

汛期降水相似动力预报 —— 模式误差 主分量相似预报方法*

熊开国¹⁾ 赵俊虎²⁾ 封国林^{2)3)†} 黄建平¹⁾ 胡经国³⁾

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) (扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225009)

(2011年10月21日收到; 2011年11月25日收到修改稿)

针对相似动力预报中模式预报误差的估计问题, 提出将模式误差的直接相似订正问题转化成模式误差主分量的相似预报问题. 客观上将模式误差主分量分成可预报和不可预报两部分, 对于可预报主分量采用最优多因子动态配置方案进行相似预报, 而对于不可预报部分则用系统平均代替. 基于国家气候中心季节预报业务模式、美国气候预报中心组合降雨分析资料及国家气候中心气候系统诊断预报室 74 项环流指数和美国国家海洋和大气管理局的 40 个气候指数, 对东北区域汛期降水进行了预报试验. 2005—2010 年 6 年独立样本检验预报平均距平相关系数为 0.29, 较系统误差订正预报的 0.04 有较大提高, 证实该方案能提高国家气候中心季节预报业务模式汛期降水预报水平.

关键词: 相似 - 动力预报, 主分量, 误差订正, 汛期降水

PACS: 92.60.Wc, 91.30.pd

1 引言

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. 以全国汛期降水预报为重点的季节预报, 对国家防灾减灾工作起着重要的作用, 一直是国家防灾减灾工作的重中之重. 因此短期气候预测的研究, 尤其是汛期降水预报问题, 是国内外学者关注的焦点.

短期气候预测主要有两种方法, 即依靠历史数据、提取演化规律的统计方法和依靠物理定义概念建立数值模式的动力学方法, 二者都有优势和各自的缺陷. 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. 早在 1958 年, 我国学者顾震潮^[1]就提出将数值预报从初值问题改为演变问题, 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, 随后, 丑纪范^[2]从原则上提出在长期预报中实现动力和统计相结合的做法. 在此基础上, 基于不同原理的动力统计相结合的预报方法相继被提出, 如相似动力学方法^[3-5]、基于大气自记忆原理的方法^[6-10]等. 近年来, 随着观测资料的增多和模式性能的不断改进, 短期气候预测取得了长足的发展^[11-15], 但目前的业务水平依然不高, 仍需进一步提升预报水平.

主分量分析是一种多变量数学分析方法之一.

* 国家自然科学基金 (批准号: 41105055, 41075058)、公益性行业科研专项 (批准号: GYHY201106016) 和国家科技支撑计划 (批准号: 2007BAC29B01, 2009BAC51B04) 资助的课题.

† E-mail: fenggl@cma.gov.cn

1956年 Lorenz 首先应用其对北美海面上的空气场进行了气象现象的解析. 主分量分析方法具有对各种气象要素水平分布的优势型进行正交分离, 同时能反映其时间变动的特性, 所以将主分量分析用于气象要素预报的各种方法便应运而生. 1982年 Paegle 和 Haslam^[16] 用特征值来统计预报 500 mb 高度场; 随后类似方法相继被用于降水^[13,17-24] 和温度的预报^[25] 及日时间序列的产生^[26]. 众所周知, 降水具有局地性强的特点, 而一个区域气候要素的时间变化和其他地点的相同要素以及其他要素还有相互制约、相互依存的特点^[27]. 汛期降水模式预报误差作为汛期降水和季节预报模式预报结果的差值, 必然也存在这样一些特点. 在最优多因子动态配置汛期降水相似动力预报的基础上, 提出最优多因子动态配置模式误差主分量相似预报方法, 从而可以将模式误差的相似预报问题转化成模式误差主分量的相似预报问题.

本文首先介绍了最优多因子动态配置模式误差主分量相似预报方法, 然后以中国东北区域 (110°E—135°E, 40°N—52.5°N, 共 66 个格点) 汛期降水预报为例, 对 2005—2010 年东北区域汛期降水进行了独立样本检验预报试验, 并将该方法推广到东北区域汛期降水主分量的相似预报, 讨论了该预报方法的普适性问题, 最后针对 2010 年东北区域汛期降水预报, 对东北区域汛期降水的影响因子进行了分析, 并就相似动力预报的前景进行了讨论.

2 资料

目前, 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^[28,29], 从其多年平均的预报评分看来, 预报技巧还不高^[13]. 本工作的目的正是从反问题的角度通过有效利用历史资料的有用信息来提高该模式对汛期降水的预报水平. NCC 海气耦合模式的水平分辨率为 1.875°×1.875°. 本文所采用的动力模式资料是该模式 1983—2010 年共 28 年回报和预报降水数据, 这里选用 2 月底起报的 48 成员每年 6—8 月集合平均结果, 并将其插值到 2.5°×2.5° 空间. 将美国 CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation) 降

水分析资料的汛期总降水量作为实况观测资料, 汛期降水模式预报误差场即 CMAP 与模式预报降水的差值场. 历史相似选自国家气候中心气候系统诊断预报室的 74 项环流指数及美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的 40 项气候指数.

3 相似动力预报 - 模式误差主分量相似预报方法

3.1 模式误差场主分量相似预报

类似气象场, 模式误差场也可以看成时间和空间的函数. 例如模式误差场 $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{m1} & e_{m2} & \dots & e_{mn} \end{bmatrix}$, 其中 m 是空间点, n 是时间点, 也就是样本数. 模式误差场的经验正交函数 (EOF) 分解是将模式误差场 \mathbf{E} 分解成空间函数 (特征向量) \mathbf{V} 和时间函数 (时间系数 (主分量/主成分)) \mathbf{T} 两部分^[30,31]:

$$\mathbf{E}_{m \times n} = \mathbf{V}_{m \times m} \mathbf{T}_{m \times n}, \quad (1)$$

其中 $\mathbf{V}_{m \times m} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mm} \end{bmatrix}$, $\mathbf{T}_{m \times n} =$

$\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{m1} & t_{m2} & \dots & t_{mn} \end{bmatrix}$. 由于特征向量矩阵 $\mathbf{V}_{m \times m}$ 的

近似不变性, 在预测每个特征向量对应的下一时刻的时间系数 $\mathbf{T}_{i,(n+1)}$ ($i = 1, 2, 3 \dots m$) 的前提下, 由 $\mathbf{E}_{m \times (n+1)} = \mathbf{V}_{m \times m} \mathbf{T}_{m \times (n+1)}$, 可得第 $n+1$ 年模式误差场, 即预测了第 $n+1$ 年模式误差.

一般而言, 累积解释方差大于一定阈值的前 h ($h < m$) 个主分量包含了原变量场变化的大部分信息, 能够反映出变量场的主要变化模态, 因此可对前 h 个 EOF 主分量进行相似预报 (如何确

定相似预报主分量个数 h 见下文), 其余 $(m - h)$ 主分量视为噪声, 用系统平均值进行预报, 表示如下:

$$\begin{aligned} T_{i,(n+1)} &= \frac{\sum_{k=1}^j b_k T_{i,k}}{\sum_{k=1}^j b_k} \quad (i = 1, h), i \leq h, \\ T_{i,(n+1)} &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n T_{i,k} \quad (i = h + 1, m), i > h, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 i 为主分量序号, k 为针对这一主分量选取的历史相似场, $k = 1, 2, 3 \dots j$ 代表第一、第二、第三……第 j 历史相似场, j 为选取历史相似场的个数, $T_{i,k}$ 和 $T_{i,(n+1)}$ 分别为第 i 主分量第 k 历史相似场对应时间系数和第 $n + 1$ 年时间系数, b_k 为待定相似系数.

历史相似场所对应的时间系数和预报时间系数的相近程度直接反映预报的准确度, 因此历史相似场判定的合理性显得至关重要, 此外历史相似场个数的选取也会对预报结果产生一定影响. 在相似动力模式误差预报问题上, 众多研究者将欧氏距离作为选取相似年的条件且选取 4 个历史最相似对应的模式误差的平均作为预报年的模式误差^[10,12], 相似算法表述如下:

$$AI = \left(\frac{\sum_{i=1}^m w_i (\varphi'_{ij} - \varphi'_{ik})^2}{\sum_{i=1}^m w_i} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

其中 φ'_{ij} 和 φ'_{ik} 分别代表 j, k 两个时刻的场, w_i 为权重. 欧氏距离 AI 越小则说明初始场和历史场越相似. 本文也将欧氏距离作为历史相似场的选取判据且用 4 个历史最相似场对应的时间系数 $T_{i,k}$ 的线性平均来预估 $T_{i,(n+1)}$. 此时模式误差主分量相似预报方程可表示为

$$\begin{aligned} T_{i,(n+1)} &= \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 T_{i,k} \quad (i = 1, h), i \leq h, \\ T_{i,(n+1)} &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n T_{i,k} \quad (i = h + 1, m), i > h. \end{aligned} \quad (4)$$

3.2 最优多因子动态配置模式误差主分量相似预报方法及流程

我国地处东亚季风区, 自然条件复杂, 气候变化剧烈, 汛期降水的影响因子很多, 影响关系错综复杂, 任何单因子和单因素对中国主汛期雨型和各区域旱涝的影响不可能都占主导地位, 用任何单因

子和单要素来预报主汛期雨型和主要区域旱涝的预报准确率也不可能很高. 只有用多种高相关的物理因子的有机综合预报模型才能对多数年份的主汛期雨型和旱涝做出相对较准确的预报^[14,32]. 汛期降水预报的难度之一就是每年主要影响因子的选取, 本节重点讨论主要影响因子(主导因子)的选取和多因子的有机综合(最优多因子配置)的原理和方法.

类似作者的前期工作^[14], 这里预报每个主分量的主导因子是通过单因子交叉检验预报这一模态对应时间系数与实际时间系数之间的相关系数排序确定, 对这个主分量回报技巧最高的因子则认为是预报该模态的主导因子. 而最优多因子动态配置则在前期工作的基础上, 针对演化相似因子, 在优化因子配置的过程中剔除了高相关因子, 从而保证了预报因子之间的独立性. 由于中国地域广阔、地形复杂, 且各个区域气候的影响因子差异较大, 因此, 下文只对中国东北区域汛期降水进行预报试验和影响因子分析, 其他区域雷同. 图 1 即为最优多因子动态配置模式误差主分量相似预报流程.

下面以该区域 2010 年汛期降水预报为例介绍其预报流程. 2010 年的预报是建立在对前 5 年即 2005 到 2009 年“可预报”模态敏感性独立样本检验预报试验的基础上. 根据这 5 年独立样本检验预报技巧确定模式误差的可预报模态和不可预报模态, 对可预报模态进行最优多因子动态配置相似预报, 不可预报模态则用系统平均值进行代替. 具体步骤如下.

第 1 步: 2005—2009 年东北区域汛期降水“可预报”模态敏感性的独立样本检验预报试验

以 2005 年为例介绍 2005—2009 年独立样本检验预报. 首先, 基于 CMAP 降水资料和同期模式资料得到 1983—2004 年东北区域历史汛期降水预报模式误差集及相应的模式误差距平场. 然后, 对模式误差距平场进行 EOF 分解, 依次取前 1—9 个模态作为“可预报”模态进行最优多因子动态配置相似预报, 而其余模态的方差贡献已经很小, 则视为随机不可预报模态. 由图 2 可以看出不管是对于模式误差还是 CMAP 降水, 前 9 个模态都解释了各自 90% 以上的累积方差贡献, 也就是说包含了各自

变量场绝大部分的信息. 对每个“可预报”模态进行独立样本检验预报的步骤详见文献 [14]. 最后, 基于可预报模态预报的时间系数和不可预报模态估计的时间系数及对应特征向量综合合成模式误差距平场及模式误差并订正业务模式结果得到 2005 年降水预报结果. 同理可得 2006—2009 年东北区域汛期降水独立样本检验预报结果.

第 2 步: 确定可预报模态

根据近 5 年依次取模式误差前 1—9 模态进行独立样本相似预报平均距平相关系数 (ACC) 确定可预报模态, 具体可见图 3. 图 3 为针对 2005—2009 年东北区域汛期降水预报, 依次取模式误差前 1—9 模态进行最优多因子动态配置相似预报的 ACC 随相似预报模态个数的变化情况, 可以发现随着相似预报模态个数的增加 ACC 呈现很好的先增大后减小特征, 相对这 5 年而言, 取前 6 个模态进行相似预报技巧最高. 因此认为 2010 年东北区域汛期降

水模式误差的前 6 个模态是可预报的, 而其他模态则视为不可预报的噪声.

第 3 步: 2010 年汛期降水预报

采用第 1 步中模态预报方法对 2010 年汛期降水进行预报, 只是此步仅需对第 2 步中确定的前几个模态进行相似预报, 其余模态用系统平均进行估计.

4 2005—2010 年东北区域汛期降水独立样本预报方法对比分析

根据以上降水预报流程对东北区域 2005—2010 年汛期降水进行了独立样本检验预报. 为考察相似动力预报因子的物理意义及最优多因子动态配置模式误差主分量相似预报方法的稳定性, 设计了以下实验方案进行比较分析:

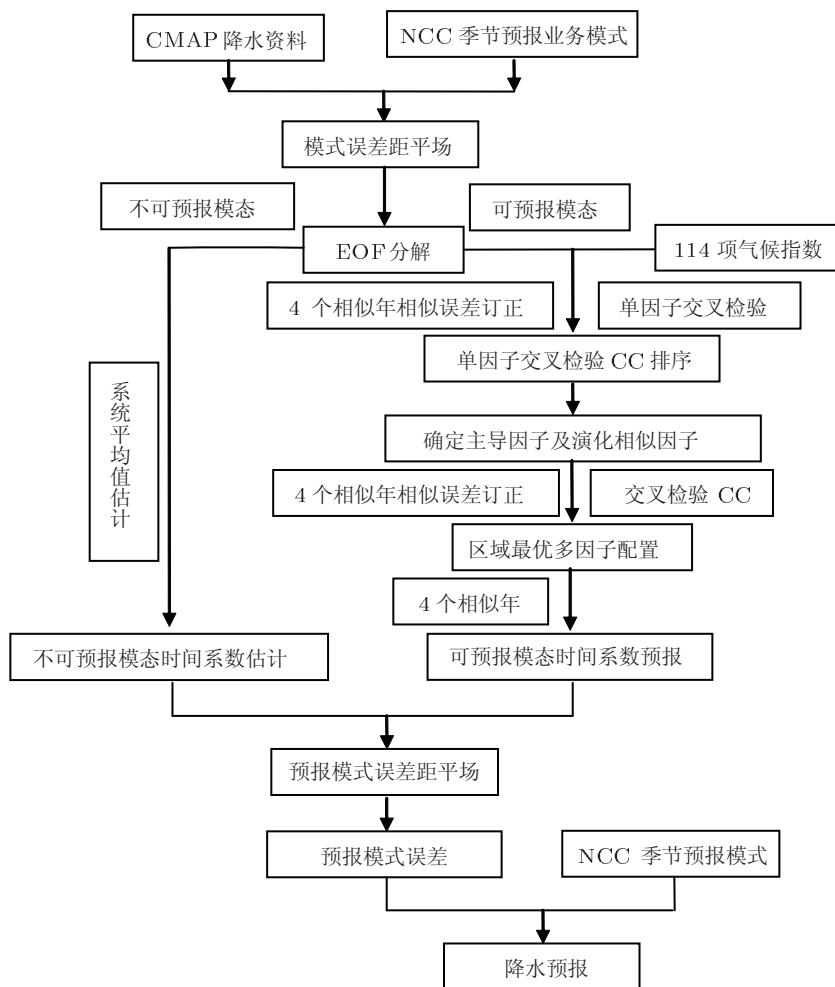


图 1 最优多因子动态配置模式误差主分量相似预报流程

- 方案 1: 控制方案, 系统误差订正预报 (SYS);
- 方案 2: 最优多因子动态配置的模式误差主分量相似预报 (ANA);
- 方案 3: 方案 2 预报因子在 CMAP 主分量相似预报中的应用 (ANA-STA);
- 方案 4: 最优多因子动态配置 CMAP 主分量相似预报 (STA);
- 方案 5: 方案 4 预报因子在模式误差主分量相似预报中的应用 (STA-ANA).

表 1 2005—2010 年独立样本检验预报平均 ACC 和 RMSE

| | SYS | ANA | ANA-STA | STA | STA-ANA |
|------|-------|-------|---------|-------|---------|
| ACC | 0.04 | 0.29 | 0.32 | 0.19 | 0.08 |
| RMSE | 67.63 | 70.64 | 64.08 | 64.50 | 69.95 |

表 2 主分量相似预报可预报主分量个数

| 年份/可预报主分量 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| 模式误差 | 5 | 9 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| CMAP | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |

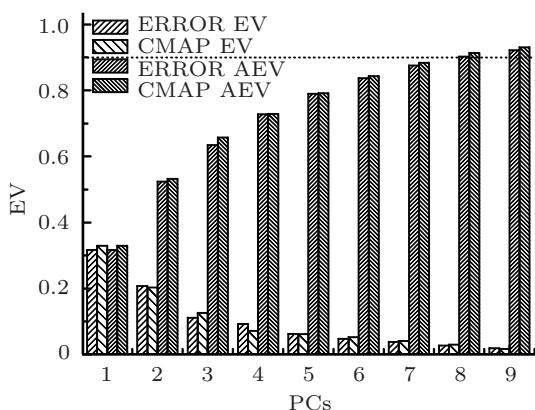


图 2 1983—2010 年东北区域汛期降水和模式误差 EOF 分解解释方差 (EV) 和累计解释方差 (AEV)

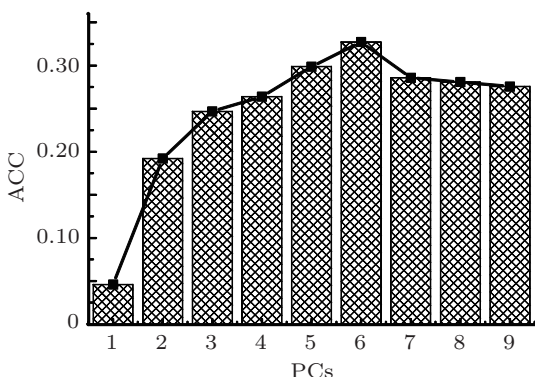


图 3 2005—2009 年东北区域汛期降水相似动力预报模式误差“可预报”模态敏感性试验

图 4 给出了以上 5 种方案独立样本检验预报的 ACC 和 RMSE. 从图 4(a) 及表 1 中 6 年独立样本检验预报平均 ACC 可以看出, 4 种相似预报方案均较系统误差订正预报有一定的提高, 特别是模式误差主分量相似预报代表的相似动力预报及其预报因子用于 CMAP 主分量相似预报的预报技巧均较系统误差订正预报有较大幅度的提高, 其次为 CMAP 主分量相似预报代表的统计预报, 其 6 年独立样本检验预报平均 ACC 分别由系统误差订正

预报的 0.04 提高到 0.29, 0.32 和 0.19. 对于模式误差主分量相似预报及其预报因子用于 CMAP 主分量相似预报的统计预报, 除 2006 年外, 其他 5 年预报 ACC 均较系统误差订正预报有较明显提高, 而对于 CMAP 主分量相似预报, 除在 2006 和 2008 年预报技巧不及系统误差订正预报外, 其他 4 年也有较大程度提高. 这从近 6 年独立样本检验预报的 RMSE 中也可以看出 (见图 4(b) 和表 1). 在近 6 年预报 RMSE 平均值上, 相比较系统误差订正预报, 4 种方案都没有使得预报 RMSE 明显减小, 特别是最优多因子动态配置模式误差主分量相似预报方案和最优多因子动态配置 CMAP 主分量相似预报因子用于模式误差主分量相似预报方案, 反而使得预报 RMSE 有所增大. 这可能是系统误差订正预报中系统误差代表了误差的气候特征, 涨落较小, 而相似预报的 4 个方案都只选取了 4 个相似年对应的模式误差来对误差进行估计, 明显有失一般性. 因此, 要使得 RMSE 得到明显的减小还需要进一步提高预报技巧. 此外, 表 2 还给出了东北区域 6 年独立样本检验预报的可预报模态个数. 对于模式误差及 CMAP 主分量相似预报, 其可预报模态个数都相对较为稳定, 主要可预报模态个数分别为 6 和 1, 揭示了最优多因子动态配置主分量相似预报具有一定的可靠性. 值得注意的是, 不管是模式误差主分量相似预报因子用于 CMAP 主分量相似预报还是最优多因子动态配置 CMAP 主分量相似预报, 其预报 ACC 均较系统误差订正预报有较大的提高且 RMSE 均有一定减小, 前者说明了最优多因子动态配置选取预报因子的合理性而后者则在一定程度上说明了最优多因子动态配置相似预报方法的稳定性. 因此, 将该方法推广到其他模式和地区的模式误差估算也具有可行性.

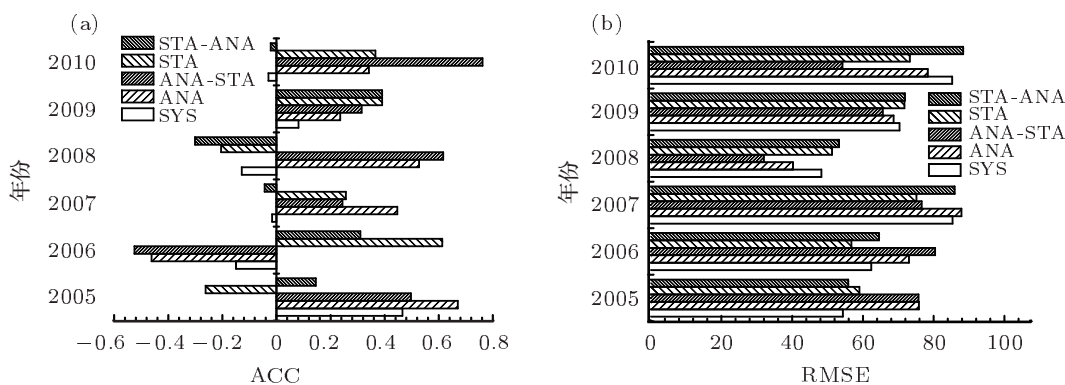


图4 2005—2010年独立样本检验预报 ACC 和 RMSE (a) ACC; (b) RMSE

5 东北区域 2010 年汛期降水预报个例分析

为对东北区域汛期降水的成因有一定认识,首先对东北区域汛期降水 and 对应模式误差的分布特征进行了分析.图 5 为 1983—2010 年东北区域汛期降水和模式误差前三模态的空间分布.从近 28 年东北区域汛期降水和模式误差的前三模态来看,两者在空间分布型上具有很好的一致性,仅强度和强度中心略有不同.对于第一模态,其占东北区域汛期降水和模式误差的方差贡献分别为 33%和 32%,两者都呈现出很好的区域一致性,几乎整个东北区域均为正值,且正值中心均位于内蒙古的东部,强度相当.针对降水而言,不是全区域的偏涝就是全

区域的偏旱;而对于模式误差而言,则不是全区域较系统误差偏大就是偏小.东北区域汛期降水和模式误差的第二模态都为典型的南北分布特征,南正北负,正负值中心分别位于辽宁南部和黑龙江北部,占各自的方差贡献分别为 20%和 21%;第三模态则为典型的东正西负型,两个正值中心分别位于辽宁南部和黑龙江东部,而负值中心则在内蒙古东部,其占各自的方差贡献分别为 13%和 11%.纵观降水和模式误差前三模态的分布,其占东北区域汛期降水和模式误差的累积方差贡献分别为 63%和 66%,正因为其较好的一致性,才可见 NCC 业务运行的 CGCM 模式对东北区域汛期降水异常的模拟的缺陷.短期内利用历史资料的有用信息弥补模式模拟缺陷是提高模式预报准确率的最有效途径.

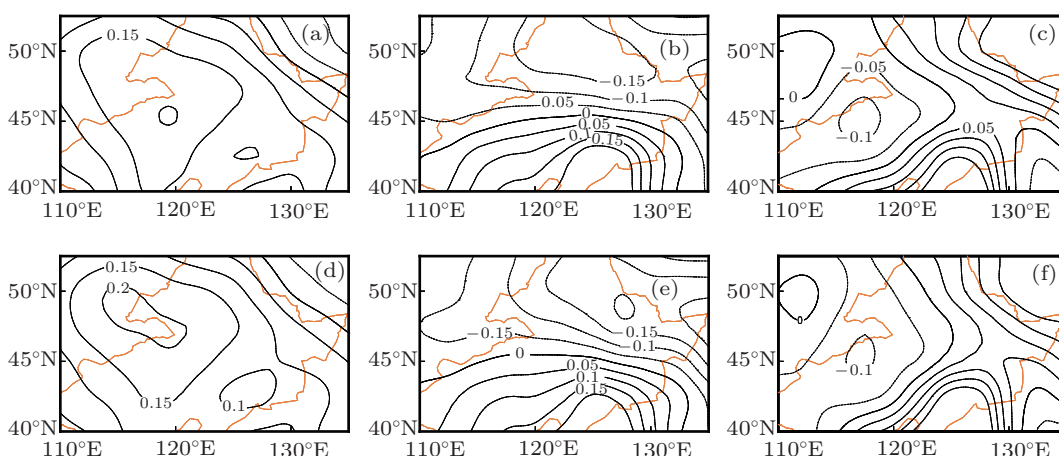


图5 1983—2010年东北区域汛期降水和模式误差前三模态分布特征 (a), (b), (c) 模式误差; (d), (e), (f) CMAP 降水

也正因为东北区域汛期降水和模式误差模式的一致性,模式误差主分量相似预报选取的预报因子物理意义就很明确,对模式误差每一个模态进

行预报选取的预报因子即是对汛期降水相同模态有影响而模式不能或者不能及时响应的因子.表 3 为对图 5 中前 3 模态时间系数进行相似预报的预报

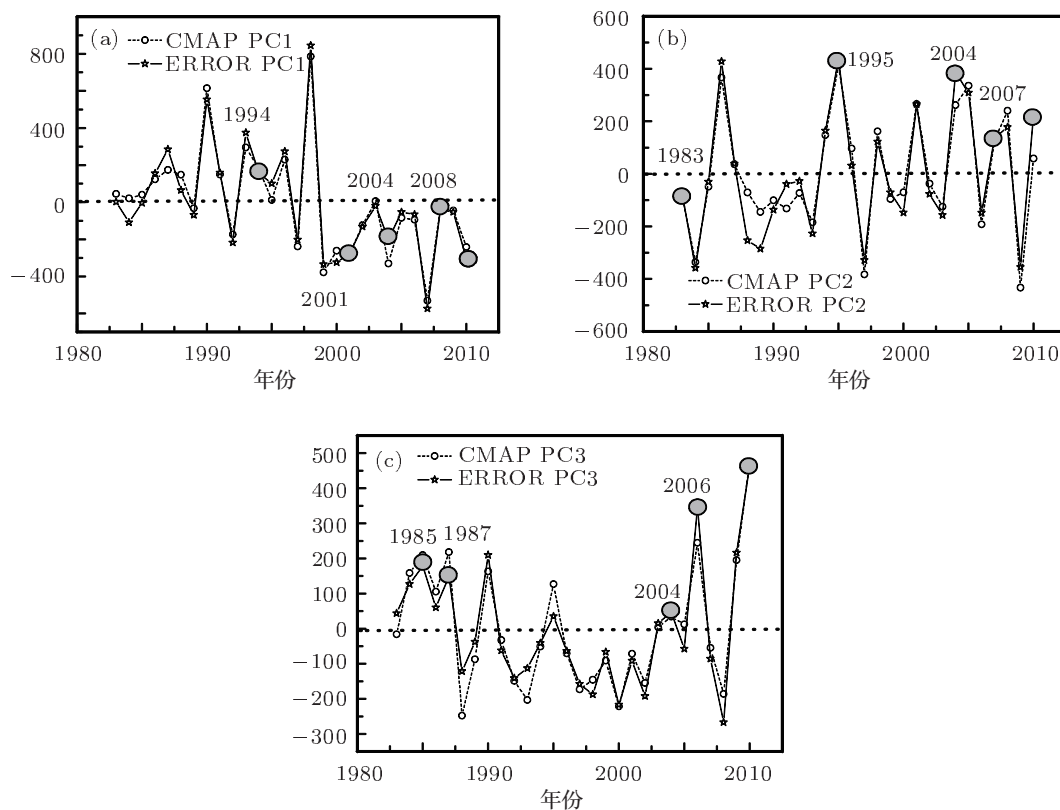


图6 东北区域汛期降水和模式误差前三主分量及模式误差主分量相似预报2010年相似年 (a), (b), (c) 第一、二、三主分量; 实圆中标注的年份为模式误差主分量相似预报2010年时选取的4个相似年, 其与预报场的相似程度见表4; 时间: 1983—2010年

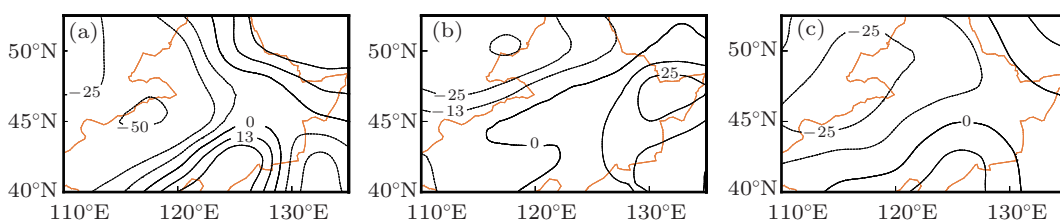


图7 2010年东北区域汛期降水距平百分率 (a) CMAP; (b) 模式误差主分量相似预报; (c) ANA-STA

因子, 其中出现频次为对2010年预报时该因子出现在前5年这一模态预报中的次数. 对于第一模态, 出现频次最高的因子为前年4月东太平洋涛动指数(EPO), 这和作者前期在用最优多因子动态配置对东北区域2009年汛期降水进行相似动力预报时认为此区域汛期降水的主导因子也为该因子的结论颇为一致^[14]. 可见该因子在东北区域汛期降水预报中的重要性, 其与东北区域汛期降水及模式误差之间的相关关系在此不再赘述, 但其在东北区域汛期降水预报中应当引起重视. 2010年东北区域汛期降水预报第一、二、三模态预报的13, 9, 2个因子均为北半球或北半球中高纬度环流, 这

可能和东北区域处于北半球中高纬度有很大关系. 此外, 第一模态预报因子中前冬因子个数为3个, 而前年春季、夏季和秋季的因子个数分别为5, 2和3个; 对于第二模态, 前冬, 前一年春季、夏季和秋季的因子个数分别为1, 3, 3和2个; 对于第三模态主要因子是前冬的NAO和前一年秋季的PNA. 相对而言, 前冬和前一年秋季的因子在东北区域汛期降水预报中作用较大. 此外, 还给出了东北区域汛期降水和模式误差前三主分量及模式误差主分量预报2010年相似年(图6). 由图6可以看出, 同CMAP与模式误差模态分布, 两者前三模态的主分量亦存在较好的一致性, 仅在少数年份有一定

差异. 第一模态作为模式误差 (或东北区域汛期降水) 的主要模态, 反映的是东北区域汛期降水模式预报误差的主要特征, 其在 2010 年不是特别异常, 但总体上东北区域汛期仍然以偏旱为主. 预报第一模态的相似年按相似程度依次为 2004 年、2008 年、1994 年和 2001 年 (详见表 4), 而理想相似年则依次是 2000 年、2001 年、1999 年和 1992 年, 其中 2001 年选取正确, 但 1994 年与 2010 年位相相反; 2010 年模式误差为东北区域汛期降水模式预报误差 EOF 分解第二模态中较为典型的模态, 其预报和理想 4 个相似年分别为 2004 年、1983 年、1995 年、2007 年和 2001 年、2008 年、1994 年、2005 年, 也就是说对于第二模态的预报没有选取到理想的相似年, 但也仅 1983 年反位相; 由图 6(c) 和图 7(a) 可以看出, 2010 年东北区域汛期降水模式

预报误差 (汛期降水) 为极端典型的第三模态, 也即东北区域东北部和东南部为多雨, 而在其他区域均为少雨. 此外, 由图 6(c) 还可以明显地看出, 第三模态预报相似年的选取较第一、第二模态均要准确, 其第一相似年 2006 年也就是第二理想相似年, 而 1985 年也是理想相似年之一, 另外两相似年分别是 1987 年、2004 年和 2009 年、1990 年. 正因为相似年选取的合理性, 模式误差主分量相似预报对东北区域西部和南部的部分区域做了较为准确的预报, 仅在黑龙江北部和吉林与实况相反. 模式误差主分量相似预报 2010 年东北区域汛期降水 ACC 为 0.34, 而系统误差订正预报 ACC 仅为 -0.03.

对于 CMAP 降水第一主分量, 2010 年 4 个最相似年分别 1997 年、2000 年、2001 年和 1992 年,

表 3 东北区域 2010 年汛期降水预报模式误差主分量相似预报预报因子 (前三模态)

| 模态 | 因子顺序 | 因子月份 | 因子名称 | 出现频次 |
|------|------|------|-----------------------------|------|
| 第一模态 | 1 | 5 | 北非副高北界 (20°W—60°E) | 2 |
| | 2 | 4 | 东太平洋涛动 (EPO) | 3 |
| | 3 | 8 | 北美区极涡强度指数 (3 区, 120°W—30°W) | 0 |
| | 4 | 1 | 北半球极涡面积指数 (5 区, 0°—360°) | 1 |
| | 5 | 11 | 大西洋欧洲环流型 W | 2 |
| | 6 | 12 | 大西洋副高强度指数 (55°W—25°W) | 1 |
| | 7 | 3 | 北极涛动 (AO) | 0 |
| | 8 | 7 | 编号台风 | 1 |
| | 9 | 3 | 西太平洋副高北界 (110°E—150°E) | 0 |
| | 10 | 11 | 亚洲区极涡面积指数 (1 区, 60°E—150°E) | 0 |
| | 11 | 4 | 北半球副高面积指数 (5°E—360°) | 0 |
| | 12 | 10 | 太平洋北美指数 (PNA) | 0 |
| | 13 | 12 | 北美副高脊线 (110°W—60°W) | 1 |
| 第二模态 | 1 | 8 | 大西洋副高脊线 (55°W—25°W) | 0 |
| | 2 | 8 | 西太平洋副高北界 (110°E—150°E) | 2 |
| | 3 | 5 | 亚洲纬向环流指数 (IZ, 60°E—150°E) | 0 |
| | 4 | 3 | 西太平洋副高面积指数 (110°E—180°) | 0 |
| | 5 | 11 | 东亚槽强度 (CQ) | 0 |
| | 6 | 5 | 东太平洋涛动 (EPO) | 1 |
| | 7 | 8 | 北半球副高北界 (5°E—360°) | 3 |
| | 8 | 12 | 北非副高脊线 (20°W—60°E) | 0 |
| | 9 | 10 | 大西洋副高北界 (55°W—25°W) | 1 |
| 第三模态 | 1 | 10 | 太平洋北美指数 (PNA) | 0 |
| | 2 | 2 | 北大西洋涛动 (NAO) | 2 |

表 4 独立样本检验预报 2010 年相似年及模式误差和 CMAP 最优相似年

| 预报模态 | 相似选取 | 第一相似年 | 第二相似年 | 第三相似年 | 第四相似年 |
|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 第一模态 | 客观选取 | 2004 | 2008 | 1994 | 2001 |
| | 模式误差 | 2000 | 2001 | 1999 | 1992 |
| | CMAP | 1997 | 2001 | 2002 | 1992 |
| 第二模态 | 客观选取 | 2004 | 1983 | 1995 | 2007 |
| | 模式误差 | 2001 | 2008 | 1994 | 2005 |
| | CMAP | 1987 | 1996 | 2007 | 1994 |
| 第三模态 | 客观选取 | 1987 | 2006 | 1985 | 2004 |
| | 模式误差 | 2006 | 2009 | 1990 | 1985 |
| | CMAP | 2006 | 1987 | 1985 | 2009 |

若用模式误差主分量相似预报对应模态预报因子进行相似预报, 根据上文, 则有 2000 年、2001 年和 1992 年 3 个理想相似年入选为相似预报相似年. 第二主分量和第三主分量也分别有 2007 年 1 个和 2006 年、1987 年、1985 年 3 个相似年入选, 明显较模式误差主分量相似预报选取相似年更合适, 因此, 此方案下预报 2010 年东北区域汛期降水 ACC 为 0.76, 可以说该方案对 2010 年东北区域汛期降水做了准确预报. 对比图 7(a) 和图 7(c) 可以看出, 该方案预报结果和 CMAP 在空间分布型上基本一致, 仅在区域面积上有一定差异.

6 结论

基于最优多因子动态配置相似动力模式误差估计方案和模式误差的局地性特点, 提出将模式误差估计问题转化成模式误差主分量的估计问题. 根据前期独立样本检验预报技巧, 客观上将模式误差主分量分成可预报和不可预报部分, 对于可预报主分量采用最优多因子动态配置方案进行相似预报, 而对于不可预报部分则用系统平均代替. 将该方

案应用于东北区域汛期降水预报试验, 2005—2010 年 6 年独立样本检验预报平均 ACC 为 0.29, 较系统误差订正预报的 0.04 有较大提高, 而平均 RMSE 则较系统误差订正预报没有改善. 此外还将该结果同该方案预报因子用于 CMAP 降水主分量的相似预报、该方案推广到 CMAP 主分量的相似预报及 CMAP 主分量相似预报因子用于模式误差主分量的预报结果进行了对比, 后三者 6 年独立样本检验预报平均 ACC 及 RMSE 分别为 0.32, 0.19, 0.08 和 64.08, 64.50, 69.95, 就 ACC 而言均较系统误差订正预报有不同程度的提高, 而 RMSE 则在模式误差预报因子用于 CMAP 主分量的相似预报及 CMAP 主分量的相似预报方案中有一定的减小, 可见最优多因子动态配置主分量相似预报方案具有一定的稳定性, 有进一步推广到新一代模式和其他模式的潜力. 从预报 2010 年选取的相似年来看, 最优多因子动态配置模式误差主分量相似预报选取的相似年并不全为最理想相似年, 也就是说相似动力预报的预报技巧还有一定的提升空间, 况且该方案没有有效地减小预报 RMSE, 因此, 相似动力预报还需要进一步改进.

- [1] Gu Z C 1958 *Acta Meteor. Sin.* **29** 176 (in Chinese) [顾震潮 1958 气象学报 **29** 176]
- [2] Chou J F 1986 *Plateau Meteorology* **5** 367 (in Chinese) [丑纪范 1986 高原气象 **5** 367]
- [3] Qiu C J, Chou J F 1989 *Chinese J. Atmos. Sci.* **13** 22 (in Chinese) [邱崇践, 丑纪范 1989 大气科学 **13** 22]
- [4] Huang J P, Wang S W 1991 *Sci. China Ser. B* **21** 216 (in Chinese)

- [黄建平, 王绍武 1991 中国科学 B 辑 **21** 216]
- [5] Huang J P, Yi Y H, Wang S W 1993 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **119** 547
- [6] Cao H X 1993 *Sci. China Ser. B* **23** 104 (in Chinese) [曹鸿兴 1993 中国科学 B 辑 **23** 104]
- [7] Gu X Q 1998 *Chinese Sci. Bull.* **43** 1 (in Chinese) [谷湘潜 1998 科学通报 **43** 1]

- [8] Feng G L, Cao H X, Wei F Y 2001 *Acta Meteor. Sin.* **59** 206 (in Chinese) [封国林, 曹鸿兴, 魏凤英 2001 气象学报 **59** 206]
- [9] Feng G L, Cao H X, Gao X Q 2001 *Adv. Atmos. Sci.* **18** 701
- [10] Bao M, Ni Y Q, Chou J F 2004 *Chinese Sci. Bull.* **49** 1112 (in Chinese) [鲍名, 倪允琪, 丑纪范 2004 科学通报 **49** 1112]
- [11] Ren H L, Chou J F 2005 *Acta Meteor. Sin.* **63** 988 (in Chinese) [任宏利, 丑纪范 2005 气象学报 **63** 988]
- [12] Ren H L, Chou J F 2007 *Sci. China Ser. D* **37** 1101 (in Chinese) [任宏利, 丑纪范 2007 中国科学 D 辑 (地球科学) **37** 1101]
- [13] Zheng Z H, Ren H L, Huang J P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7359 (in Chinese) [郑志海, 任宏利, 黄建平 2009 物理学报 **58** 7359]
- [14] Xiong K G, Feng G L, Huang J P 2011 *Acta Meteor. Sin.* **25** 316
- [15] Yang J, Wang Q G, Zhi R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 029204 (in Chinese) [杨杰, 王启光, 支蓉 2011 物理学报 **60** 029204]
- [16] Paegle J N, Haslam R B 1982 *J. Appl. Meteor.* **21** 127
- [17] Wei F Y, Cao H X 1990 *Meteorological Monthly* **16** 20 (in Chinese) [魏凤英, 曹鸿兴 1990 气象 **16** 20]
- [18] Zhang B L, Chou J F, Sun Z B 1991 *Chinese Sci. Bull.* **23** 1797 (in Chinese) [张邦林, 丑纪范, 孙照渤 1991 科学通报 **23** 1797]
- [19] Yu Z P, Chu P S, Schroeder T 1997 *J. Climate* **12** 2586
- [20] Huang J Y, Huang M Y 2000 *J. Appl. Meteor. Sci.* **11** (suppl.) 72 (in Chinese) [黄嘉佑, 黄茂怡 2000 应用气象学报 **11**(增刊) 72]
- [21] Li F, Lin Z D, Zuo R T 2005 *Climatic and Environmental Research* **10** 658 (in Chinese) [李芳, 林中达, 左瑞亭 2005 气候与环境研究 **10** 658]
- [22] Huang G, Zhou W 2006 *Climatic and Environmental Research* **11** 296 (in Chinese) [黄刚, 周文 2006 气候与环境研究 **11** 296]
- [23] Chen C M, Zhou W, Lin A L 2009 *Journal of Tropical Meteorology* **25** 196 (in Chinese) [陈创买, 周文, 林爱兰 2009 热带气象学报 **25** 196]
- [24] Qin Z K, Lin Z H, Chen H 2011 *Acta Meteor. Sin.* **69** 289 (in Chinese) [秦正坤, 林朝晖, 陈红 2011 气象学报 **69** 289]
- [25] Vautard R, Plaut G, Wang R S 1999 *J. Climate* **12** 380
- [26] Dreveton C, Yan G L 2004 *J. Appl. Meteor.* **43** 984
- [27] Zhao H C 1984 *Scientia Geographica Sinica* **4** 225 (in Chinese) [赵焕宸 1984 地理科学 **4** 225]
- [28] Ding Y H, Liu Y M, Song Y J 2002 *Climatic and Environmental Research* **7** 236 (in Chinese) [丁一汇, 刘一鸣, 宋永加 2002 气候与环境研究 **7** 236]
- [29] Li W J, Zhang P Q, Li Q Q 2005 *J. Appl. Meteor. Sci.* **16** (suppl.) 1 (in Chinese) [李维京, 张培群, 李清泉 2005 应用气象学报 **16**(增刊) 1]
- [30] Shi N 2009 *Meteorological Statistical Forecast* (Beijing: China Meteorological Press) pp128–142 (in Chinese) [施能 2009 气象统计预报 (北京: 气象出版社) 第 128—142 页]
- [31] Wei F Y 2007 *Modern Climate Statistics Diagnosis and Forecasting Technology* (Beijing: China Meteorological Press) pp105–110 (in Chinese) [魏凤英 2007 现代气候统计诊断与预测技术 (北京: 气象出版社) 第 105—110 页]
- [32] Chen J Y 2010 *Analysis on Flood-Drought Mechanism in China and Study on Long-Range Forecast Techniques* (Beijing: China Meteorological Press) p154 (in Chinese) [陈菊英 2010 中国旱涝的机理分析和长期预报技术研究 (北京: 气象出版社) 第 154 页]

A new method of analogue—dynamical prediction of monsoon precipitation based on analogue prediction principal components of model errors*

Xiong Kai-Guo¹⁾ Zhao Jun-Hu²⁾ Feng Guo-Lin^{2)3)†}

Huang Jian-Ping¹⁾ Hu Jing-Guo³⁾

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) (*College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China*)

(Received 21 October 2011; revised manuscript received 25 November 2011)

Abstract

To correct the model errors in analogue-dynamical prediction, a new idea of using the analogue prediction of principal components of model errors, instead of analogue prediction of model error directly, is proposed. By decomposing the empirical orthogonal function, the principal components of the model errors are divided into two parts subjectively: predictable and unpredictable. For the predictable part, it is analogically predicted by the scheme of dynamical and optimal configuration of multiple predictors; while for the unpredictable part, it is estimated by average of the system. Based on the National Climate Center (NCC) of China operational seasonal prediction model results for the period 1983–2010 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 1951–2010, the method is implemented in objective and quantitative prediction of monsoon precipitation in Northeast China. The independent sample validation shows that this technique has effectively improved the monsoon precipitation prediction skill during 2005–2010, for which the averaged anomaly correlation coefficients and the system correct of errors are 0.29 and 0.04 respectively. This study demonstrates that the analogue-dynamical approach can enhance the prediction level of NCC operational seasonal forecast model obviously.

Keywords: analogue-dynamical prediction, principal component, correction of errors, monsoon precipitation

PACS: 92.60.Wc, 91.30.pd

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41105055, 41075058), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant No. GYHY201106016), and National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant Nos. 2007BAC29B01, 2009BAC51B04).

† E-mail: fenggl@cma.gov.cn