检验距平相关系数的排序选取区域影响因子更有效和直接。

此外,还对表 1 中 8 个影响因子经验正交函数分解后的特征量同东北汛期降水的关系进行了分析。8 个影响因子经验正交函数分解后前 5 个主分量的累积解释方差贡献就已经超过 0.8,其值分别为 0.37,0.20,0.12,0.11,0.09。图 5 即为 8 个因子经验正交函数分解后第 1 主分量同东北汛期降水总量的相关关系。通过同图 3 的对比可以发现,8

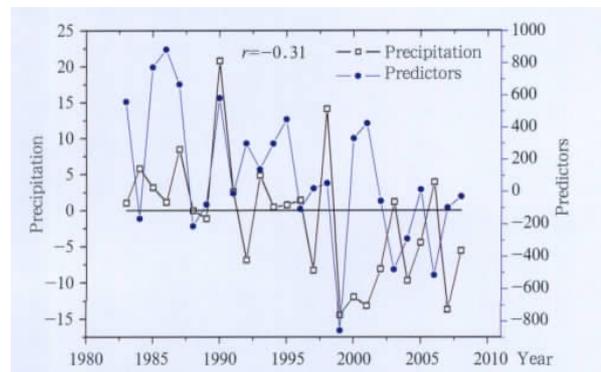


图 5 东北汛期降水与 8 个因子组合的相关关系  
(图中均为第 1 主分量对应时间系数的距平百分率值)

Fig. 5 The relationship between monsoon precipitation in Northeast China and the configuration of eight indices All values are the anomaly percentage of PC1 after EOF

个因子组合经验正交函数分解第 1 主分量与东北汛期降水总量距平百分率的相关系数明显不同,其值由前者正的 0.31 变成 -0.31。8 个因子组合配置后对 1983—2008 年进行交叉检验的距平相关系数为 0.18,较系统误差订正的 -0.08 及 4 月东太平洋涛动相似误差订正均有较大的提高,其时间相关系数也由系统误差订正的 -0.17 提高到 0.14,体现出了更高的预报技巧。

### 5 独立样本检验结果分析

由于目前汛期降水相似-动力预报试验中有效资料的长度仅为 27 a,很难从 27 a 的资料中选取到较多较好的历史相似信息,对于因子异常年更是难

上加难。考虑历史资料长度对选取相似场的影响,文中只对 2005—2009 年进行了独立样本检验。图 6 为对应的距平相关系数及均方根误差分布。根据相似年选取原则,这 5 a 选取的相似年按欧氏距离的小大排列,第 1、第 2、第 3 和第 4 相似年(表 2,相似年后面括号中的数值为相似年和回报年的降水距平相关系数)。

由图 6a 独立样本检验距平相关系数可以看出,相对系统误差订正,基于最优多因子动态配置的相似-动力相结合方法使得东北 2005—2009 年的汛期降水预测距平相关系数得到了有效的提高。5 a 独立样本检验距平相关系数中只有 2005 和 2006 年相似误差订正预报效果不及系统误差订正,其他 3 a 则使得距平相关系数分别由系统误差订正的 -0.24、

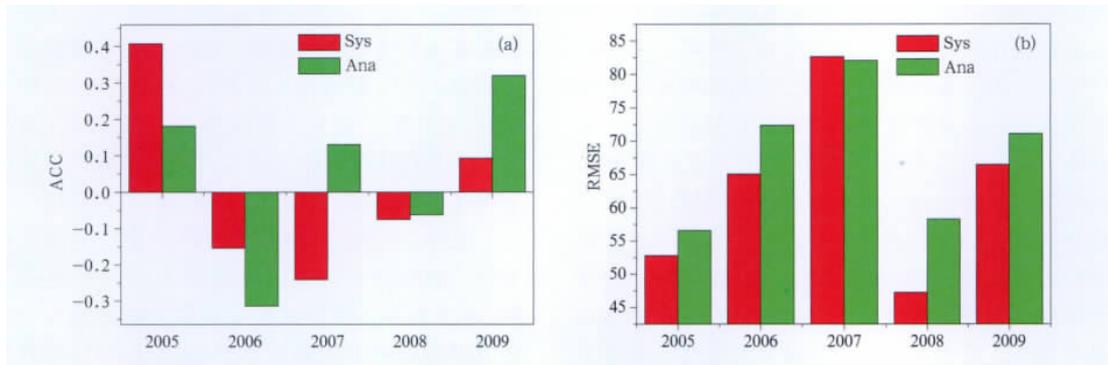


图 6 独立样本检验距平相关系数和均方根误差  
(a. 距平相关系数;b. 均方根误差;图中红色和绿色柱状分别对应系统误差和相似误差订正预报)

Fig. 6 ACC (a) and RMSE (b) of the independent sample validation.  
Red and green bars represent results from the systematic bias correction and the analogue error correction, respectively

-0.08 和 0.09 提高到相似误差订正的 0.13、-0.06 和 0.32,尽管 2005 年相似误差订正距平相关系数小于系统误差订正,但其值仍有 0.18。对于均方根误差(图 6b),可以看出,相对于系统误差订正,相似误差订正并没有使得这 5 a 的均方根误差发生明显减小,5 a 中除 2007 年外,其他年份都得到了不同程度的增大,此中原因还需要进一步研究。从相似年和预报年降水距平相关系数可以看出(表 2),除 2007 年选取的第 1 相似年和其相关系数为负外,其余 4 a 选取的第 1 相似年均和当年有一定的相似,进一步阐明了基于最优多因子组合配置的相似动力汛期降水预报方法的客观性,相似动力相结合的汛期降水预测方法仍然大有可为。

表 2 独立样本检验相似年

Table 2 Analogue years of independent sample validation

预报年	第 1 相似年	第 2 相似年	第 3 相似年	第 4 相似年
2005	2003(0.06)	1991(-0.08)	2001(0.46)	1997(-0.33)
2006	2005(0.07)	2002(-0.02)	2001(-0.08)	1990(-0.34)
2007	1988(-0.06)	2003(0.20)	1984(0.50)	1989(0.29)
2008	1988(0.26)	1992(-0.07)	1989(0.05)	1984(0.05)
2009	2000(0.36)	2002(0.42)	1992(0.22)	2004(-0.12)

### 6 结论和讨论

围绕如何有效利用历史资料改进季节预报模式预报水平问题及动力模式的误差可用历史相似对应的误差信息来估计的思路。利用中国气象局国家气

候中心 1983—2009 年季节预报业务模式预报和回报结果及同期 CMAP 降水分析资料,以中国国家气候中心气候系统诊断预报室 1951—2009 年 74 项环流指数、NOAA 40 项气候指数为预报因子集,从中选取预报因子和相似年,通过交叉检验回报距平相关系数对预报因子进行排序,确定主导预报因子,应用演化相似及优化因子组合配置等途径,提出了客观量化的最优多因子动态配置汛期降水相似动力预测新技术并对中国东北地区汛期降水进行了预报试验。距平相关系数对因子个数的敏感性试验表明了汛期降水预测中采用多因子组合配置的重要性及可行性。对 2005—2009 年进行独立样本检验的结果表明该技术能有效地改进中国国家气候中心季节预报业务模式对东北地区汛期降水的预报,但从每年的距平相关系数可以看出,本方案的实施对中国国家气候中心季节预报业务模式的预报技巧的改进也是非常有限的,只限于东北地区,5 a 平均的距平相关系数仅为 0.05,与目前短期气候业务预测水平相当,且预测效果与通常的统计模型一样也是不稳定的,可见提高短期气候预测水平还需要做更多的工作,此外,因子对降水的影响的形成机制同样需要进一步深入研究。

## 参考文献

白人海. 2001. 大西洋海表温度异常与中国东北地区夏季降水的关系. *海洋通报*, 20(1): 23-29

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. *科学通报*, 49(11): 1112-1115

曹鸿兴. 1993. 大气运动的自忆性方程. *中国科学 B 辑*, 23(1): 104-112

陈兴芳, 宋文玲. 2000. 欧亚和青藏高原冬春季积雪与我国夏季降水关系的分析和预报应用. *高原气象*, 19(2): 214-223

丑纪范. 1986. 为什么要动力-统计相结合?——兼论如何结合. *高原气象*, 5(4): 367-372

丑纪范. 2003. 短期气候预报的现状问题与出路(一). *新疆气象*, 26(1): 1-4

丁一汇, 刘一鸣, 宋永加等. 2002. 我国短期气候动力预报模式系统的研究及试验. *气候与环境研究*, 7(2): 236-246

封国林, 曹鸿兴, 魏凤英等. 2001. 长江三角洲汛期预报模式的研究及其初步应用. *气象学报*, 59(2): 206-212

谷湘潜. 1998. 一个基于大气自忆原理的谱模式. *科学通报*, 43(1): 1-9

顾震潮. 1958. 天气数值预报中过去资料的使用问题. *气象学报*, 29(3): 176-184

何金海, 吴志伟, 祁莉等. 2006. 北半球环状模和东北冷涡与我国东北夏季降水关系分析. *气象与环境学报*, 22(1): 1-5

黄建平, 王绍武. 1991. 相似-动力模式的季节预报试验. *中国科学 B 辑*, (2): 216-224

李维京, 张培群, 李清泉等. 2005. 动力气候模式预报系统业务化及其应用. *应用气象学报*, 16(增刊): 1-11

刘宗秀, 廉毅, 沈柏竹等. 2003. 北太平洋涛动区 500 hPa 高度场季节变化特征及其对中国东北地区降水的影响. *应用气象学报*, 14(5): 553-561

邱崇践, 丑纪范. 1989. 天气预报的相似-动力方法. *大气科学*, 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. *气象学报*, 63(6): 988-993

任宏利, 丑纪范. 2007a. 动力相似预报的策略和方法研究. *中国科学 D 辑(地球科学)*, 37(8): 1101-1109

任宏利, 丑纪范. 2007b. 数值模式的预报策略和方法研究进展. *地球科学进展*, 22(4): 376-385

沙万英, 郭其蕴. 1998. 西太平洋副热带高压脊线变化与我国汛期降水的关系. *应用气象学报*, 9(增刊): 31-38

孙力, 安刚, 丁立等. 2000. 中国东北地区夏季降水异常的气候分析. *气象学报*, 58(1): 70-82

孙力, 安刚. 2003. 北太平洋海温异常对中国东北地区旱涝的影响. *气象学报*, 61(3): 346-353

王绍武. 2001. 现代气候学研究进展. 北京: 气象出版社, 306-311pp

武炳义, 张人禾, D'Arrigo Rosanne. 2008. 北极偶极子异常与中国东北夏季降水. *科学通报*, 53(12): 1422-1428

翟盘茂, 周琴芳. 1997. 北半球雪盖变化与我国夏季降水. *应用气象学报*, 8(2): 230-235

郑庆林, 杜行远. 1973. 使用多时刻观测资料的数值天气预报新模式. *中国科学*, (2): 289-297

郑志海, 黄建平, 任宏利. 2009. 基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值试验. *物理学报*, 58(10): 7359-7367

竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量. *地理学报*, 1(1): 1-27

Barnston A G, Kumar A, Goddard L, et al. 2005. Improving seasonal prediction practices through attribution of climate variability. *Bull Amer Meteor Soc*, 86: 59-72

Bell G D, Janowiak J E. 1995. Atmospheric circulation associated with the midwest floods of 1993. *Bull Amer Meteor Soc*, 76(5): 681-695

Chou Je-Fen. 1974. A problem of using past data in numerical weather forecasting. *Scientia Sinica*, 17(6): 814-825

Feng Guolin, Cao Hongxing, Gao Xinquan, et al. 2001. Prediction of precipitation during summer monsoon with self-memorial model. *Adv Atmos Sci*, 18(5): 701-709

Huang J P, Yi Y H, Wang S W, et al. 1993. An analogue-dynamical long-range numerical weather prediction system incorporating historical evolution. *Quart J Roy Meteor Soc*, 119: 547-565

Mo Ruping, Straus D M. 2002. Statistical-dynamical seasonal prediction based on principal component regression of GCM Ensemble integrations. *Mon Wea Rev*, 130: 2167-2187

Thomas A G. 1970. Statistical-dynamical prediction. *J Appl Meteor*, 8: 333-344

Tippett M K, Goddard L, Barnston A G. 2005. Statistical-dynamical seasonal forecasts of central-Southwest Asian winter precipitation. *J Climate*, 18: 1831-1843