

# 动态最优多因子组合的华北汛期降水模式误差估计及预报\*

杨杰<sup>1)2)</sup> 王启光<sup>1)</sup> 支蓉<sup>3)</sup> 封国林<sup>2)3)†</sup>

1)(兰州大学大气科学学院,兰州 730000)

2)(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)

3)(国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081)

(2010年6月22日收到;2010年7月15日收到修改稿)

利用国家气候中心季节预报 1983—2009 年 27 年模式预报结果,结合 74 项环流指数及美国国家海洋局和大气管理局提供的 40 个气候指数和美国气候预报中心实际降水分析资料,采用资料诊断分析和数值模拟实验相结合的方法,通过多因子的历史相似信息提取预报相似年,获得预报场的误差订正项.在这一订正思路的基础上,考虑前期关键影响因子的选取、多因子组合的优化配置,构建适用于不同预报年的区域动力-统计模式预报误差订正方案.以华北为例,探索多因子最优组合的多元客观相似判据,发展基于多因子动力-统计模式预报误差的动态订正新技术,改善华北夏季降水预报效果,提高预报技巧.通过 2005—2009 年独立样本回报结果表明,动态最优多因子组合相似订正方法距平相关系数评分相对于系统订正方法有着显著的提高,该订正方案对华北地区的夏季降水预测有着很好的业务前景,具有重要的应用价值,即将投入业务运行.

**关键词:** 关键因子集, 模式误差估计, 汛期降水, 预测

**PACS:** 92.60.Wc

## 1. 引言

洪涝和干旱是影响我国最大的两种主要气候灾害,50%以上的自然灾害都是由旱、涝引起<sup>[1-3]</sup>.随着气候系统的不确定性演变,包括异常干旱、破纪录洪灾、超低温雨雪冰冻等极端气候事件发生的频率和强度不断加剧,对国民经济影响巨大<sup>[4-7]</sup>.如 2006,2007 年夏季我国重庆地区分别遭受大旱和大涝,2009 年东北夏季低温,2009—2010 年西南五省夏冬春三季持续干旱,造成了前所未有的损失.因此,提高短期气候预测、预警以及应急决策能力是保障国家安全、发展经济和防灾减灾的现实需要<sup>[8-10]</sup>.近代以来华北地区水资源贫乏问题变得越来越严重,如何有效利用和规划该地区的有限的水资源是目前十分迫切的一个科学问题<sup>[11-13]</sup>.华北地区旱涝时空分布的不均匀性带来的水资源利用的

不确定性严重制约了华北地区社会 and 经济发展,自然生态系统和环境也在不断恶化.解决这些问题的前提仍然是如何准确预测夏季旱涝的分布趋势,只有掌握了空中水资源活动规律,才能从根本上缓解华北地区的水资源匮乏,确保该地区的可持续发展,这也是气象科技工作者历来关注的科学问题<sup>[14,15]</sup>.

主导华北地区夏季降水的气候背景十分复杂,一方面由于华北处于季风活动的北缘,汛期降水主要受夏季风活动等影响;另一方面,该地区还受中高纬西风环流系统影响,这些复杂因素导致预测每年华北夏季的旱涝趋势难度很大<sup>[16,17]</sup>.因此,单纯的统计学方法和动力学方法都不能有效开展该地区的短期气候预测.丑纪范<sup>[18,19]</sup>认为,统计学方法虽善于利用大量历史资料,但其自身局限性使它并不能成为主要的预测工具;而动力学方法虽然善于运用物理规律,但同样面临着模式物理过程不够准

\* 公益性行业(气象)科研专项基金(批准号:GYHY200806005)、国家自然科学基金(批准号:40875040,40930952)和国家科技支撑计划(批准号:2007BAC29B01,2009BAC51B04)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: fenggl@cma.gov.cn

确和初值不精确的问题. 解决的关键是将两者有机结合, 取长补短, 通过充分利用历史统计信息达到修正动力学方法积分过程中的系统性误差. 如此一来, 可以从很大程度上避免直接进行数值模式动力框架的大幅修改, 减少对初值同化方案和物理参数的复杂处理, 以相对较小的代价达到相同的模式预测效果. 这种思想的核心是在动力模式预报基础上结合物理统计方法充分利用历史资料对模式预报结果加以修正, 目前已成为备受关注的研究方向. 在国内外该研究已取得了一定的进展<sup>[20-23]</sup>, 包括相似动力方法<sup>[24-27]</sup>、预报误差订正以及模式后处理<sup>[28]</sup>、基于大气自记忆原理的方法<sup>[29-31]</sup>等, 使得短期气候预测发展很快并已初步建立了适合中国条件的短期气候预测业务动力模式系统<sup>[32,33]</sup>, 但业务应用水平仍然不高, 仍需进一步提升<sup>[34-36]</sup>.

本文从动力和统计相结合角度出发, 利用1983—2009年美国气候预报中心组合降雨分析资料 (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation, CMAP) 和国家气候中心 (National Climate Center, NCC) 季节/年际预测业务系统模式回报的资料挖掘历史相似信息, 以单因子交叉检验的距平相关系数 (anomaly correlation coefficient, ACC) 确定关键影响因子集, 建立适用于华北夏季降水的动态相似因子库, 通过数值模拟与 ACC 检验获取相似因子配置方案. 由于影响因子具有周期性动态变化, 不同因子影响季节不同, 为了兼顾不同预报时段动态因子的最优组合, 以4个历史最相似年的信息为主订正预报结果, 形成最终的动力-相似预报修正方案, 达到改善华北地区夏季降水预报效果的目的.

## 2. 资料和方法

### 2.1. 资料

本文的研究资料来自三个方面:

1) 美国气候预报中心组合降雨分析资料的1983—2009年夏季总降水量, 水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ;

2) 国家气候中心提供的季节/年际预测业务系统模式预报的历史回报产品中的逐月降水场资料, 经纬度格点  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 共  $144 \times 73$  个格点;

3) 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国家海洋局和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 提供的40项气候指数.

### 2.2. 模式预报误差估计原理<sup>[37,38]</sup>

实际大气的准确数值模式表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial t} + L(\psi) &= E(\psi), \\ \psi(\mathbf{x}, t_0) &= \psi_0(\mathbf{x}), \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $\psi(\mathbf{x}, t)$  为模式预报变量,  $\mathbf{x}, t$  分别表示空间坐标向量和时间,  $L$  是  $\psi$  的微分算子.  $t_0$  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  $M(\psi)$ .  $E$  为模式的误差算子, 反映模式中未知的总误差项, 即模式预报误差. 将预报场  $\psi$  看作历史相似场  $\tilde{\psi}$  与叠加在相似场上的小扰动  $\psi'$  之和, 即  $\psi = \tilde{\psi} + \psi'$ , 并且将上述方程进行积分推导可得到一个动力相似预报方程

$$\hat{M}(\psi_0) = M(\psi_0) + \hat{M}(\tilde{\psi}_j) - M(\tilde{\psi}_j), \quad (2)$$

该方程引入历史相似对应的预报误差信息估计当前的模式预报误差, 即在模式预报结果的基础上添加了一个历史相似误差订正项

$$\hat{E}(\tilde{\psi}_j) \xrightarrow{\text{估计}} \hat{E}(\psi_0), \quad (3)$$

该式将动力模式预报改进问题转化为模式误差的估计问题, 模式的预报即包含误差预报.

## 3. 模式误差订正方法

### 3.1. 华北地区气候背景及系统误差订正方法

华北地区属于半湿润、半干旱大陆性季风气候区, 受东亚季风的影响, 降水量年内分配很不均匀, 多年平均的逐月降水量呈单峰型分布, 1—7月份呈逐步递增趋势, 8月以后逐渐减少, 80%左右集中在6—9月, 且往往集中在几次强降雨过程, 降雨相对集中使流域洪水具有峰值高、峰型陡、一次性洪量大的特点<sup>[39]</sup>. 华北雨季主要集中在7月和8月, 所以夏季降水的多寡程度将直接影响着华北地区全年的旱涝分布. 降水量年际变化很大, 丰水年可达1000 mm以上, 枯水年仅200 mm左右. 1951年以来, 1979年以前为多雨时段, 1979年以后处于少雨的时段. 总体来说, 目前仍处于少雨的气候背景. 图1给出了1983—2009年华北地区夏季降水量的年际变化, 对这27年的实际降水量进行聚类分析, 结

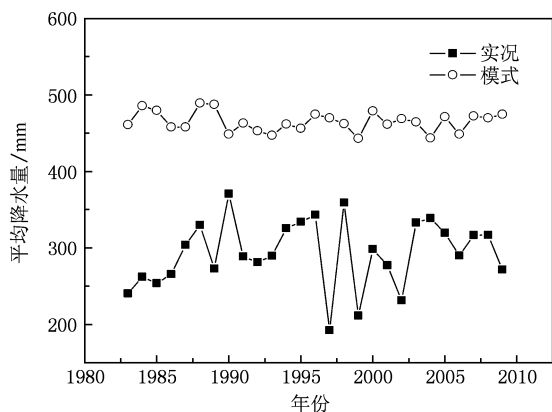


图1 华北近 27 年夏季平均降水量变化及模式原始预报结果

果显示,相对 27 年夏季降水情况而言,降水偏少年为 1983, 1985, 2002 年;降水偏多年为 1988, 1995, 1996, 1998, 2003, 2004 年;降水异常偏少年为 1997, 1999 年;降水异常偏多年为 1990 年. 对比 1983—2009 年华北地区的夏季降水量变化趋势与模式预报结果,可以发现在整个华北地区处于少雨的气候背景下,该地区每年的实际降水量都要比模式原始的预报结果小很多,且实际降水量的年际变化很明显,最大的年降水量为 370 mm,最小的年降水量为 192 mm,二者之间相差达到约 180 mm,而模式预报结果年际变化很小,基本上结果都是在 470 mm 上下波动. 可见模式的原始预报结果与实况之间的误差较大,若无适当订正,将失去应有的参考价值.

模式原始结果订正最直接的是预报误差订正,如能够通过统计方法较为准确地得到模式在预报

年的预报误差场,将预报误差场与模式原始结果进行叠加即可对预报结果有很好的改进. 如前所述,降水预报问题就转换成模式预报误差的估计问题. 最简单的预报误差订正方法是对统计历史资料中已知的历年模式预报误差取平均,以多年预报误差的平均值作为预报年的模式原始预测结果与实际降水的误差来对预测结果进行订正,即系统误差订正方法. 图 2(a), (b) 分别给出了 1983—2009 年交叉检验的系统误差订正后的夏季降水的预报结果以及相应的 ACC 评分情况,可以看出经过系统订正后的预报结果较模式原始结果有了较大的提高,预报误差也有很大的改进,交叉检验系统订正后预报结果的所有年份的距平相关系数平均值为 0.15. 结合图 1 可以看出,系统误差订正结果与实际观测误差异常大的年份为: 1985, 1992, 1997, 1999, 2002 年,而其中 1992, 1997, 1999, 2002 年都对应了华北地区的降水偏少或异常偏少. 我们可以看出系统订正后的预报效果仍然不是十分理想,特别是对于一些夏季降水关键的异常年份,例如 1997, 1999 这两个降水异常偏少年,其预报结果的 ACC 都只有 -0.7 左右,几乎是给出了完全相反的预报结果. 因此,模式的系统订正结果对于降水偏少年的预报效果较差,对降水偏多的预报效果则相对较好. 综上所述,系统订正模式预报结果的方法是比较简单、粗糙的,对每个预报年份缺乏一定的针对性,使得预报准确率仍处于较低的水平;提高预报准确率,需要用具有一定技巧性的统计方法结合模式,来对预报年的预报误差进行有针对性的、较准确的订正.

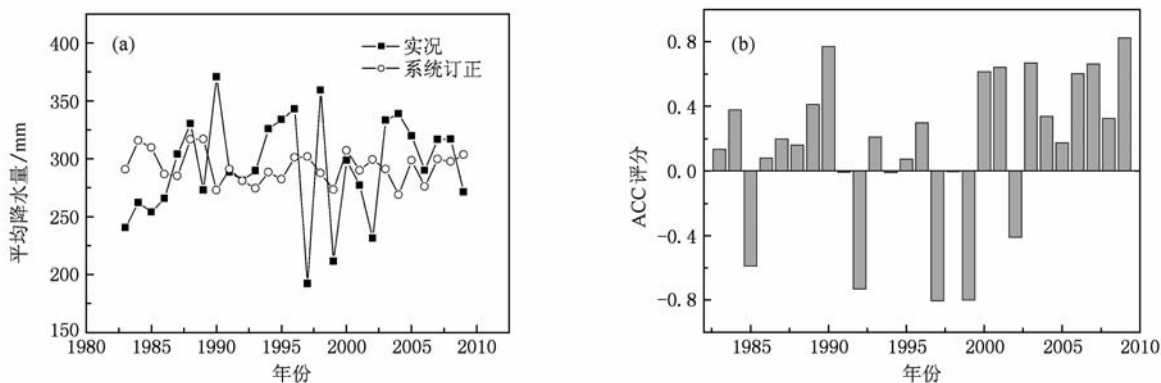


图2 华北近 27 年夏季降水 (a) 系统订正预报结果, (b) ACC 评分

### 3.2. 动力-相似订正

短期气候预测中应用相似的概念由来已久,这

是由于继天气过程的相似发展之后,未来一段时间内也往往继续出现相似的天气过程. 早在 20 世纪 40 年代,前苏联就在长期天气预报方面提出过两个

自然天气季节的相似条件,这些相似条件在理论上是严谨的,但在实际工作中很难完全满足<sup>[40]</sup>.相似预报的成效在很大程度上取决于相似条件选取得是否客观合理,因此相似预报的关键问题在于历史相似的选取.由于数值模式的初值条件的自由度非常大,要在历史资料中找到与其合适的相似,在现有资料条件下几乎是不可能的,但对某一特定区域而言,并不是所有前期环境变量都有同等重要的作用,都存在着前期关键变量,但是要想通过统计方法从初始时刻场中确定关键变量也是不太现实的.由于大气是不断地向外强迫适应的,所以前期外强迫的异常信号会导致数值模式初边值的异常.统计预报方法正是通过历史资料建立起前期外强迫异常与未来异常的联系,那么就可用统计预报中前期的环境变量选取历史相似,在缩小了自由度的同时又抓住了关键的历史相似信息.

### 3.3. 区域关键因子的选取

汛期降水是由多种影响因子综合作用的结果,对中国各个区域都存在各自占主导作用并直接影响区域夏季降水多寡的前期关键因子.例如,副高是直接影响中国夏季降水的天气系统.研究表明,在副高、海温、积雪、阻高、季风等影响长江流域夏季降水的因子中,副高与降雨的对应关系最好,作用最为显著.姚愚和严华生<sup>[41]</sup>研究了副高

的5种指数对中国降雨的影响,发现副高北界和脊线位置主要影响汛期雨带南北位置的变化,副高加强西伸时则有利于中国大部分地区的降水,强度指数和面积指数与局部地区降水的多寡有关.其他研究也表明,副高的形状、强弱和位置变动与我国大部地区主汛期旱涝趋势有密切联系.西太平洋副热带高压和阻塞高压形势、西风急流、大陆副热带高压等因子对于华北夏季降水量的多少具有很好的指示意义,也为选择关键的前期相似因子提供了可靠的依据.

大量研究表明,前冬海温对夏季副高的形状、位置和强弱等特征有显著影响,是具有前兆意义的预测信号,可以为相似预报方法提供参考,检验在影响区域降水的海温关键区域是否真的存在相似之处.我们给出了华北夏季降水与前冬平均海温的相关,如图3所示.从图3中可以看出,华北的夏季降水与前冬印度洋、赤道中东太平洋海温以及加勒比海域的海温呈现出显著的正相关,即前期赤道印度洋及阿拉伯海域和孟加拉湾的海温如果处于异常偏冷状态,而印度洋南部是偏暖分布时,则华北地区夏季降水具有整体上偏少的倾向,反之亦然.冬季印度洋海温异常对预测未来华北地区降水具有较明确的指示意义,所以可以用海温场来检验利用关键因子选择的历史相似年与预报年之间在特定的关键区域是否真的相似.

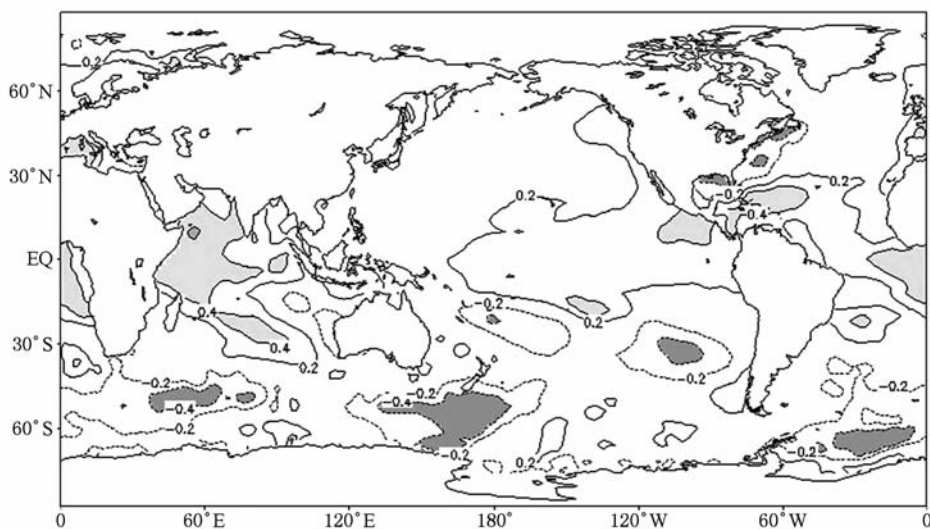


图3 华北地区夏季降水与前冬平均海温的相关

利用相似预报方法对预报年选取相似误差场时,从国家气候中心气候系统诊断预测室提供的74项环流特征量以及NOAA提供的40项气候指数

(由于环流特征量是逐月数据,对于同一个指数12个月的数值看作12个独立的前期影响因子,因此我们一共可以得到1368个前期因子)中筛选出一部

分对华北地区有物理意义并且可以对模式的预报误差做很好订正的因子作为关键因子. 首先, 对前期的预报因子与华北汛期降水量进行相关性检验, 初步提取出对华北夏季降水影响较大的因子, 在相关系数都通过 95% 可信度检验的环流特征量中寻找前期关键因子, 对相关性高的因子还需进行进一步的筛选, 因为有的因子虽然与华北地区的夏季降水有很好的相关, 但模式结果对其没有很好的响应, 从而不能对预报误差进行估计. 因此, 还要通过预报误差订正回报结果的评分, 提取出评分较高的因子, 将这些因子作为模式预报的前期关键因子, 在进行相关性检验之后, 对通过相关性检验的因子进行单因子相似误差订正交叉检验回报评分, 即以每个因子作为选相似的依据, 将欧氏距离作为选取相似年的条件, 计算预报年中因子强度与之前每年强度的欧氏距离选取相似, 距离越短则越相似, 为了保证相似质量, 选取最接近的 4 个相似年进行误差线性估计, 以此确定预报年的相似误差, 通过该方法可筛选出能够提高模式预报结果准确率的关键因子.

选择合适的因子进行相似误差的订正对于提高预报水平的效果是比较明显的. 我们这里以交叉检验平均 ACC 最高的东太平洋涛动指数为例, 给出

了预报年前期 8 月东太平洋涛动指数进行华北汛期降水相似误差订正的 27 年 ACC 及均方根误差, 如图 4 所示. 由图 4 可得, 总体而言单因子(8 月东太平洋涛动指数)相似订正的方法较系统订正方法有一定的改进, 提高较为明显的年份是 1992, 2001—2005 年, 其中 2002 年为降水偏少年, 2003, 2004 年为降水偏多年, 其他为降水正常年, 这几个年份中的 8 月东太平洋涛动指数都是处于偏小的状态, 通过对 ACC 有一定提高的年份以及图 4(c) 中 8 月东太平洋涛动指数的年际变化进行分析研究, 可以发现当 8 月东太平洋涛动指数偏小时, 利用该因子相似订正的方法效果较好, 对于 8 月东太平洋涛动指数强度较大时订正效果则并不明显, 反而会起到相反的作用. 可以看到, 由于近几年该因子变小的趋势, 所以近几年的相似订正效果相对系统订正基本都有一定的提高, 对于降水异常年的预报结果仍然不理想, 对关键的降水年份例如 1997 和 1999 年两个异常年, 订正结果相对系统订正提高非常有限, 没有给出很好的预报结果. 此外, 由于其他环境要素的影响以及因子对于区域降水影响的年际变化, 单个因子不能保持每年都和区域的降水有着很好的对应关系, 不能保证预报结果都要优于系统订正的结果, 且从图 4(b) 均方根误差的改进也是非常

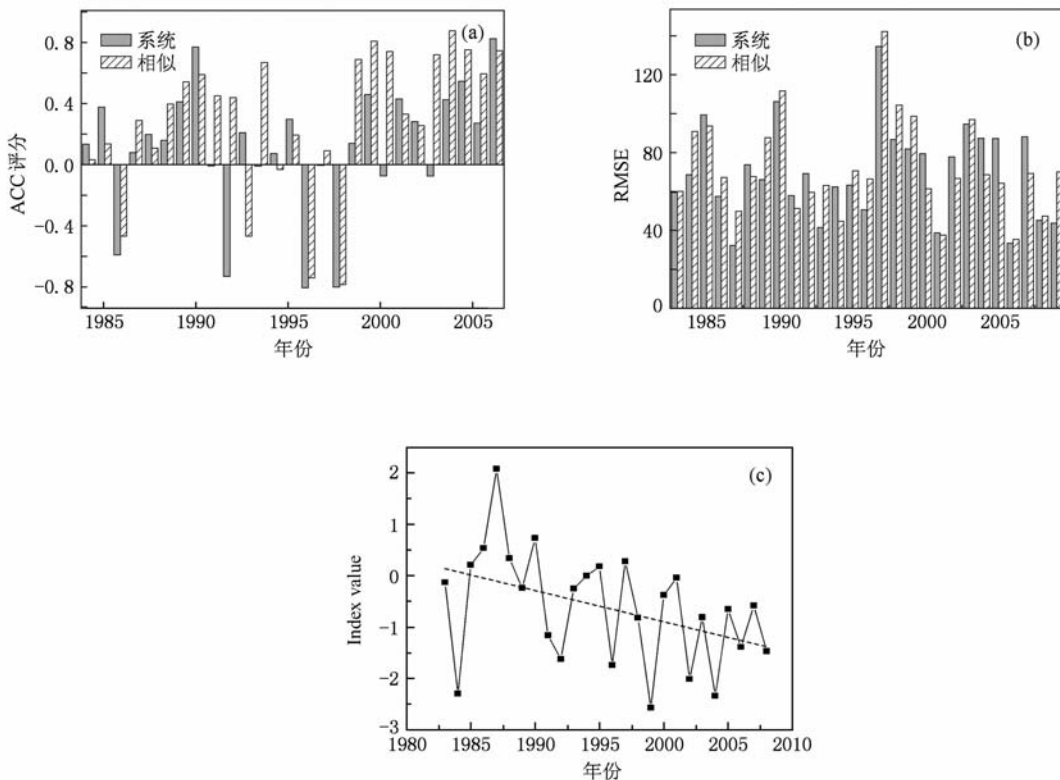


图4 系统订正与单因子(8月东太平洋涛动)相似订正的近27年变化趋势 (a) ACC评分, (b) 均方根误差, (c) 8月东太平洋涛动指数

限的,在部分年份的预报结果还要低于系统订正方法的结果.综上所述,单因子相似误差订正也存在着一定的局限性:由于汛期降水是多种因素综合作用的结果,只用单因子选择相似就忽略了其他因子对于华北地区的影响,单个因子不可能完全反映出预报年前期环境变量场的整体信息,因此利用单个影响因子的前期信号作为相似年选取依据有时候会比较片面,在因子对华北地区降水影响较强的年份选取的相似年与预报年的相似度较好,但在该因子作用较弱时,选取的相似年可能会出现较大的偏差.

由此可见,单因子选取相似历史的方法对预报效果的订正和提高仍是非常有限的,且因子对于华北地区的降水影响可能存在着年代际的变化,使得单因子相似订正不能够保证对每年的预报效果都有提高,只对该因子信号影响较大的年份有着较好的订正,对于因子影响较弱的年份则效果并不理想.因此,在利用影响因子的前期信号选取历史相似年时,必须同时考虑多个影响因子的作用,将这些因子进行组合以后得到的前期综合作用信号作为选取相似年的最佳判据.

### 3.4. 最优多因子组合相似判据的配置

对于多因子组合相似判据的配置,由于前期环境变量场的自由度很大,导致计算量非常大,另外,多因子进行组合配置时的噪声问题以及因子间可能存在的自相关会使得相似订正误差出现非线性增长.研究表明,通过正交经验函数(empirical orthogonal function, EOF)分解方法能有效压缩自由度同时消除部分噪声影响,从而降低前期环境变量场的自由度.因此,对多因子组合构成的变量场  $X_{m \times n}$  进行 EOF 分解,即

$$X_{m \times n} = V_{m \times n} T_{m \times n}, \quad (4)$$

其中,  $V_{m \times n}$  空间函数矩阵,  $T_{m \times n}$  为时间系数矩阵.

通过计算得到每个特征向量  $\lambda_k$  的方差贡献,即

$$R_k = \lambda_k / \sum_{i=1}^m \lambda_i$$

$$[k = 1, 2, 3, \dots, p (p < m)], \quad (5)$$

由于前几个主分量的方差贡献已经包含了原变量场的大部分信息,为了进一步压缩相似判据的自由度,我们取累积方差贡献达到 80%,即

$$G = \sum_{i=1}^p \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i > 0.8, \quad (6)$$

此时,将得到的主分量时间系数作为相似年的选取

依据,进行交叉检验以及多因子独立样本检验的双重检验,以此得到最优的多因子组合配置.

多因子组合中元素个数的变化以及不同因子间的搭配对预报效果也会有很大的影响.为得到最佳的组合个数以及最佳的因子搭配,首先研究组合中因子个数的变化对于 ACC 的影响,如图 5 所示.图 5 给出了 1983—2006, 1983—2007, 1983—2008, 1983—2009 年 4 个时段内交叉检验的平均 ACC 随影响因子个数的变化趋势.图中 1983—2006 指的是对 1983—2006 年时段进行多因子组合交叉检验,1983—2007 以此类推.这里分不同时段进行多因子组合交叉检验是因为考虑到影响因子的实测数据是不断更新的,并且部分影响因子对于华北地区汛期降水的影响作用可能存在着年代际的变化,会导致对不同时段进行交叉检验筛选出最佳的因子组合搭配有所差别,因此,有必要考虑多因子组合的配置关系随不同时段的变化,从而可对不同的预报时期因子影响作用的变化进行有针对性的动态最优多因子组合配置.

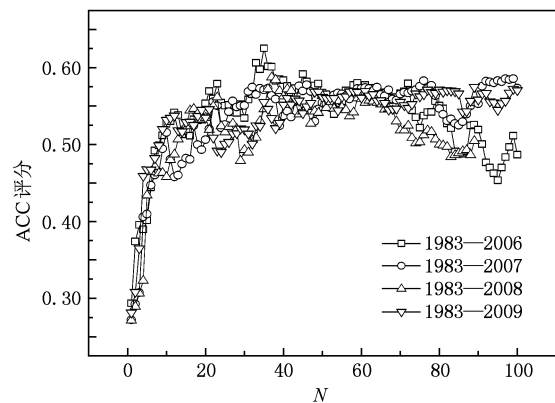


图5 空间 ACC 评分随影响因子个数变化的敏感性实验结果

从图 5 中可以看出,4 个时段的多因子配置交叉检验 ACC 评分随影响因子个数的变化规律是非常一致的:当组合影响因子个数从 1 个增加至 10 个的过程中,ACC 的提高非常明显,当增加到 10 个以上时,ACC 增幅逐渐减小并趋于稳定,当因子个数进一步增大至 60 个以上时,平均 ACC 都出现了不同程度的减小,但减幅较小.同时我们也可看到,不同时段内交叉检验得到最终平均 ACC 稳定值之间差别不大,基本在 0.5—0.6 之间,说明在现有的资料条件下,通过相似误差订正后的华北地区模式预报结果可以达到的平均 ACC 上限为 0.6 左右.因

此,采用多因子组合配置是提高汛期降水预测水平的一个有效途径. 通过上述变化我们也可得到,因子组合个数在增加至 15 个以上时对于 ACC 的提高已经很小,此时 ACC 已经基本达到了上限值,同时考虑到计算量的问题,因此在最优因子组合筛选的时候因子个数在 15 个左右是最优化的. 表 1 分别给

出了 1983—2004, 1983—2005, 1983—2006, 1983—2007, 1983—2008 年 5 个时段配置出的 15 个因子的动态最优组合. 考虑到业务应用以及影响因子更新等问题,配置的最优组合中 1 月份因子视为预报年当年前期因子,而 2—12 月份的因子则采用预报年前年因子.

表 1 不同时段配置出的动态最优多因子组合

| 组合 a<br>(1983—2004) | 组合 b<br>(1983—2005)  | 组合 c<br>(1983—2006) | 组合 d<br>(1983—2007) | 组合 e<br>(1983—2008) |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 9 月东太平洋副高面积         | 4 月东太平洋涛动            | 4 月东太平洋涛动           | 7 月西太平洋指数           | 1 月大西洋三极 SST        |
| 3 月北大西洋涛动(nao)      | 4 月东亚槽位置             | 4 月东亚槽位置            | 3 月亚洲纬向环流指数         | 7 月大西洋欧洲区极涡面积       |
| 3 月加勒比海 SST         | 4 月太平洋区极涡强度          | 10 月亚洲经向环流指数        | 7 月大西洋欧洲区极涡面积       | 5 月印度副高面积强度         |
| 3 月太平洋暖池            | 9 月大西洋副高北界           | 5 月太平洋副高强度          | 8 月亚洲区极涡面积          | 6 月东太平洋副高北界         |
| 7 月大西洋欧洲区极涡面积       | 7 月大西洋欧洲区极涡面积        | 11 月南海副高北界          | 4 月北半球极涡强度          | 12 月欧亚经向环流指数        |
| 4 月北非副高强度           | 3 月北半球极涡面积           | 8 月太平洋副高面积          | 5 月印度副高面积           | 1 月青藏高原             |
| 6 月北方涛动指数           | 8 月全球平均陆地海洋温度        | 4 月太平洋区极涡强度         | 10 月北大西洋涛动          | 9 月太平洋暖池            |
| 11 月太平洋区极涡面积        | 9 月东太平洋副高强度          | 12 月欧亚经向环流指数        | 3 月北半球极涡强度          | 2 月加勒比海 SST         |
| 5 月太平洋副高面积          | 8 月大西洋副高强度           | 2 月南海副高北界           | 5 月太平洋暖池            | 1 月东亚季风指数           |
| 6 月北太平洋型            | 5 月印度副高面积            | 4 月加勒比海 SST         | 2 月印度副高面积           | 6 月北方涛动指数           |
| 4 月东太平洋涛动           | 11 月东亚槽强度            | 9 月北非副高北界           | 4 月加勒比海 SST         | 9 月东太平洋副高面积         |
| 3 月北半球极涡面积          | 5 月北美大西洋副高脊线         | 5 月印度副高面积           | 7 月北非副高强度           | 2 月青藏高原             |
| 8 月北半球副高面积          | 4 月加勒比海 SST 指数 (CAR) | 8 月北半球副高面积          | 9 月欧亚经向环流指数         | 1 月东太平洋涛动           |
| 5 月北美大西洋副高面积        | 2 月大西洋欧洲区极涡强度        | 5 月北非大西洋北美副高面积      | 4 月太平洋区极涡强度         | 10 月太平洋副高北界         |
| 2 月太平洋暖池            | 3 月北大西洋涛动            | 5 月热带南大西洋指数         | 7 月北非大西洋北美副高强度      | 8 月全球平均陆地海洋温度       |

从表 1 中可看出,在最优因子组合配置的因子中,表示极涡和副高的因子占了绝大部分,这是因为副高与极涡是影响我国天气气候变化的两个主要的大气环流实体,并且二者对气候的影响并不是孤立的,而是相互作用、相互配合. 极涡主要体现的是中高纬环流特征,而副高很大程度上反映了中低纬大气环流的变化. 东亚大气环流的年际和年代际变化对华北气候异常具有重要的影响. 气候系统中大气环流因子对大气中水分的输送起到了非常重要的作用,大气中的水汽含量不仅与大气环流关系密切,而且作为能量和水循环过程的主要因子对区域水分平衡有很大的影响<sup>[42]</sup>. 从前面的相关计算可

知,副高脊线、极涡指数与华北汛期降水之间以正相关为主,而副高面积、强度与华北降水基本呈负相关. 当亚洲和欧洲区极涡异常南扩,北非、大西洋、北美副高显著收缩减弱,西太平洋和南海副高明显北抬时,华北降水易偏多. 除此之外,可以看到在动态最优多因子组合中出现较为频繁、起到主导作用的影响因子还有太平洋暖池、加勒比海的海表温度(sea surface temperature, SST)等. 太平洋暖池是全球空气对流最强烈的地区,且活动持久,是气候异常的源地之一,太平洋暖池的变化制约着亚洲、太平洋区域,甚至全球气候变化和某些重大自然灾害的形成与变化. 而对于加勒比海 SST,在前面图 3

我们已经得到加勒比海 SST 与华北地区的汛期降水具有非常好的正相关,该海域的海温对于华北地区的汛期降水具有很好的指示意义.

图 6 给出了 1983—2009 年 27 年的模式误差组合 a 与组合 e 的 EOF 分解第一主分量时间系数与之间的相关关系,对比图 6 (a) 和 (b) 我们可以发现,组合 a 的 EOF 第一主分量的时间系数在前面大部分年份里与模式误差保持着较好的正相关关系,而从 2004 年往后则表现为负相关关系,而组合 e

EOF 第一主分量时间系数在前半段时期内与模式误差的相关关系并不非常明显,但在后期特别是近 10 年里与模式误差之间表现出了较强的正相关关系,正是由于两个组合对于模式误差的相关关系的年代际变化使得两个多因子组合对于不同时段 of 的相似预报能力也不一致,因此,随着时段的推移以及观测资料的不断更新,最优多因子组合配置也是动态的、不断更新的,应针对各时段内具体情况配置最优多因子组合.

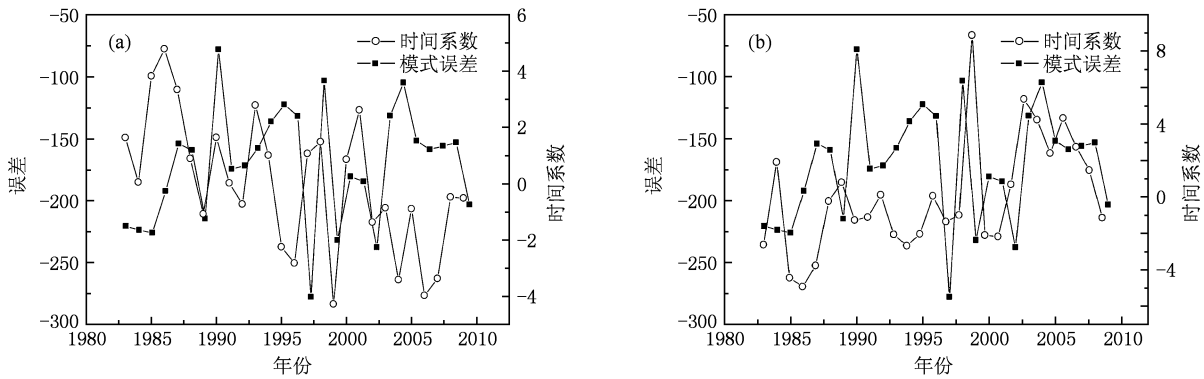


图 6 模式误差与多因子组合 EOF 分解第一主分量时间系数(pei)的相关关系 (a)组合 a,(b)组合 e

综合表 1 中的多因子组合配置以及图 6 中多因子组合 EOF 主分量时间系数与模式误差的相关关系可知,影响因子对于华北地区汛期降水的影响作用存在着年际或年代际的变化,导致对不同时段内进行交叉检验配置出的多因子组合有所差别,多因子组合是动态变化的.由于我们的最终目的是利用多因子组合相似判据对未来的汛期降水情况进行较准确的订正预报,有必要研究多因子组合的配置关系随时间的变化对比其实际预报效果的变化,从而找到适合近阶段内汛

期降水的最优多因子组合配置.因此,为了对比检验多因子组合的真正预报能力,对不同时段配置出的最优多因子组合进行 2005—2009 年 5 年的独立样本回报检验,如图 7 所示.图 7 (a),(b) 分别给出了 5 个不同时段交叉检验配置的最优多因子组合的 5 年回报的 ACC 和均方根误差结果.图中组合 a 至组合 e 分别代表了利用 1983—2004 年,1983—2005 年,1983—2006 年,1983—2007 年,1983—2008 年 5 个时段配置的最优多因子组合.

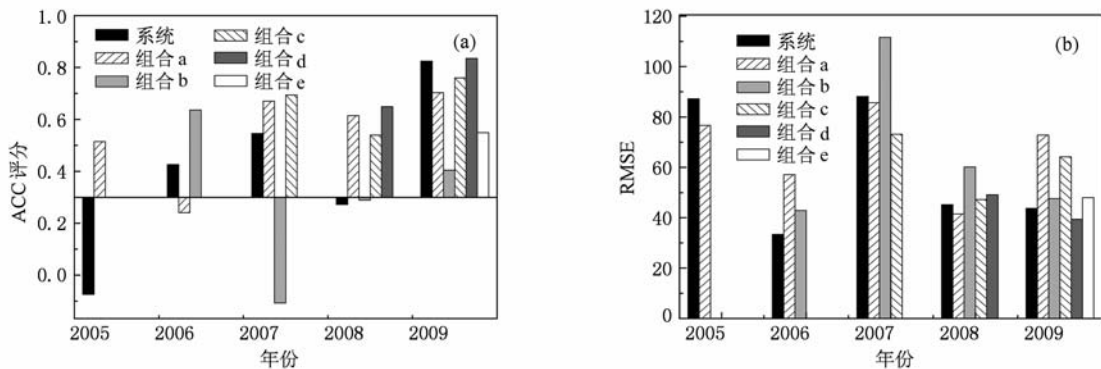


图 7 多因子组合相似 2005—2009 年独立回报的对比 (a)ACC 评分,(b)均方根误差



由于独立样本回报不能用到预报年当年的降水数据,因此 1983—2004 时段配置的最优多因子组合,即组合 a 可以对 2005 年以后的年份进行独立样本回报,而 1983—2005 时段资料配置的最优组合则只能对 2006 年以后的年份进行回报,以此类推. 从图 7 中可以看出,利用 1983—2004 年资料配置出的组合 a 可以对 2005 年汛期降水进行很好的预测,相较系统订正提高非常明显,而对于 2006 年的汛期降水组合 a 的相似订正预报结果则不太理想,订正结果要低于系统订正,但 1983—2005 时段配置的组合 b 的相似订正结果则对 2006 年的汛期降水则显示出良好的预报能力,预报效果要明显高于组合 a 与系统订正,类似地,对于 2007 年汛期独立样本回报,组合 c 的相似订正要好于组合 a 与组合 b. 因此,通过对比各个组合对每个预报年的独立样本回报结果分析可以看出,交叉检验时段越长配置出来的最优多因子组合对于该预报年汛期的预报效果相对较好,一方面因为时段越长对应的相似年的样本量也就越多,另一方面,汛期降水有 2—4 年周期变化,时段越长配置的因子所包含的预报年的历史关键相似信息也越多,配置出来的最优多因子组合也就越有针对性,能够对该预报年的模式误差进行较好的订正. 由于样本量较少使得以上结论仍然存在一定的不确定性,但从近 5 年回报结果可以看出,该方法现阶段样本量较少的情况下提高汛期预测能力较为有效的方法. 因此,对不同预报年采用不同的最优多因子组合即动态最优多因子组合可以有效地提高预报结果.

综上所述,不同组合在不同时间段内显示出的预报能力也是不一样的,并且一般来说,交叉检验所选取的时段越长其相应配置出的多因子组合对预测年的效果越好. 因此,随着资料的不断更新,在不同年份进行实际的汛期降水预报时,由于可使用的样本量长度不同以及前期因子对降水影响的年际或年代际变化,配置出最优多因子组合也应当是动态变化的.

### 3.5. 预报个例分析

为了较直观地了解最优因子组合的相似选取方法对于夏季降水预报的改进能力,选择了 2005—2009 年夏季降水作为独立样本进行研究,限于篇幅,以 2007 年为典型预报个例,给出了实况与预报图,其他年份只给出了相应的评分结果. 之所以选

择 2007 年,一方面为了采用尽可能多的资料选取较为准确的历史相似,另一方面,华北的北部地区在 2007 年出现较强的负异常,同时在华北南部靠近淮河流域的地区则是呈现很强的降水正异常,以此可以检验该动力-相似方法对降水异常的区域是否有异常信号的预报能力,能否针对其给出降水异常的预测.

图 8(a)—(c) 分别给出了 2007 年汛期降水的实况、系统订正和相似订正的预报结果. 总体来说,2007 年汛期西太平洋副热带高压持续偏强,亚洲地区西风带以纬向环流为主,北半球极涡偏西,7,8 月份极涡龟缩于极地,导致入侵我国的冷空气势力偏弱,主要雨带在黄河和长江之间,而其中淮河流域汛期出现了仅次于 1954 年的大洪水. 从 2007 年华北汛期降水实况图可以看出,华北 2007 年降水量分布呈现较明显的纬向分布,北部地区整体呈现降水偏少的态势,其中北京、河北中部以及山西北部有较强的降水负异常,西太平洋副高持续偏强以及北方冷空气势力偏弱是造成华北北部地区汛期降水量偏少的重要原因之一;而华北南部地区则呈现不同程度的降水偏多,其中山东南部地区降水偏多达到 5 成左右. 从图 8(b) 中可以看到系统误差订正给出的结果是整个华北都是降水偏多,对于南部地区降水预报较为准确,而对整个华北北部地区的预报效果并不理想,没有预报出北部地区的降水偏少,系统误差订正 ACC 为 0.54. 图 8(c) 的相似误差订正结果则相对系统订正结果有了一定的提高,虽然相似误差订正也没有很好地给出华北北部的降水偏少,但对华北南部地区的降水偏多则给出了较准确的预报,并且给出了非常强的降水正异常预报,强度与实况大致相当,范围略小于实况,相似误差订正 ACC 为 0.69,较系统误差订正 ACC 提高了 0.15,相似订正方法具有很好的可行性. 由此也可看出,多因子优化组合的相似选取方法对前期的异常信号会有很好的响应并且能够将该异常信号反映到异常降水区域的预报中.

表 2 给出了各个预报年进行相似订正时所选取的相似年以及预报年的实况与相似年实况之间的距平相关系数,通过计算距平相关系数可以判断预报年与相似年之间的相似度的大小,进行判断选取的相似年的准确性. 结果显示,各预报年的实际降水与所选取相似年降水之间具有较好的相似性,只有 2006 和 2009 年选取的 4 个相似年中有一个相似

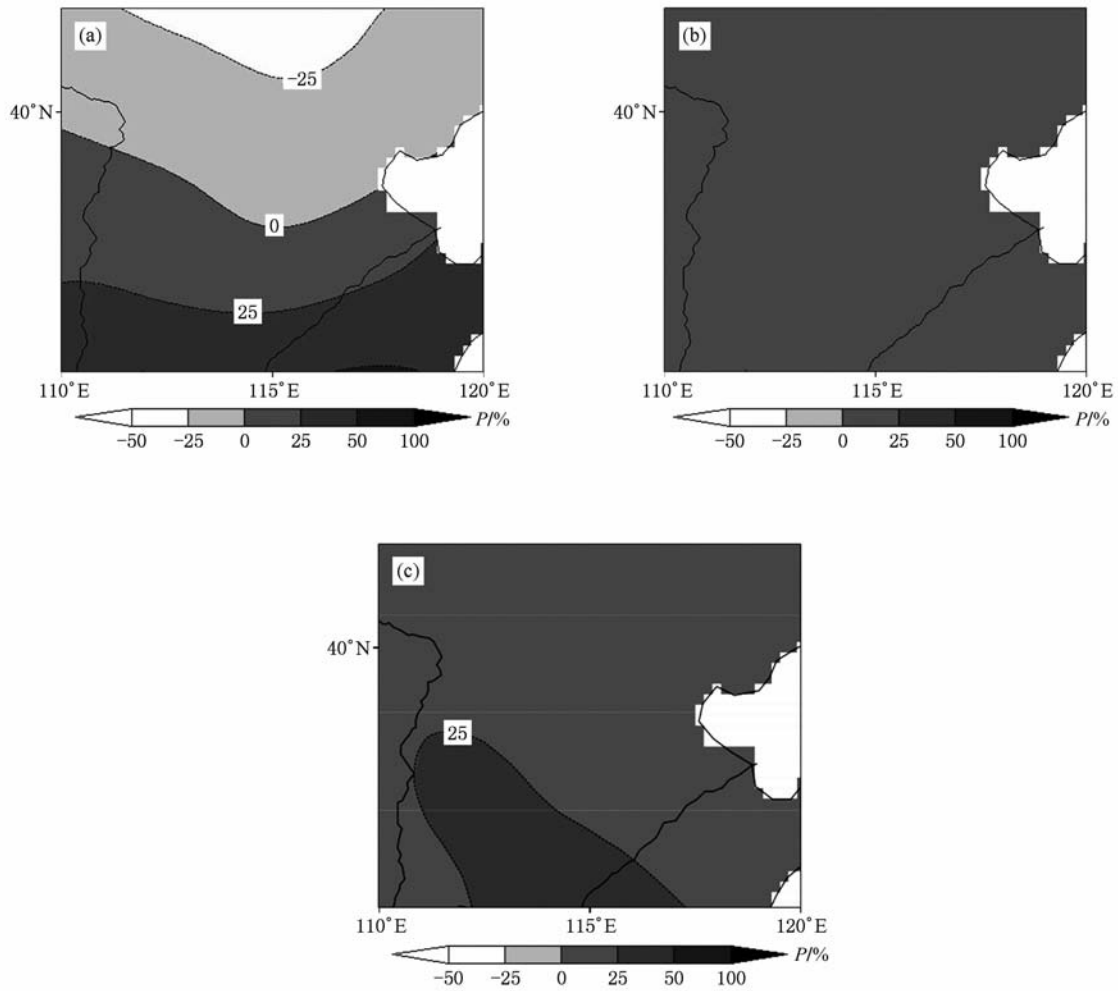


图 8 2007 年独立样本回报 色标为距平百分率  $P$  (a) 实况, (b) 系统订正, (c) 相似订正

表 2 独立样本回报 2005—2009 年选取的相似年及预报年与相似年的距平相关系数

| 预报年  | 第 1 相似年    | 第 2 相似年     | 第 3 相似年     | 第 4 相似年    | ACC  |
|------|------------|-------------|-------------|------------|------|
| 2005 | 2003(0.75) | 2004(0.38)  | 1998(0.65)  | 1996(0.06) | 0.51 |
| 2006 | 1989(0.32) | 1992(-0.55) | 1984(0.52)  | 2005(0.74) | 0.64 |
| 2007 | 2003(0.93) | 1989(0.41)  | 1996(0.01)  | 2004(0.47) | 0.69 |
| 2008 | 2005(0.56) | 2007(0.73)  | 1984(0.43)  | 2006(0.80) | 0.65 |
| 2009 | 2004(0.53) | 2003(0.79)  | 1997(-0.69) | 1989(0.38) | 0.55 |

年选的不够准确, 差异较大, 距平相关系数达到了负值, 对最终的预报结果造成了一定的影响, 使得订正效果有一定下降, 但由于预报年选取的其他相似年都较为准确, 对最终的结果影响并不大, 预报年的实况与选取的相似年实况相似度较高, 最终的相似订正结果也较为理想, 预报结果与实况比较接近, 基本预报出了预报年的降水主要分布形式。

为了直观地了解动态最优多因子组合相似误差订正对于模式误差的订正效果, 图 9(a), (b) 分别给出了独立样本回报的 2005—2009 年汛期降水系统误差订正和相似误差订正的距平相关系数以

及均方根误差对比. 从图中可以看出, 相似误差订正的结果都要优于系统误差订正结果, 将系统订正较差的年份的预报 ACC 评分提高到较高的水平, 近 5 年独立样本的系统订正平均 ACC 为 0.40, 而相似订正的平均 ACC 约为 0.61, 相比提高了 0.21, 并且始终保持较高的准确率. 对于图 9(b) 中的均方根误差而言, 相似订正效果较系统订正也有一定的提高, 但并不十分明显, 对于系统订正的均方根误差较大的 2005 和 2007 年都有明显的减小, 显示出明显的优越性. 因此, 相似订正结果能够稳定地提高模式预报的准确率, 由此可见, 基于动态最优多因

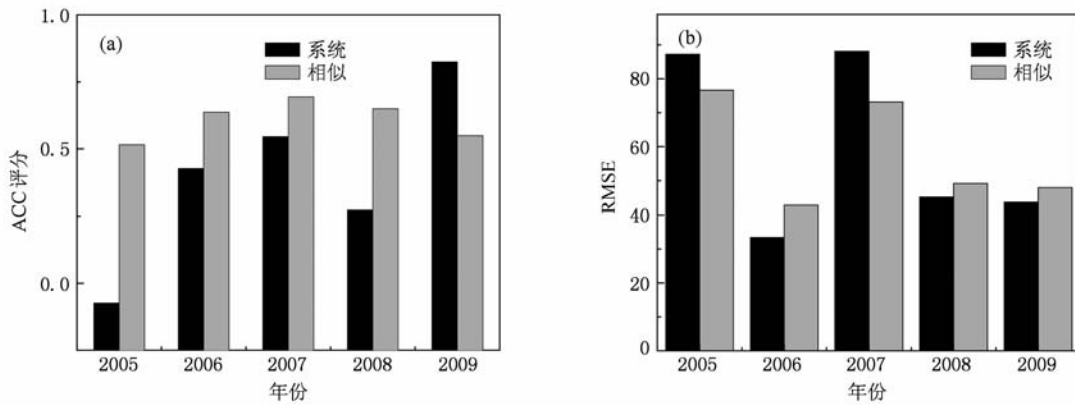


图9 2005—2009年独立样本回报系统订正与相似订正ACC评分和均方根误差 (a)ACC评分,(b)均方根误差

子集组合的相似误差订正方法能有效提高模式的预报技巧。

#### 4. 动态最优多因子组合相似预报方案

通过前面的研究可知,多因子组合相似预报方法可以有效地改善华北地区汛期预报效果,提高预报水平,具有很好的应用前景.为了与业务应用相结合,给出了最终的动态最优多因子组合的相似预报方案,如图10所示.从图10中可以得到该预报方案的框架流程:首先,利用汛期降水CMAP资料和国家气候中心季节预报模式对每年汛期降水预报结果得到汛期降水模式预报误差集,将114项指数作为影响因子,对所有影响因子进行单因子交叉检验预报实验,通过交叉检验的ACC排序筛选出对华北地区模式误差订正较好的前期关键因子,建立关键因子集;针对关键因子集中的各项因子,对其进行组合配置实验,通过交叉检验ACC敏感性实验确

定最优的多因子组合成员个数,通过得到区域预报年前期最优多因子组合,并针对影响因子对区域汛期降水的年际或年代际变化导致不同时段内最优多因子配置的变化,结合历史近期最优多因子组合得到适合不同预报时段的动态最优多因子配置,最后进行模式误差预报并对模式预报结果进行订正并给出订正后模式预报结果。

#### 5. 结 论

基于动力-相似的基本原理,利用已有的物理统计气候学方面的研究成果,通过对前期因子进行单因子交叉检验筛选,建立适用于华北夏季降水的区域特点的普适性固定关键相似因子集,对关键因子集中的影响因子进行单因子交叉检验回报实验,给出单因子交叉检验ACC排序;针对单因子交叉检验ACC排序,筛选出能反映模式预报误差分布特征的关键预报因子;对关键预报因子进行配置试验,通过独立样本检验ACC得到区域最优多因子配置,考虑到影响因子对区域汛期降水的年际或年代际变化导致在不同的研究时段内的最优多因子配置的动态变化,结合历史近期最优多因子组合得到适合不同预报时段的动态最优多因子配置,结合历史近期最优因子配置得到预报时段内稳定的最优关键因子组合;针对预报年,通过最优多因子组合分别选取最优的4个相似年估计当前的预报误差,利用计算出的预报误差订正模式的预报结果,改善华北地区夏季降水预报效果.经独立样本回报检验显示,动态最优关键因子组合的相似误差订正方法可以显著提高华北地区汛期降水的预报技巧,对华北地区夏季降水具有很好的预报可行性,并最终形成了动态最优多因子组合的相似预报方案。

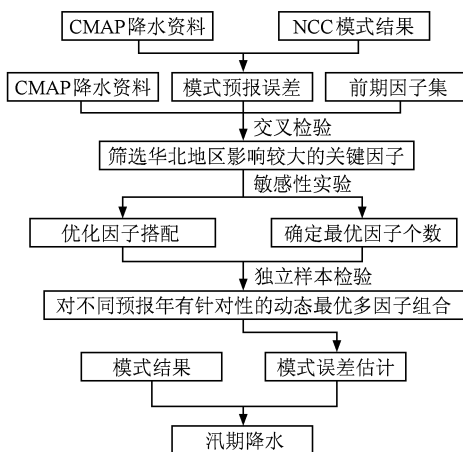


图10 动态最优多因子组合预报方案流程图

- [1] Feng G L, Gong Z Q, Zhi R, Zhang D Q 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2745
- [2] Feng G L, Dong W J, Li J P 2004 *Chin. Phys.* **13** 1582
- [3] Zhao S R, Song Z S 1999 *Plateau Meteorol.* **18** 535 (in Chinese) [赵声蓉、宋正山 1999 高原气象 **18** 535]
- [4] Hou W, Yang P, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3932 (in Chinese) [侯威、杨萍、封国林 2008 物理学报 **57** 3932]
- [5] Barnett T P 1990 *Nature* **343** 743
- [6] Feng G L, Dong W J, Jia X J, Cao H X 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1181 (in Chinese) [封国林、董文杰、贾晓静、曹鸿兴 2002 物理学报 **51** 1181]
- [7] Hou W, Yang P, Zheng Z H, Gong Z Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2106 (in Chinese) [侯威、杨萍、郑志海、龚志强 2009 物理学报 **58** 2106]
- [8] Gong Z Q, Feng G L, Wan S Q, Li J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 477 (in Chinese) [龚志强、封国林、万仕全、李建平 2006 物理学报 **55** 477]
- [9] Zhang D Q, Zhang L, Yang J, Feng G L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 655 (in Chinese) [章大全、张璐、杨杰、封国林 2010 物理学报 **59** 655]
- [10] Yang J, Hou W, Feng G L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 664 (in Chinese) [杨杰、侯威、封国林 2010 物理学报 **59** 664]
- [11] Zhi R, Lian Y, Feng G L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1837 (in Chinese) [支蓉、廉毅、封国林 2007 物理学报 **56** 1837]
- [12] Xie K, Ren X J 2008 *Sci. Meteorol. Sin.* **28** 508 (in Chinese) [谢坤、任雪娟 2008 气象科学 **28** 508]
- [13] Zhang L J, Xia J, Hu Z F 2008 *Adv. Clim. Chang. Res.* **4** 140 (in Chinese) [张利平、夏军、胡志芳 2008 气候变化研究 **4** 140]
- [14] Lu R Y 2005 *Chin. Sci. Bull.* **50** 1131 (in Chinese) [陆日宇 2005 科学通报 **50** 1131]
- [15] Gong Z Q, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3920 (in Chinese) [龚志强、封国林 2008 物理学报 **57** 3920]
- [16] Fan K, Lin M J, Gao Y Z 2008 *Sci. Chin.* **38** 1452 (in Chinese) [范可、林美静、高煜中 2008 中国科学 **38** 1452]
- [17] Feng G L, Dai X G, Wang A H, Chou J F 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 606 (in Chinese) [封国林、戴新刚、王爱慧、丑纪范 2001 物理学报 **50** 606]
- [18] Chou J F 2003 *Bimonth. Xinjiang Meteorol.* **26** 1 (in Chinese) [丑纪范 2003 新疆气象 **26** 1]
- [19] Chou J F 1986 *Plateau Meteorol.* **5** 367 (in Chinese) [丑纪范 1986 高原气象 **5** 367]
- [20] Thomas A G 1970 *J. Appl. Meteorol.* **8** 333
- [21] Michael K T, Lisa G, Anthony G B 2005 *Notes Corresp.* **18** 1831
- [22] Gu Z C 1958 *Acta Meteorol. Sin.* **29** 176 (in Chinese) [顾震潮 1958 气象学报 **29** 176]
- [23] Chou J F 1974 *Sci. Chin. Ser. A* **6** 635 (in Chinese) [丑纪范 1974 中国科学 A 辑 **6** 635]
- [24] Qiu C J, Chou J F 1989 *Chin. J. Atmos. Sci.* **13** 22 (in Chinese) [邱崇践、丑纪范 1989 大气科学 **13** 22]
- [25] Huang J P, Wang S W 1991 *Sci. Chin. Ser. B* **2** 216 (in Chinese) [黄建平、王绍武 1991 中国科学 B 辑 **2** 216]
- [26] Huang J P, Yi Y H, Wang S W, Chou J F 1993 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **119** 547
- [27] Ren H L, Zhang P Q, Li W J, Chou J F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4388 (in Chinese) [任宏利、张培群、李维京、丑纪范 2006 物理学报 **55** 4388]
- [28] Chen H, Lin ZH 2006 *Adv. Atmos. Sci.* **23** 425
- [29] Gu X Q 1998 *Chin. Sci. Bull.* **43** 1 (in Chinese) [谷湘潜 1998 科学通报 **43** 1]
- [30] Cao H X 1993 *Sci. Chin. Ser. B* **23** 104 (in Chinese) [曹鸿兴 1993 中国科学 B 辑 **23** 104]
- [31] Feng G L, Cao H X, Wei F Y, Chou J F 2001 *Acta Meteorol. Sin.* **59** 206 (in Chinese) [封国林、曹鸿兴、魏凤英、丑纪范 2001 气象学报 **59** 206]
- [32] Ding Y H, Liu Y M, Song Y J, Li Q Q 2002 *Clim. Envir.* **7** 236 (in Chinese) [丁一汇、刘一鸣、宋永加、李清泉 2002 气候与环境研究 **7** 236]
- [33] Li W J, Zhang P Q, Li Q Q, Wang L N, Liu Y M, Shi X L, Zhang Z Q, Liu Y M, Hu G Q, Dang H Y, Zhang F, Chen L J, Sun C R, Zhao Q G, Dong M 2005 *Quart. J. Appl. Meteorol.* **16** 1 (in Chinese) [李维京、张培群、李清泉、王兰宁、刘益民、史学丽、张祖强、刘一鸣、胡国权、党鸿雁、张芳、陈丽娟、孙除荣、赵其庆、董敏 2005 应用气象学报 **16** 1]
- [34] Ren H L, Chou J F 2007 *Sci. Chin. Ser. D* **37** 988 (in Chinese) [任宏利、丑纪范 2007 中国科学 D 辑 **37** 988]
- [35] Ren H L, Chou J F 2007 *Adv. Earth Sci.* **22** 376 (in Chinese) [任宏利、丑纪范 2007 地球科学进展 **22** 376]
- [36] Feng G L, Dong W J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2347 (in Chinese) [封国林、董文杰 2003 物理学报 **52** 2347]
- [37] 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]
- [38] Bao M, Ni Y Q, Chou J F 2004 *Chin. Sci. Bull.* **49** 1112 (in Chinese) [鲍名、倪允琪、丑纪范 2004 科学通报 **49** 1112]
- [39] Shi Y S, Yao X X, Yang X L, Li Z T 2008 *Sci. Meteorol. Sin.* **28** 377 (in Chinese) [史印山、姚学祥、杨晓亮、李宗涛 2008 气象科学 **28** 377]
- [40] Mao Y J 2005 *Bull. Sci. Tech.* **5** 533 (in Chinese) [毛燕军 2005 科技通报 **5** 533]
- [41] Yao Y, Yan H S 2008 *J. Trop. Meteorol.* **24** 483 (in Chinese) [姚愚、严华生 2008 热带气象学报 **24** 483]
- [42] Zhang H D, Jin R H, Zhang Y S 2008 *J. Trop. Meteorol.* **24** 417 (in Chinese) [张恒德、金荣花、张友姝 2008 热带气象学报 **24** 417]

# Dynamic optimal multi-indexes configuration for estimating the prediction errors of dynamical climate model in North China\*

Yang Jie<sup>1)2)</sup> Wang Qi-Guang<sup>1)</sup> Zhi Rong<sup>3)</sup> Feng Guo-Lin<sup>2)3)†</sup>

1) (*College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

2) (*Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia of the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

3) (*Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081, China*)

(Received 22 June 2010; revised manuscript received 15 July 2010)

## Abstract

Based on the idea of using the historical-analogue information to revise the prediction errors of National Climate Centre numerical business model, for North China, based on analysis data of the CMAP from 1983 to 2009, 40 pieces of climate indices from NOAA, 27 years of the season prediction model results from 1983 to 2009 and 74 pieces of circulation characteristics materials provided by Weather Diagnostic Forecasting Room of National Climate Center, using the method of combining data analysis and numerical simulation of diagnostic tests, taking the advantage of the prediction error of the key information of similar model from the historical data, by identifying key factors, optimizing allocation of the different factors of different forecasting years, we established specific multi-factor dynamic optimal portfolios to revise prediction errors in different periods of the power-statistical model in North China, and constructed early environmental factors similar to field multiple objective criteria, to develop new technology of revising prediction errors from the power-statistical model based on dynamic optimal combination of multi-factor, and improved the prediction effect in the summer precipitation in North China and the forecasting skills. Results of independent sample return of 2005—2009 shows that, the score of similarity revised method has improved significantly compared with the score of systematic revised method. The method has a good prospect for summer precipitation forecast in North China, and is going to be put into operation.

**Keywords:** set of key factors, estimation of model errors, precipitation, prediction

**PACS:** 92.60. Wc

---

\* Project supported by the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant No. GYHY200806005), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40875040, 40930952) and the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant Nos. 2007BAC29B01, 2009BAC51B04).

† Corresponding author. E-mail: ferggl@cma.gov.cn