

长江中下游汛期降水数值预报业务模式误差场预报研究^{*}

王启光¹ 封国林² 支 蓉² 赵俊虎¹
WANG Qiguang¹ FENG Guolin² ZHI Rong² ZHAO Junhu¹

1. 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
1. *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*
2. *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*
2010-10-16 收稿, 2012-04-07 改回.

Wang Qiguang, Feng Guolin, Zhi Rong, Zhao Junhu. 2012. A study of the error field of the flood period precipitation of the mid-lower reaches of the Yangtze River as predicted by an operational numerical prediction model. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(4): 789-796.

Abstract The accuracy of the precipitation prediction is enhanced in the mid-lower reaches of the Yangtze River in summer, by using the climate factors and based on the analyses of the error filed of the operational numerical prediction model (ONPM) from National Climate Center (NCC). It is found that there are some factors (among the 114 monthly climate factors) that are anomalous before a certain summer. We use the cross-examination to determine the similar threshold by cross-checking the size of an average ACC. Choosing the key anomaly factors impacted the region, picking out the analogue years based on the anomaly degree of the factors, reducing the dimensions of the model's errors by EOF, making the prediction for the model's errors using the first three principal components, then the method to aim at the ONPM is proposed based on the factor anomaly and reducing dimensions of the errors of the model. The ACC can be improved up to 0.47 through the method from 0.22 as was corrected by the system's averaged dependent sample hindcast from 2005 to 2009, which shows good prospect of its operational application.

Key words Anomaly of predictors, Model errors prediction, The flood period precipitation of the mid-lower reaches of the Yangtze River, Reducing dimensions

摘 要 根据中国国家气候中心(NCC)数值预报业务模式(ONPM)预报结果,利用气候因子对业务模式的误差场进行预报试验。文中所用114项逐月气候因子在历年汛期前期总会出现部分因子异常的状况,在此基础上对因子异常的相似阈值进行数值试验,提出利用交叉检验平均距平相关系数(ACC)的大小来确定相似阈值的方法。依此选择影响该区域的前期关键异常因子,根据该部分因子的相似程度选取相似年,同时对模式误差场利用经验正交函数压缩维度,用前3个主分量对模式误差制作预报,针对业务模式的预报误差场,提出了根据因子异常挑选相似和压缩维度的一个预报方法。2005—2009年独立样本回报结果表明,该方法可以将5a平均距平相关系数由系统误差订正的0.22提高到0.47,具有较好的业务应用价值。

关键词 预报因子异常, 模式误差预报, 长江中下游汛期降水, 维度压缩

中图法分类号 P456.9 P457.6

^{*} 资助课题:国家自然科学基金(41105055 和 40930952)、全球变化重大研究计划(2012CB955902)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106016)。
作者简介:王启光,主要从事短期气候预测等方面的研究。E-mail:photon316@163.com
通讯作者:封国林,主要从事短期气候预测和非线性气候动力学等方面的研究。E-mail:fenggl@cma.gov.cn

1 引言

中国地处东亚区域,气候条件复杂,降水等气象要素年际变率大、区域差异明显,这些都为区域气候预报带来一定的困难。长江中下游地区人口和工业密集,是中国重要的经济产业区。围绕该地区汛期降水的预报研究,相关学者展开了大量的工作,对该地区夏季降水的前期影响机制有了一定的认识(陈隆勋,1984; Tao, et al, 1987; 黄荣辉等, 1994; 吴国雄等, 1995)。但是,目前对于该地区的夏季降水量总的预报水平还不高,模式的结果仅能提供有限的参考。近年来,随着观测资料的不断积累及模式的改进,季节预测方法和技巧都有了新的提高。例如范可等(2007)提出了一种基于区域降水年际增量的预报新方法,成功地模拟了1980—2006年长江中下游夏季降水的趋势;柯宗建等(2009)利用多模式资料结合降尺度预报中国地区降水也取得一定进展。此外,动力和统计相结合是提高短期气候预报准确率比较有效的途径之一(Chao, et al, 1982; Van Den Dool, 1994)。顾震潮(1958)、丑纪范(1974, 1986)从理论上论证了在数值预报中使用历史资料实现动力和统计相结合的可行性,曹鸿兴(1993)提出大气运动自记忆性,推导出包含多时次观测资料的自记忆性方程,在该方面取得了一系列的研究成果(封国林等, 2001; 任宏利等, 2006; 郑志海等, 2009),有效地提高了短期气候预测水平,但是,在区域降水预报的研究方面尚未很好地发挥作用。

众所周知,前期某些关键气候因子的异常,往往会对汛期降水的异常程度产生影响,例如厄尔尼诺和拉尼娜事件等。对于出现厄尔尼诺的年份,热带西太平洋暖池上空上升气流将东移,并且,将大量来自海洋的热量和水汽带到副热带地区,使副热带高压(副高)加强,而副高的强度和位置直接影响中国汛期降水的主雨带位置。以往的资料分析表明,在厄尔尼诺发生的次年汛期,中国长江流域和东北地区易于发生强降水,拉尼娜事件对次年中国汛期降水的影响基本与之相反,这为中国汛期降水预测提供了一定依据。但事实证明,通过单个气象要素的异常状况并不能准确预测区域汛期降水的分布特征,例如1998和1999年前期分别为厄尔尼诺和拉尼娜年,这两年长江中下游地区的汛期降水较往年却都明显偏多,出现了比较严重的洪涝灾害。因此,

进行长江中下游地区汛期降水预测时,有必要考虑前期多因子异常的影响状况,但这也为该地区的汛期降水预测增加了难度。

针对以上长江中下游汛期降水预测中存在的一些问题,本文基于历史相似信息对动力模式的误差进行预报的思路,根据预报年前期因子相对于平均态的正负异常的状况,在历史因子资料中寻找同期异常相似的年份,通过多因子异常的相似确定相似年,并对误差场利用经验正交函数分解(EOF)压缩维度,用前3个主分量预报模式误差场,提出了基于因子异常相似的模式误差预报的新方法。利用该方法对长江中下游地区(27.5° — 32.5° N, 110° — 122.5° E) 2005—2009年的汛期降水进行了独立样本回报试验。

2 资料和方法

2.1 资料介绍

本文根据国家气候中心(NCC)的数值预报业务模式(ONPM)生成的1983—2009年回报降水资料集,选用2月底起报的48个初始场每年6—8月集合平均结果,将美国气候预报中心的格点降水资料(CMAP)作为实况观测资料,结合27年ONPM回报的汛期预报降水量求出历年ONPM预报误差。利用国家气候中心气候系统诊断预测室提供的74项环流特征量和美国大气海洋局(NOAA)的40项气候指数作为前期因子选取相似年误差场。

2.2 误差预报方法介绍

对于汛期降水预报而言,ONPM存在误差变率较大的特点。图1给出了ONPM逐格点的预报误差(实际降水值减去ONPM预报值),其中,27a预报误差基本都大于0,说明模式预报结果相对偏小,但也有个别格点的预报值明显偏大,比实际降水量高出近1200 mm,这表明模式预报结果存在着偏差,需要利用历史信息来减小模式预报误差。从图1还可以看出,同一格点预报误差在27a内的变化很大,因此,若只用传统的系统误差订正方法(除预报年误差资料外,利用资料中其他年份的所有误差场求算术平均得到系统误差)对模式的预报结果进行订正,对于降水异常引起的偏离平均态较远的误差,如图1中的1985、1998和1999年,则不能很好地订正。但是,在历史资料中如果能有针对性地将与预报年误差比较接近的年份提取出来,将这些年

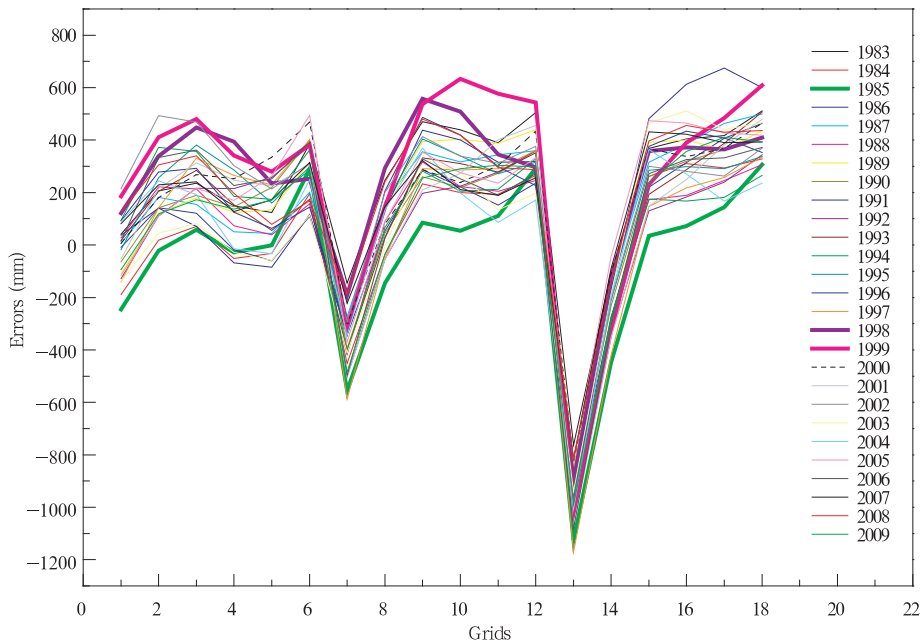


图 1 1983—2009 年长江中下游地区 ONPM 格点降水预报误差
Fig. 1 Precipitation errors of the ONPM vs. grids for the mid-lower reaches of the Yangtze River from 1983 to 2009

份的误差场合成为预报年的模式误差,实施对模式预报误差的预报,则可以取得比较好的订正效果。

大气是一个开放耗散的非线性系统,存在着大气系统状态向外源适应的过程。长期业务预报的经验表明,在相似的初始值和边界条件下,大气的演变在一定的时间范围内状况往往也相近(任宏利等, 2007a, 2007b)。据此在相似动力模式中,可以将当前的预报场 ψ 看成是历史相似 $\tilde{\psi}$ 加上一个小扰动 $\hat{\psi}$, 即 $\psi = \tilde{\psi} + \hat{\psi}$, 模式预报结果则为

$$\hat{R}(\psi_0) = R(\psi_0) + \tilde{R}(\tilde{\psi}_j) - R(\tilde{\psi}_j) \quad (1)$$

其中, $\hat{R}(\psi_0)$ 为进行误差项相似估计的情况下所得到的预报结果, $R(\psi_0)$ 为数值预报模式对当前初值 ψ_0 的预报结果, $\tilde{R}(\tilde{\psi}_j)$ 为历史相似对应的实况, $R(\tilde{\psi}_j)$ 为历史相似初值的预报结果。将式(1)在预报时段上取月或季节的平均,即可得

$$\hat{R}_{MM}(\psi_0) = R_{MM}(\psi_0) + \tilde{R}_{MM}(\tilde{\psi}_j) - R_{MM}(\tilde{\psi}_j) \quad (2)$$

$$\hat{R}_{SM}(\psi_0) = R_{SM}(\psi_0) + \tilde{R}_{SM}(\tilde{\psi}_j) - R_{SM}(\tilde{\psi}_j) \quad (3)$$

以上两式分别为月平均和季节平均的相似误差订正方程。相似误差订正方程的本质是引入历史相似对应的预报误差信息来估计当前的预报误差,即式(1)右端的 $\tilde{R}(\tilde{\psi}_j) - R(\tilde{\psi}_j)$, 从而减小数值模式误差,将动力预报问题转化为预报误差的估计问题。

另一方面,由于因子异常可以代表前期气候背景场的主要特征,因此,本文通过分析预报年前期因子异常,寻找历史上同期出现异常的相似年份,将与其对应的 ONPM 历史误差合成为模式预报误差,实施对 ONPM 误差的预报。

3 基于因子异常压缩维度的 ONPM 误差预报试验

3.1 长江中下游地区汛期降水及前期异常因子统计

针对所选取的 27 a 长江中下游地区降水场资料,将逐年夏季降水量作距平处理得到降水距平序列(图 2),取序列的标准差 σ 为划分降水等级标准,若降水距平值大于 1.5σ 代表降水异常偏多,小于 1.5σ 代表降水异常偏少。可以得到在 27 a 中 1998、1999 年为降水异常偏多年,1985 年为降水异常偏少年。

将 114 项气候因子的逐月资料(可构成 $114 \times 12 = 1368$ 条因子序列),类似于降水的异常划分方法,初步将逐月因子的标准化后序列 x_i 进行分级,若 $x_i > \bar{x} + 1.5\sigma$ 则定为因子为异常偏大,若 $x_i < \bar{x} - 1.5\sigma$ 则定为因子异常偏小,其中 $\bar{x}$ 为标准化后序列的平均值, σ 为序列的标准差。以此为标准,对 1983—2009 年汛期前期因子(前一年 2 月至当年 1

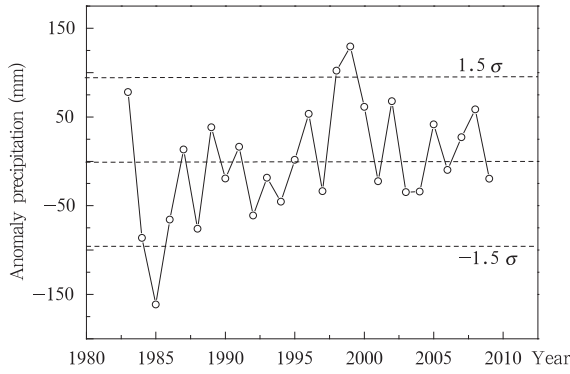


图2 1983—2009年长江中下游地区
夏季平均降水量距平

Fig.2 Anomalies of the precipitation
of the mid-lower reaches of the Yangtze
River in summer from 1983 to 2009

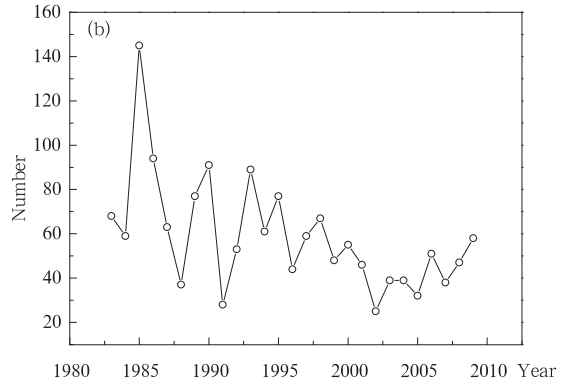
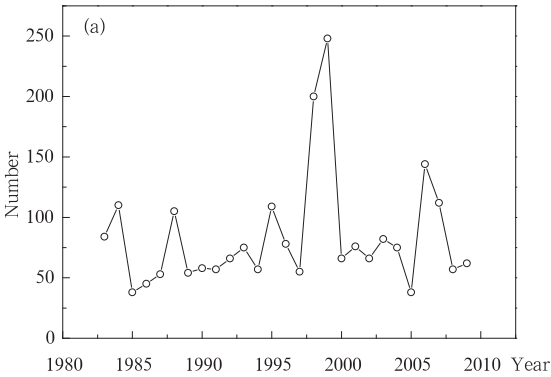


图3 1983—2009年前期因子异常个数统计(a. 异常偏大,b. 异常偏小)

Fig.3 Statistics of the number of the pre-anomaly indexes from 1983 to 2009
(a. extremely bigger than normal, and b. extremely smaller than normal)

近的因子异常年份,则可以提取出相应的历史模式误差对 ONPM 误差进行预报。

3.2 因子异常相似参数的确定

在汛期前期因子异常情况下,从因子的历史资料中寻找出异常程度相近的年份。例如以大于(小于)时间序列 $x(t)$ 平均值的 1.5σ 倍为标准,确定出序列中异常偏大(小)的事件,对于一个异常偏大(小)事件其值设为 x_0 ,将该点所在的时刻视为预报前期,给定一个小值 $q(q \ll x_0)$,在 $(x_0 - q, x_0 + q)$ 的值域范围内寻找前期历史资料中与因子异常事件 x_0 相近的 4 个相似事件 x_1, x_2, x_3, x_4 。若利用该单因子对 ONPM 误差进行预报,将 4 个相似事件 x_1, x_2, x_3, x_4 随后年份的模式误差场进行合成即可得到 ONPM 的预报误差。对于前期多个因子出现异

月)异常状况进行了统计(图 3)。

从图 3a 中可以看出,1983—2009 年历年前期都会出现因子异常情况,其中 1998 和 1999 年前期,因子异常偏大的个数明显要高于其他各年,而此两年前期分别出现了强厄尔尼诺和拉尼娜事件,其影响波及全球诸多地区;图 3b 中显示的是 27 a 前期因子异常偏小的个数,其中 1985 年异常偏小的因子个数明显多于其他年份,而该年恰好对应降水异常偏少年份。综上所述,区域汛期降水异常的年份,不仅是某个关键因子决定的结果,往往是多个因子共同作用的结果,这些因子如果在前期异常偏大(小),对汛期降水的影响也会更加明显,因此可以视作对汛期降水起主导作用的关键因子集合。若能通过前期多个因子异常在历史因子集中找到对应的较为接

常的情况,可以将因子序列标准化后,类似以上过程分别选择前期异常因子的相似年份,计算前期异常因子与寻找到的历史异常间的欧氏距离,利用欧氏距离的排序限定相似年的个数,选用前几个历史误差场,继而预报模式误差。但是在历史资料中寻找因子异常的相似事件时,因子异常量级的确定对寻找相似因子有直接影响,并且 q 值的大小也会影响选取相似年的个数确定。此外,若多个因子异常确定了较多的相似年份,是否需要将所有与之对应的误差场都集合平均才能取得最佳的误差预报效果呢? 基于以上问题,进行如下试验。图 4 给出了在不同的阈值 P (以因子序列的标准差 σ 的倍数表示)划定的因子异常条件下,利用相似误差订正的交叉检验 27 a 平均的距平相关系数(ACC)。为保证试验

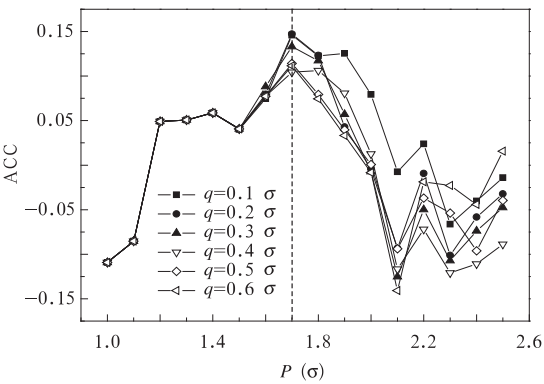


图 4 27 a 交叉检验平均距平相关系数随阈值的变化
Fig. 4 Changes of the 27-year averaged cross-checking ACC with thresholds for different anomaly indexes

的结果具有一定的普适性,计算了 6 种不同的 q 值下利用前期因子异常寻找历史相似的交叉检验订正效果。研究表明,在不同小值 q 限定的范围内,27 a 交叉检验距平相关系数平均值基本都在 $P = 1.7\sigma$ 处达到最大,因此,本文在以下处理过程中取 P 为 1.7σ ,依此标准划分因子异常偏大(小)。

在阈值 P 确定的情况下,讨论小值 q 和选取的相似年个数 N 对交叉检验结果的影响。图 5 给出 q 取不同值时,利用前期因子异常对 ONPM 误差进行相似误差预报,得到 27 a 交叉检验平均距平相关系数随相似年个数 N 的变化。从图中可以看出,在历史资料中选取的相似年个数为 10 个时,各种 q 值条件下平均距平相关系数基本都会出现峰值。其中当 q 取值为 0.4σ 时,得到的 27 a 平均距平相关系数最

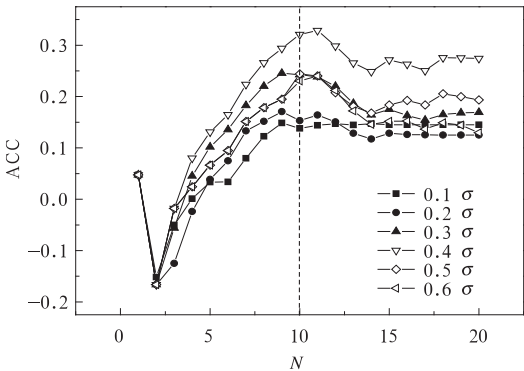


图 5 27 a 交叉检验平均距平相关系数随选取的相似年个数的变化
Fig. 5 As in Fig. 4 but under different thresholds with different analogue years

大。所以,本文在以下试验中取 $q = 0.4\sigma$,通过因子异常偏大(小)选取的相似年分别选择 10 个(重复选择的年份单独作为一个,不足 10 个的以实际个数为准,对于在历史资料中寻找不到因子异常相似的情况以系统误差进行订正)。

3.3 误差场维度压缩的回报检验

模式误差根据可预报性一般分为可以预报的系统误差和不可预报的随机误差两类。理论上可以证明(丑纪范,1974),大气会向外源非线性适应,即随着时间增长,信息的耗散使许多小尺度快变分量可以略去,仅有少数维度支撑大气吸引子。因此,可以利用经验正交函数分解,用累积解释方差占比较大比例的前几个主分量代表误差场的主要信息,看作系统误差,对该部分利用历史资料中的相似信息进行预报;其余特征向量视为由随机误差造成,是不可预报的,用历史平均态来代替。图 6 给出利用 12 月西太平洋副高面积指数结合 ONPM 误差场经验正交函数分解(施能,1992)后不同主分量的相似误差订正结果。

由图 6 可知,不同的主分量在相似误差订正中的作用是不同的,相对而言长江中下游地区 ONPM 误差场前 3 个主分量起着重要作用,而从第 4 个主分量开始,27 a 交叉检验平均距平相关系数急剧下降,基本维持在 0 以下(图 6a)。由此可以推断,在该区域相似误差订正过程中,若仅对误差场前 3 个主分量的时间系数进行预报,从而计算出前 3 个主分量的预报值,其余各主分量作为随机误差部分,通过历史平均态求取,更具有针对性。进一步,在图 6b 中比较了利用系统误差订正(sys)、12 月西太平洋副高面积指数相似误差订正(ana)及其对模式误差场前 3 个主分量相似误差订正(anae)效果。3 种情况下平均距平相关系数分别为 -0.10 、 0.30 、 0.38 ,由此可见压缩维度方法可以进一步改善相似误差订正的效果。

4 ONPM 误差预报方案及独立样本回报试验

4.1 基于因子异常的压缩维度的 ONPM 误差预报方案

利用历史资料中相似信息预报 ONPM 误差的原理以及上述数值试验的结果,本文采用如下具有针对性的 ONPM 误差预报方案:

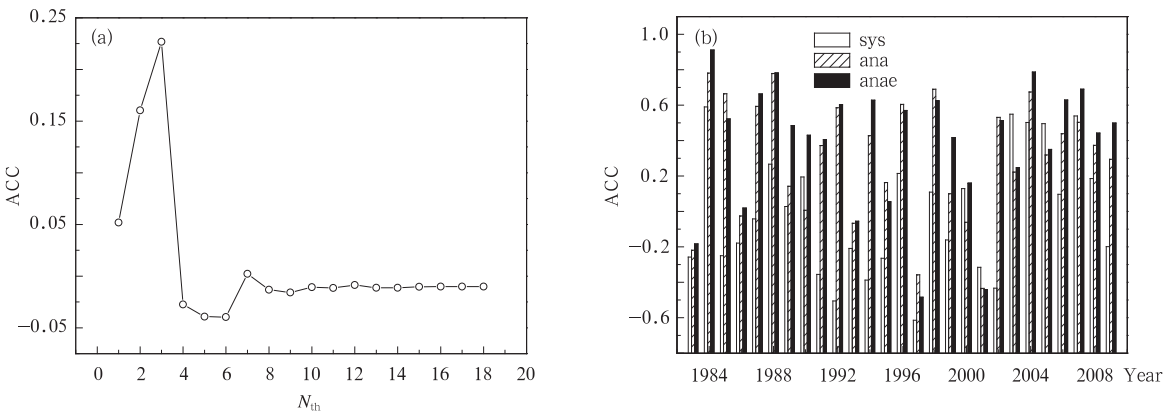


图6 利用误差场主分量进行相似误差订正交叉检验平均的距平相关系数 (a. 单个主分量, b. 不同方法交叉检验的距平相关系数; sys: 系统误差订正; ana: 相似误差订正; anae: 基于误差场前 3 个主分量的相似误差订正)

Fig. 6 Averaged cross-checking ACC based on the analogue error correction using the principle component of the error field for (a) a single principle component, and (b) ACC under different methods (“sys”: sys correction; “ana”: analogue correction; and “anae”: analogue correction with EOF)

(1) 根据 CMAP 历年降水资料和历年 ONPM 回报结果计算汛期降水历年 ONPM 预报误差;

(2) 将 114 项指数在预报年(以 2009 年为例)的 1 月因子和前一年(2008 年)的 2—12 月因子作为预报年前期因子,利用各单因子以交叉检验的方式对模式结果进行相似误差订正,与 CMAP 降水资料对比,得到单因子相似误差订正 26 a(1983—2008 年)平均距平相关系数排序;

(3) 对距平相关系数大于 0 的前期因子分级,得到异常偏大和异常偏小的前期关键异常因子集;

(4) 针对预报年前期关键异常因子集,在历史上寻找值域范围接近的相似年;对于同种异常(都偏大或偏小),如果选取的因子间相关系数通过了 0.001 信度检验,则以单因子交叉检验平均距平相关系数为标准去除单因子订正评分较低的因子;

(5) 将 ONPM 误差场进行经验正交函数分解,对前 3 个主分量进行相似误差订正,其他主分量以气候平均态代替;

(6) 以前期关键异常因子集寻找到的前 10 个年份作为相似年(根据欧氏距离判断)。若寻找到的相似年少于 10 个,则按照选取到的年份进行计算,若前期因子无异常或没有寻找到历史上存在异常的相似年份,则按照系统误差订正处理,最终得到预报年份(2009 年)ONPM 的预报误差。

4.2 独立样本回报试验

利用上述 ONPM 误差预报方案,并且,为保证有尽可能多的历史信息可用,对 2005—2009 年的长江中下游地区汛期降水进行了独立样本回报试验,结果如表 1 所示。

表 1 2005—2009 独立样本回报试验的距平相关系数和均方根误差

Table 1 The experiment verification of the independent samples for the different methods from 2005 to 2009

		2005	2006	2007	2008	2009	平均
距平相关系数	sys	0.35	0.22	0.52	0.21	-0.20	0.22
	ana	0.47	0.57	0.397	0.40	0.53	0.47
均方根误差(mm)	sys	111.36	83.36	87.91	95.09	67.14	88.97
	ana	125.27	80.56	80.14	82.59	44.64	82.64

研究结果表明,2005—2009 年基于因子异常的误差场 3 主分量的相似误差订正明显优于系统误差订正结果,5 a 距平相关系数分别为 0.47、0.57、0.40、0.39、0.53,都在 0.30 以上,高于当前该区域

汛期预报业务应用水平。虽然 5 a 的系统误差订正平均距平相关系数也可以达到 0.22,但在 2009 年 ACC 为 -0.20,体现了系统误差订正并不稳定的缺点。相似误差订正 5 a 距平相关系数平均为 0.47,

比系统误差订正提高了0.25。表1同时列出采用两种误差订正方法后的历年均方根误差(RMSE),从表中可以看出均方根误差总体有了一定的减小,5 a均方根误差平均从系统误差订正的88.97 mm减小到82.64 mm。从图7可以看出,通过因子异常选取相似结合误差场维度压缩的方法,对ONPM结果进行相似误差订正后,预报误差明显减小(与图1比较),误差范围从-1200—600 mm减小为-150—200 mm,并且对于大多数格点而言,相似误差订正后的误差基本在-100—100 mm。图8以2009年为例,给出降水距平百分率实况与独立样本回报的比较。长江中下游地区2009年汛期降水总体呈现东多西少的分布,该区域中包含的湖南、湖北、安徽、江西等地区降水普遍偏少,在浙江西部和东部钱塘江口降水也偏少,仅在江苏南部和浙江中东部区域降水偏多,区域总体较气候平均态偏少(图8a)。系统误差订正后模式预报的区域降水总体偏多,并且东少西多,仅在浙江东北部出现了降水偏少的情况,与实况降水场的距平相关系数为-0.20,和实况基本相反(图8b)。采用相似误差订正后模式

预报的区域降水分布与实况的降水分布型较为类似,与实况降水场的距平相关系数为0.53,达到了较好的预测效果(图8c)。综上所述,本文采用的误差预报方法能有效地提高长江中下游地区汛期降水的预报水平。

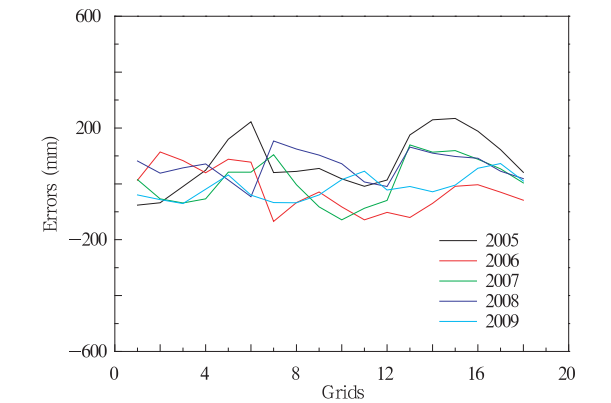


图7 2005—2009年长江中下游地区相似误差订正后格点预报误差
Fig. 7 Errors of the model prediction vs. grids which are done after the analogue error correction for the mid-lower reaches of the Yangtze River from 2005 to 2009

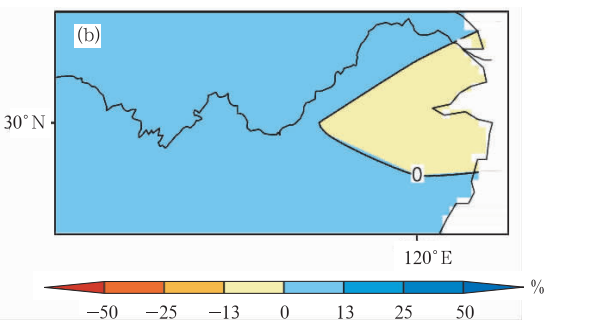
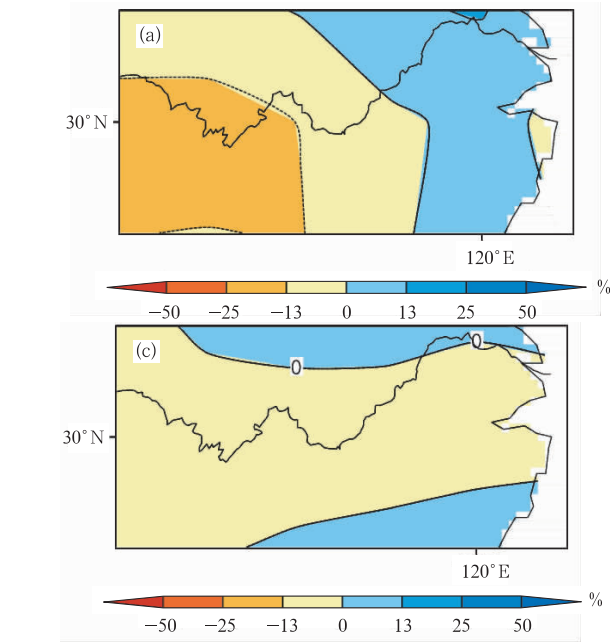


图8 2009年长江中下游汛期降水距平百分率独立样本回报结果比较
(a. 实况, b. 系统误差订正后模式预报, c. 相似误差订正后模式预报)

Fig. 8 Comparisons of the independent sample regression outcomes for the year of 2009 between (a) the precipitation anomaly percentage of the in-situ observation; (b) that revised by the systematic error correction; and (c) that revised by the analogue error correction

5 结 论

根据历史相似信息对动力模式的误差进行预报,既利用了动力数值预报模式的已有成果,又充分考虑了大气演变的历史资料信息,实现了动力与统

计方法的结合。首先对1983—2009年汛期前期气候因子进行分析,发现近27 a汛期前期总会出现部分因子异常的状况。在此基础上,根据有针对性的前期因子异常在历史资料中寻找相似年,通过数值试验选择合适参数,提出基于因子异常相似的压缩

维度的模式误差预报新方法, 将该方法应用于长江中下游汛期降水回报试验, 明显改进了区域汛期降水预报技巧。2005—2009 年独立样本回报结果表明, 该方法有比较好的稳定性和有效性, 可以将 5 a 平均的距平相关系数从系统误差订正的 0.22 提高到 0.47, 平均均方根误差从 88.97 mm 减小到 82.64 mm, 验证了本文所用方法具有一定潜在的业务应用价值。当然, 利用前期因子异常选取的相似年份与所用资料的长度有关, 并且前期关键异常因子间的相互关系及其对区域汛期降水的综合作用机制等问题还需要进一步深入研究, 数值预报业务模式的预报水平仍需要不断提高。

参考文献

- 曹鸿兴. 1993. 大气运动的自忆性方程. 中国科学(B辑), 23(1): 104-112
- 陈隆勋. 1984. 东亚季风环流系统的结构及其中期变动. 海洋学报, 6(6): 744-758
- 丑纪范. 1974. 天气数值预报中使用过去资料的问题. 中国科学(A辑), (6): 635-644
- 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
- 范可, 王会军, Choi Y J. 2007. 一个长江中下游夏季降水的物理统计预测模型. 科学通报, 52(24): 2900-2905
- 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
- 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
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响. 大气科学, 18(2): 141-151
- 柯宗建, 张培群, 董文杰等. 2009. 最优子集回归方法在季节气候预测中的应用. 大气科学, 33(5): 994-1002
- 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. 物理学报, 55(8): 4388-4396
- 任宏利, 丑纪范. 2007a. 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
- 任宏利, 丑纪范. 2007b. 动力相似预报的策略和方法研究. 中国科学(D辑), 37(8): 988-993
- 施能. 1992. 气象统计预报中的多元分析方法. 北京: 气象出版社, 210-227
- 吴国雄, 刘还珠. 1995. 降水对热带海表温度异常的邻域响应 I: 数值模拟. 大气科学, 19(4): 422-434
- 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. 物理学报, 58(10): 7359-7367
- Chao J P, Guo Y F, Xin R N, et al. 1982. A theory and method of long range numerical weather forecasts. Meteor Soc Japan, 60: 282-291
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A Review of Recent Research on the East Asian Summer Monsoon in China. Oxford: Oxford University Press, 60-92
- Van Den Dool H M. 1994. Searching for analogues, how long must we wait? Tellus, 46A(3): 314-324