

# 基于奇异值分解对中国夏季降水模式 误差订正的研究\*

苏海晶<sup>1)†</sup> 王启光<sup>2)</sup> 杨杰<sup>3)</sup> 钱忠华<sup>1)3)</sup>

1) (扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

2) (中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

3) (兰州大学大气科学院, 兰州 730000)

(2012年8月29日收到; 2013年1月22日收到修改稿)

利用奇异值分解 (SVD) 方法对国家气候中心气候业务模式 CGCM 的预报结果进行订正, 进而得到改进后的预报结果. 通过对 1983—2011 年中国夏季降水的模式预报和实际降水值各年份之间的耦合场进行 SVD 分解, 选取模式预报和实况降水相关性最好的前 3—7 个模态, 对这 5 种不同模态个数的订正结果加以对比, 选出对中国区域订正效果最好的模态个数, 得到模式预报的订正结果. 对 2004—2009 年 6 年进行交叉回报试验, 以距平相关系数和均方根误差作为评判标准来检验回报结果, 得出 2004—2009 大部分年份取前 5 个模态作为当年订正的模态个数时, 订正效果最好. 利用已有的 2004—2009 年的模式和实际降水资料进行检验, 证实在大部分年份 5 个模态订正效果最好, 并将结果与系统误差订正法的结果相比较, 表明 SVD 法对 2004—2009 年 6 年的订正结果中, 有 4 年比系统误差法的订正效果好. 以 2010 年作为预测年, 以 1983—2009 年 27 年交叉回报检验的结果确定模态个数, 对预测结果加以分析, 显示该方法具有潜在的业务应用价值.

**关键词:** 奇异值分解, 模式预报订正, 汛期降水

**PACS:** 92.60.Wc

**DOI:** 10.7498/aps.62.109202

## 1 引言

近几十年来, 我国各种气候灾害频发, 尤其是洪涝和干旱灾害给人民生命财产安全带来了严重的威胁, 对国民经济影响巨大. 在我国, 50% 的自然灾害是由旱、涝引起的<sup>[1-3]</sup>. 如 2006 和 2007 年重庆分别出现了大旱和大涝, 2009 和 2010 年西南地区出现了夏秋冬持续干旱, 2011 年 6 月份开始长江中下游地区出现了旱涝急转等灾害事件, 均给国民生产和生活带来巨大损失. 因此, 短期气候预测的研究是保障国家安全、发展经济和防灾减灾的现实需要<sup>[4-6]</sup>, 尤其是对汛期降水预测的研究有着极其重要的科学意义和现实价值<sup>[7]</sup>.

目前短期气候预测仍是世界性难题, 预测水平不高, 效果不稳定, 不确定性较大, 业务应用水平也不高<sup>[8-10]</sup>, 仍需进一步提升. 我国地处东亚季风区, 自然条件复杂, 气候变化剧烈, 汛期降水的多寡和雨带的分布都受到东亚夏季风的控制, 同时也受到高纬西风环流等其他因素的影响, 使得我国夏季降水的预报难度大大增加<sup>[11-12]</sup>. 目前短期气候预测主要有两种方法, 即统计方法和数值模式的动力学方法, 二者各有优势和缺陷. 统计学方法虽善于利用大量历史资料, 但缺少物理机制使它并不能成为主要的预测工具; 动力学方法虽善于运用物理规律, 却同样面临模式物理过程不够准确和初值不精确的问题. 普遍的共识是: 统计学方法与动力学方法要相互借鉴, 融合发展. 围绕二者如何有效结合的

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41105055, 40930952)、全球变化重大研究计划 (批准号: 2012CB955902) 和公益性行业 (气象) 科研专项基金 (批准号: GYHY201006016, GYHY201106015) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yyjshj6054@126.com

问题, 国内外开展了广泛的研究. 文献 [14—16] 从理论上论证了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. 丑纪范提出了基于历史相似信息对动力模式的误差进行预报的新思路, 在此思路的基础上众多学者如邱崇践和丑纪范 [17], 封国林等 [18], 任宏利和丑纪范 [19], 郑志海等 [20] 进行了汛期降水预测研究, 取得了一系列成果. 文献 [21—24] 利用动态最优因子组合的方法对我国不同区域的夏季降水预报进行了研究, 也取得了可喜的成果.

本文基于动力 - 统计思路, 从另一种角度利用统计信息和模式信息来预测降水, 即从奇异值分解角度将历史统计资料场和动力学模式结果场进行耦合, 进一步研究动力 - 统计结合模式进行误差估计的短期气候预测方法.

## 2 资料及订正效果检验方法

### 2.1 资料介绍

本文的研究资料主要有两种: 一是美国气候预报中心组合降水分析资料 (CMAP) 中 1983—2011 年夏季降水数据, 水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ; 二是国家气候中心 (NCC) 季节/年际预测业务系统模式预报历史回报产品中的逐月降水场资料插值成经纬度格点为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 共  $144 \times 73$  个格点. 本文研究的是包含在中国区域内的 375 个格点数据.

### 2.2 检验标准

本文的回报结果的检验标准为空间距平相关系数 (ACC) 和均方根误差 (RMSE)<sup>[21]</sup>. 其中, ACC 计算标准如下:

$$X(j) = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} [F(i, j) - C(i, j) - M_{jc}(j)] [A(i, j) - C(i, j) - M_{ac}(j)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_j} [F(i, j) - C(i, j) - M_{jc}(j)]^2 \sum_{i=1}^{N_j} [A(i, j) - C(i, j) - M_{ac}(j)]^2}}, \quad (1)$$

其中  $X(j)$  为 ACC 值,  $F(i, j)$  为预报值,  $A(i, j)$  为实况,  $C(i, j)$  为气候平均态, 且有

$$\begin{aligned} M_{fc}(j) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_j} [F(i, j) - C(i, j)], \\ M_{ac}(j) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_j} [A(i, j) - C(i, j)]. \end{aligned} \quad (2)$$

考虑纬度订正后的 ACC 为

$$X = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^N X(j) \cos \theta_j, \quad (3)$$

其中  $K = \sum_{j=1}^N \cos \theta_j$ ,  $\theta_j$  是高斯纬度. ACC 的值处于 -1 到 1 之间, ACC 的值越大则说明预报效果越好.

RMSE 的计算标准如下:

$$Y(j) = \sqrt{\frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} [F(i, j) - A(i, j)]^2}. \quad (4)$$

考虑纬度订正后的 RMSE 为

$$Y = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^N \text{RMSE}(j) \cos \theta_j, \quad (5)$$

RMSE 越小, 表示预报的效果越好, 当预报值与实况完全一致时, 其值为 0.

## 3 模式预报结果的订正方法

### 3.1 中国汛期降水分析及系统误差订正法

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, 各年内逐月降水量起伏较大. 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、一次性洪量大等特点 [24,25]. 因此对夏季的降水量预报准确度直接关系到全年的降水量预报准确度.

通过将 CGCM 模式预报的原始降水结果与实际降水之间进行对比分析可以发现, 每年模式预报与实际降水量存在很大差异, 并且每年的模式预报原始结果都比实际降水要大很多, 存在系统性预报偏差. 因此, 需要对模式预报的这一系统偏差进行

修正, 即模式误差的系统订正. 系统误差订正是对已知的历年模式预报误差取平均值, 其表达式为

$$C_x = A_x - [\sum (A_{n-1} - B_{n-1})]/(n-1), \quad (6)$$

其中  $A_n$  为第  $n$  年的模式预报原始结果,  $B_n$  为实际降水值,  $A_{n-1}$  表示除订正年外剩下的  $n-1$  年模式预报结果,  $B_{n-1}$  表示除预报年  $x$  外其他  $n-1$  年的实际降水量,  $A_x$  表示预报年的模式降水结果,  $C_x$  表示系统误差订正结果. 将  $C_x$  作为预报年的模式误差值叠加到模式预报的原始结果中得到预报年的系统误差订正结果.

图 1 给出了 1980—2010 年实际降水与系统误差订正后的降水结果, 从订正的结果上看, 模式预报系统误差订正后的预报结果和模式预报初始值相比较与实际降水之间的误差明显减小. 相差最大的是 1989 年, 为 43.07 mm, 相差最小的是 1997 年, 为 0.15 mm. 从系统误差订正后的全国区域平均降水量订正效果上看, 它能够明显地对模式预报初始值进行修正, 能够使得预报的全国年平均降水总量与实况之间保持较好的一致. 但进一步对比可以发现, 实况降水的年际变化率要比预报的大得多, 不同年份的降水量呈现明显的旱年和涝年之分, 而系统订正预报结果年际变化率很小, 基本上在均值附近上下浮动. 可以看出, 系统订正预报只能模拟出实际降水的平均状态, 而对于降水异常偏多年 (如 1990 年) 以及异常偏少年 (如 1989 年) 等异常年份无法进行有效的预报.

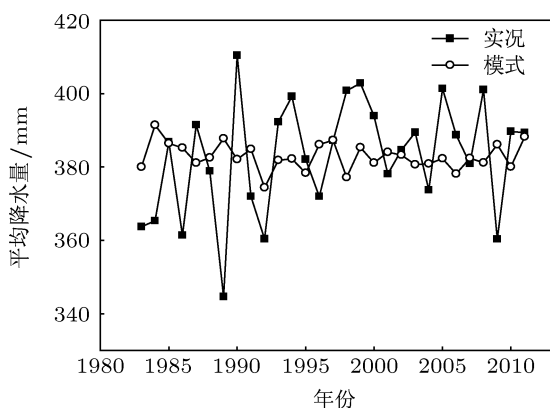


图 1 1980—2010 年全国实际平均降水量与系统订正平均降水量

图 2 给出了 1983—2011 年系统误差订正的 ACC 评分. 从图中可以看到部分年份降水的系统误差订正总量结果和 ACC 不对应. 如 1985 和 2002 年, 系统误差订正后的降水总量与实际降水总量相

差较小, 而 ACC 结果却显示这两年的订正结果较差. 这是由于中国区域降水分布不均匀造成的. 图 1 系统误差订正后平均降水量相对于模式平均降水量订正效果直观、明显. 但要具体分析某一年的订正效果要看 ACC 值, 因为它包含了全国区域系统误差订正后每个格点的订正效果信息.

综上所述, 系统误差订正后相对于模式预报原始值而言预测结果有一定提高, 大部分年份订正后的平均降水量与实际降水量较接近, 且 ACC 结果也有所提高, 但总体预报技巧仍处于较低的水平, 尤其是在降水异常的年份几乎没有预报能力. 因此, 系统误差订正还是属于较简单的模式后处理方法, 要想提升模式的预报能力, 达到业务应用的水平, 需采用技巧性更高的方法来改进模式预报结果, 使其能够对降水的异常年实现有针对性的预报.

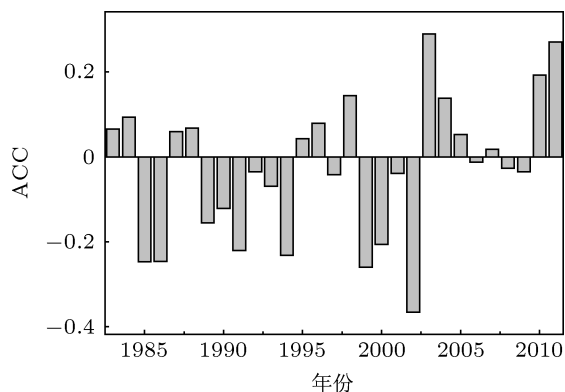


图 2 1983—2011 年系统误差订正后预测与实况距平相关系数

### 3.2 利用奇异值分解法对模式预报结果进行订正

#### 3.2.1 奇异值分解方法介绍 [27-30]

奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 方法是一种对不同气候要素的耦合场进行统计分析的方法, 主要是用来分解耦合场的时空场从而提取它们时间和空间的有用相关信息. 因此, 为了研究两者之间的相关关系, 对于两个要素场采用 SVD 方法来分解其交叉协方差阵.

例如, 对于左场  $X$  和右场  $Y$ , 它们的交叉协方差阵是  $C_{XY}$ . 利用 SVD 方法分解  $C_{XY}$  得出下式:

$$C_{XY} = L \Sigma R^T, \quad (7)$$

其中  $L$  和  $R$  是正交矩阵, 分别代表了左场  $X$  和右

场  $Y$  的特征向量,  $\Sigma$  是非负奇异值组成的对角阵:

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r), \quad (8)$$

且  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$ ,  $\sigma_i$  代表奇异值. 每一个奇异值和一对左右特征向量相对应.

### 3.2.2 奇异值分解订正法预报全国地区夏季降水的步骤<sup>[30]</sup>

设区域内第  $m$  个格点第  $n$  年的模式预报原始结果为  $X_{m_1 \times n}$ , 实际降水值为  $Y_{m_2 \times n}$  (对于同一个区域而言这里的  $m_1$  和  $m_2$  其实是相等的, 为了下面工作中区分, 模式预报结果和实际降水值分别设为  $m_1$  和  $m_2$ ). 本文利用前  $n$  年的模式降水和实际降水数据来预测第  $n+1$  年的降水量. 设前  $n$  年的模式降水量为  $X$ , 实际降水量为  $Y$ .

$$X = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & X_{1,3} & X_{1,4} & \dots & X_{1,n} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & X_{2,3} & X_{2,4} & \dots & X_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m_1,1} & X_{m_1,2} & X_{m_1,3} & X_{m_1,4} & \dots & X_{m_1,n} \end{bmatrix},$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{1,1} & Y_{1,2} & Y_{1,3} & Y_{1,4} & \dots & Y_{1,n} \\ Y_{2,1} & Y_{2,2} & Y_{2,3} & Y_{2,4} & \dots & Y_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{m_2,1} & Y_{m_2,2} & Y_{m_2,3} & Y_{m_2,4} & \dots & Y_{m_2,n} \end{bmatrix}.$$

第一步: 利用奇异值分解提取主要的耦合模态

设模式预报原始结果距平气象要素场  $X$  为左场, 实际降水距平值  $Y$  为右场,  $S$  为左右场的交叉协方差矩阵.

$$S = XY^T, \quad (9)$$

对  $S_{m_1 \times m_2}$  进行奇异值分解得

$$S = L\Sigma R^T, \quad r \leq \min(m_1, m_2), \quad (10)$$

$L$  和  $R$  分别代表左场  $X$  和右场  $Y$  的空间特征向量. 为了惟一地分解方程 (10), 令  $L, R$  满足正交化向量条件, 即

$$LL^T = E, \quad RR^T = E \quad (E \text{ 为单位矩阵}), \quad (11)$$

将左右两场  $X, Y$  按各自的奇异向量通过选取 3—7 个不同模态数分别完全展开, 得

$$X = LU, \quad (12)$$

$$Y = RV, \quad (13)$$

其中  $U$  和  $V$  是左右场  $r$  个行向量正交的时间权重系数, 分别与  $L, R$  对应. 利用 (11)—(13) 式得到  $U$  和  $V$

$$U = L^T X, \quad (14)$$

$$V = R^T Y. \quad (15)$$

第二步: 利用最小二乘法求模式降水时间系数矩阵的回归系数

$$Y = CU + \varepsilon, \quad (16)$$

最后得到回归系数  $C$ .

第三步: 降水距平的订正

设第  $n+1$  年的模式降水场为  $X'$  那么第  $n+1$  的模式时间系数场  $U'$  为

$$U' = L^T X', \quad (17)$$

最后将得到的第  $n+1$  年的模式降水距平场的时间系数  $U'$  与第二步中利用最小二乘法得出的前  $n$  年模式降水时间系数矩阵的回归系数相乘, 得到预报的第  $n+1$  年的降水量, 即

$$E = CU', \quad (18)$$

(这里的  $m = m_1 = m_2$  都是预报区域的格点数),  $E$  就是最后得到的第  $n+1$  年降水距平的预报结果.

### 3.2.3 模态个数的选取

从统计意义上讲 SVD 要求样本量  $n$  大于两个气象要素场的格点数  $m_1$  和  $m_2$ , 得到有统计意义的 SVD 模态. 但在实际的气象研究中格点数会远远大于样本个数, 所以得到的模态并非全部有意义. 本文采取试验的方法取相关性最好的前 1—10 个模态, 这样一直试验下去并对相应的订正结果以 ACC 和 RMSE 作为评判标准进行分析. 但取 10 个模态一一试验显然是太多了, 具体取几个模态较合适还需进一步分析.

首先对 1983—2007 年, 1983—2008 年, 1983—2009 年三个时间序列的模式场和实际场分别耦合进行奇异值分解, 其前 3 个模态的累计平方协方差百分率分别为 56.49%, 55.50% 和 57.12%, 前 7 个模态的累计平方协方差百分率分别为 77.93%, 77.40% 和 77.87%. 这说明分解出来的前 7 个模态能够较好地表征模式降水与实际降水之间的关系.

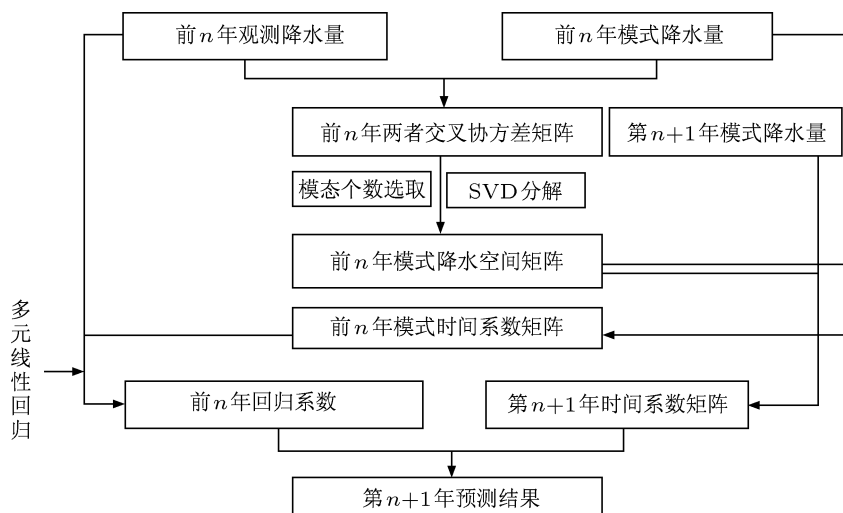


图3 SVD订正法预测第 $n+1$ 年夏季降水的流程图

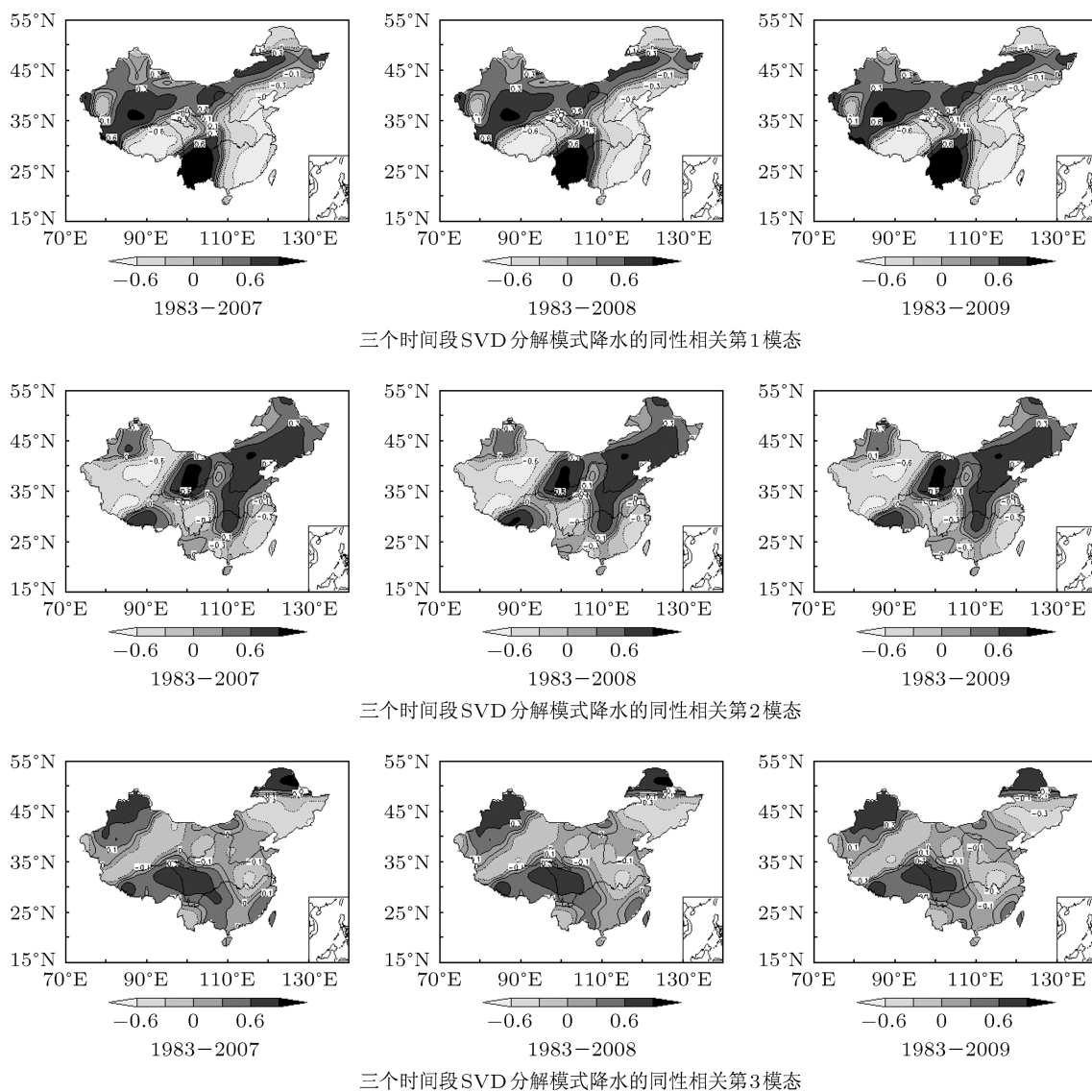


图4 1983—2007, 1983—2008, 1983—2009 三个时间段 SVD 分解出的模式降水同性相关前三个模态对比

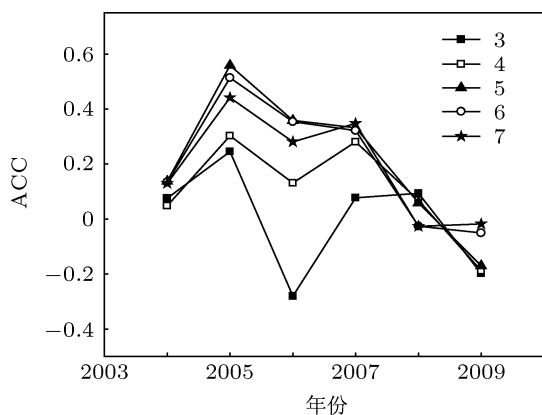


图5 不同个数的模态下预报 2004—2009 年的 ACC

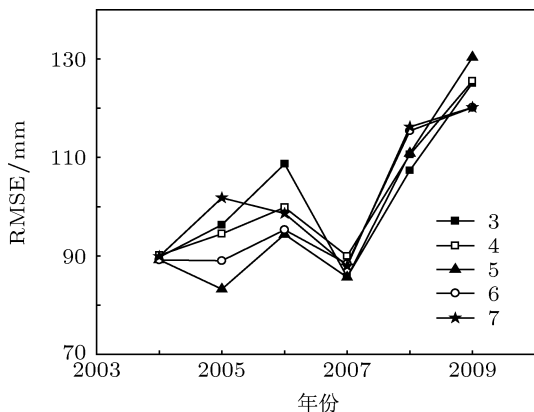


图6 不同模态个数下预报 2004—2009 年的 RMSE 变化趋势

本方法流程中(图3)将前 $n$ 年模式降水空间矩阵和第 $n+1$ 年模式降水量结合得到第 $n+1$ 年的时间系数矩阵的过程.这里将 $n$ 年和 $n+1$ 年两者的模式空间矩阵看作是稳定的,并进一步进行验证.图4给出了1983—2007,1983—2008,1983—2009三个时间段SVD分解模式降水同性相关在前3个模态下的对比.从前三个模态来看,尽管时段略有差异,但是模态的空间分布是较为稳定的,在资料长度多一年或者少一年的情况下,前3个模态同性相关分布图差异较小,可以看作稳定的分量,因此将 $n+1$ 年的模式降水空间矩阵与 $n$ 年模式降水空间矩阵看作是等同的.同样,在4—6个模态,其空间分布也基本稳定,时间段的略微差异对其空间分布的影响并不大.因此,我们将前6个模态空间分布看作是稳定的,具有较好的可预报性.而从第7个模态开始资料的时间长度对实际降水同性相关分布有着较大影响,其空间模态随时段的变化会有很大的差异.这些模态所包含的信息量没有传递性

可言,因此这里选取了前6个模态来构建预报方案.从实际降水的前6个同性相关模态的空间分布来看也能够较好地反映出近几十年来我国汛期降水的基本特征,能够从一定程度上抓住降水的主要特征.

结合模态累计平方协方差的贡献率以及SVD分解得出的空间稳定性,选择前3—7个模态作为模式误差订正的试验个数,这样既保证了模态平方协方差的贡献率,又全面地包含了可以传递的符合信息量.具体选哪几个模态订正效果最好,要通过订正结果的试验来得出.

通过对1983—2003年做21年的回报交叉检验,得到了5个模态效果最好的结果,运用到2004年上,得到了2004年的回报结果.同样在2005年也是运用1983—2004年22年的交叉回报检验,得到了5个模态结果最好,运用到2005年上,2006—2009年也是如此类推.这六年大部分年份在选择前5个模态作为最后订正模态时得出的订正效果最好.为了检验这六年的交叉回报结果的适用性,同时做了2004—2009这六年的独立样本结果对比.利用已有的模式和实际降水资料验证不同模态个数下的订正结果.图5给出了不同模态个数下2004—2009年独立样本预测ACC对比关系.选取前3,4,5,6,7个模态时,2004—2009年6年的ACC均值分别为0.002,0.107,0.212,0.208,0.193,前5个模态最高的是0.212.从图中可以看出,当依次选取前3,4,5个模态时,ACC在不断提高,说明整体的预报效果在提升,当选取6,7个模态时整体的订正效果下降.并且从每一年的角度上看,当选取前5个模态时其ACC值基本都比选其他模态个数时要高.因此在2004—2009年,当以ACC作为订正效果的评判标准时,选取前5个模态得到的订正效果最好.

图6给出了不同模态个数下2004—2009年的RMSE, RMSE越小,表明订正效果越好.同样从图中可以看出,当选取前3,4,5个模态时, RMSE的值整体呈下降趋势,表明订正效果越来越好;当取前6,7个模态时, RMSE值整体呈上升趋势.取前3,4,5,6,7个模态时,其RMSE平均值依次为102.15,101.75,98.94,99.55,102.43 mm,订正最好的是取前5个模态时的98.94 mm.并且每一年基本也是在取前5个模态时订正效果最好.所以当以RMSE为订正效果的评判标准时,也是选取前5个模态得到的

订正效果最好.

2004—2009 年交叉检验的结果以及独立样本的模态试验对比结果表明, 在 2004—2009 年的模态个数选取的结果是可信的, 也说明这种方法的正确性.

## 4 回报结果分析

### 4.1 SVD 订正与系统订正效果对比

为了检测奇异值分解法对汛期降水模式预报的订正效果, 根据对 2004—2009 年的交叉回报分析, 取其前 5 个模态订正的结果, 把这 6 年的订正结果与模式误差订正法得出的结果相比较. 图 7 给出了 SVD 订正和系统误差订正的 ACC 对比. 从图中可以看出 2005, 2006, 2007, 2008 年 SVD 订正的 ACC 值都大于系统订正值, 并且有了明显的提升, 其中 ACC 提升最大的是 2005 年, 达到了 0.5584, 而在 2004, 2009 年 SVD 订正要略低于系统订正, SVD 分解法 6 年的 ACC 平均值为 0.212, 系统误差订正法 6 年的 ACC 平均值为 0.022. 由此看出 SVD 订正法的订正效果要明显优于系统误差订正法, 其 ACC 均值提升了近 0.19.

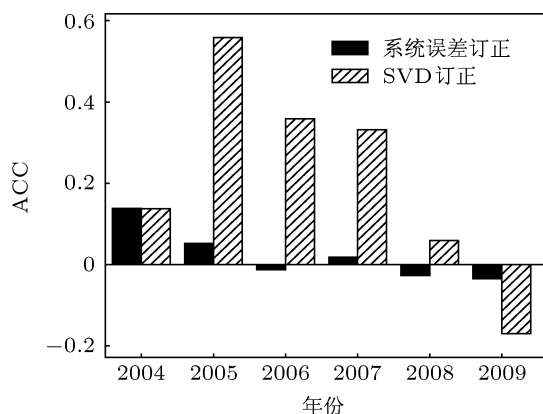


图 7 SVD 订正法和系统误差订正法订正后的距平相关系数对比

图 8 从 RMSE 的角度给出了 2004 年到 2009 年的 SVD 订证和系统误差订正后的对比. 结果显示, 在 2005, 2006, 2007 年有着明显的降低, 订正效果最好的是 2005 年, 其 RMSE 值为 83.22 mm. SVD 分解法 6 年的 RMSE 平均值为 98.94 mm, 系统误差订正法 8 年的 RMSE 平均值为 101.75 mm, SVD 的 RMSE 平均值比系统误差订正法降低了近 3.0 mm.

综上所述, 利用 SVD 和系统误差订正法分别对 2004—2009 年进行订正, 结果显示, SVD 误差订正方法相对于系统误差订正法, 其预报效果有明显的改进.

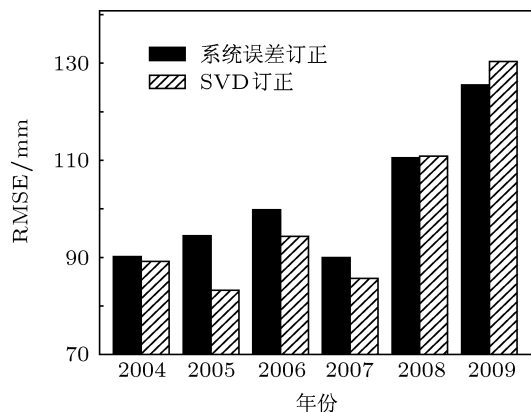


图 8 SVD 订正法和系统误差订正法订正后的 RMSE 对比

### 4.2 2010 年个例回报分析

为了更直观地了解 SVD 订正法对于异常降水的预报能力, 我们以 2010 年作为典型年进行回报分析. 对 1983—2009 年进行了 27 年的交叉回报检验, 也是取前 5 个模态时订正效果最好. 图 9 给出了 2010 年的中国地区夏季降水的实况、系统订正、SVD 订正的距平百分率对比. 从实际降水的距平百分率分布图上可以看出, 总体上在内蒙古地区 (40°N—50°N) 降水量明显低于往年的平均值; 而在全国的中纬度地区 (30°N—40°N) 降水量明显高于往年平均降水量, 形成 2010 年的主雨带; 在南部地区 (20°N—30°N) 降水量和往年平均降水量持平, 从而形成一个由北到南降水量区分比较明显的纬向分布. 从各区域局部来看, 在黑龙江北部、辽宁省、福建省、陕西省以及西北中西部地区呈现不同程度的降水偏多, 局部降水偏多达 5 成左右; 而在内蒙古大部分地区呈现出了降水异常偏少的情况, 局部偏少甚至超过 5 成.

2010 年 SVD 订正法和系统误差订正法的全国 ACC 为 0.23 和 0.19, 而 RMSE 分别为 84.79 mm 和 90.71 mm. 从 SVD 订正法和系统误差订正法对 2010 年全国夏季降水订正得出的结果看, SVD 订正效果好于系统误差订正法, 尤其是在降水异常偏多的地区. 并且 SVD 订正法较准确地预测出中纬度地区 (30°N—40°N) 是 2010 年全国的主雨带.

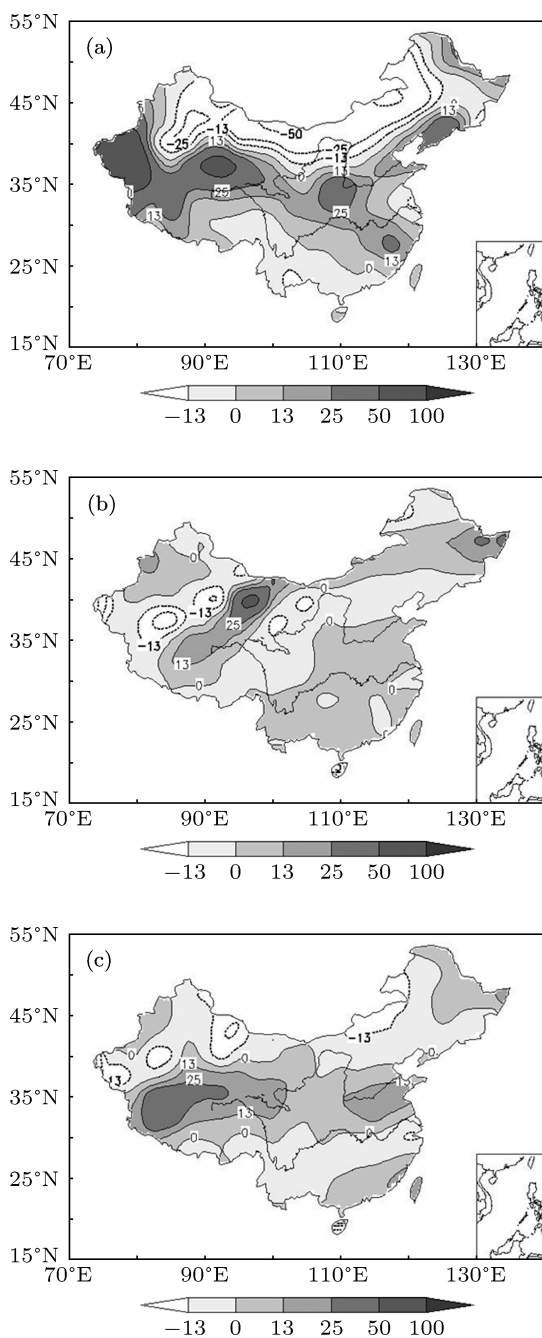


图9 2010年中国夏季降水 (a) 实况, (b) 系统误差订正, (c) SVD 订正的距平百分率对比

从2010年局部地区的订正效果上看, SVD 订正法也有着较好的订正效果. 本文选择我国人口比较密集、经济发展较快的东北地区, 东部沿海地区(华北、华东和华南)以及西南地区三个典型区域进行具体分析. 在东北地区 SVD 订正法和系统误差订正法的 ACC 值分别为 0.72 和 0.005, RMSE 值分别为 54.55 mm 和 77.19 mm. 在东部沿海地区, SVD 订正法和系统误差订正法的 ACC 值分别为 0.16 和 0.11, RMSE 值分别为 71.09 mm 和 63.22 mm. 在西

南地区, SVD 订正法和系统误差订正法的 ACC 值分别为 0.57 和 -0.36, RMSE 值分别为 46.54 mm 和 67.85 mm. 从图 10 可以看出, 在东北和西南地区, SVD 订正法的订正效果无论从 ACC 还是 RMSE 作为评判标准的角度都要比系统误差订正法的效果好得多; 而在东部沿海地区, SVD 订正效果比系统误差订正法效果有所提高, 但不如东北和西南地区那么明显.

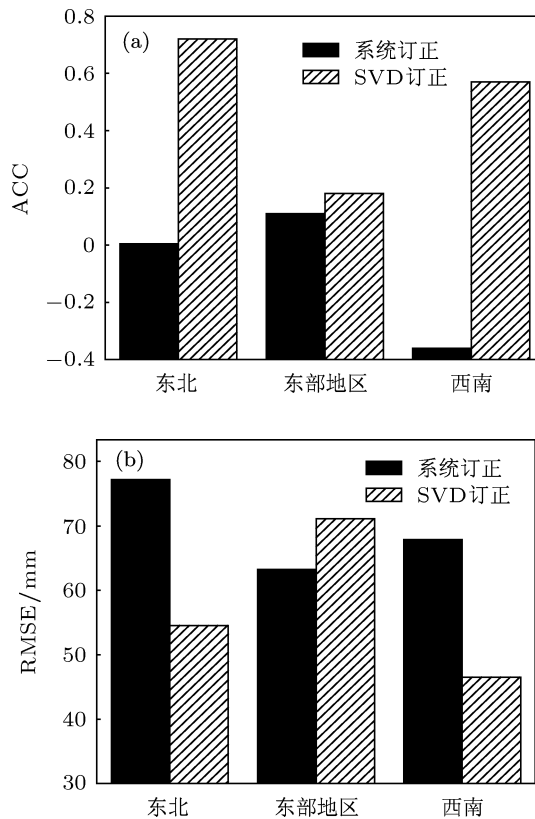


图10 2010年东北、东部沿、西南地区分区订正效果对比 (a) ACC; (b) RMSE

### 5 总结和讨论

本文尝试采用 SVD 方法对 CGCM 模式预报的汛期降水结果进行修正, 对模式预报和实际降水数据的耦合场进行分解, 提取两者相关性最高的前几个模态, 然后采用最小二乘法求出模式降水时间系数矩阵与实况之间的回归系数乘以预报年的时间系数矩阵, 从而得到预报年的降水预报值. 从实际效果来看, 在 2004—2009 年当平均取前 5 个模态的时间系数和空间矩阵得到的订正结果为最优. 选取 2010 年为典型年, 通过 1983—2009 年交叉回报检验将前 5 个模态作为这一年的模态个数从而得到订正结果, 不管从全国范围还是局部地区来看,

SVD 分解法都要明显好于系统误差订正法的订正结果. SVD 分解法的优点在于更好地结合了模式降水和实际降水的信息, 对预报年具有更好的针对性. 从 2004—2009 年的回报结果也可以看出, SVD 订正法对全国的模式夏季降水有一定的改进, 相比于系统误差订正法, 在大多数年份订正效果有明显提高, 并且东部地区的订正效果要优于西部地区.

当然 SVD 订正法也存在一定的不确定性, 在有些年份的订正效果不如系统误差订正法. 系统误差订正法的订正效果更依赖于模式预报的有效信息, 所以在系统误差订正法订正效果好的年份, 说

明模式预报结果的有效信息与当年的实际降水比较符合, 我们可以尝试利用常用的对单个要素场时空分解的正交经验函数 (EOF) 分解法, 对单个模式预报场进行时空分解得出时空场. 再根据 3.2.2 中步骤二、三得出最后的订正结果.

SVD 分解法结合了模式预报场和实际降水场的有效信息, 而 EOF 分解法充分利用了模式预报结果的有效信息与当年的实际降水比较符合的特点, 我们可以尝试将这两种方法结合起来, 形成一个各年份订正效果互补的新方法.

- [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] 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]
- [5] 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]
- [6] 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]
- [7] Wei F Y, Huang J Y 2010 *J. Trop. Meteorol.* **26** 438 (in Chinese) [魏凤英, 黄嘉佑 2010 热带气象学报 **26** 438]
- [8] Ren H L, Chou J F 2007 *Sci. China D* **37** 988 (in Chinese) [任宏利, 丑纪范 2007 中国科学 D 辑 **37** 988]
- [9] 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]
- [10] 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]
- [11] Fan K, Lin M J, Gao Y Z 2008 *Sci. China* **38** 1452 (in Chinese) [范可, 林美静, 高煜中 2008 中国科学 **38** 1452]
- [12] 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]
- [13] Chou J F 2003 *Xinjiang Meteorol.* **26** 1 (in Chinese) [丑纪范 2003 新疆气象 **26** 1]
- [14] Chou J F 1986 *Plateau Meteorol.* **5** 367 (in Chinese) [丑纪范 1986 高原气象 **5** 367]
- [15] Gu Z C 1958 *Acta Meteorol. Sin.* **29** 176 (in Chinese) [顾震潮 1958 气象学报 **29** 176]
- [16] Cao H X 1993 *Sci. China B* **23** 104 (in Chinese) [曹鸿兴 1993 中国科学 B 辑 **23** 104]
- [17] Qiu Z 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]
- [18] Feng G L, Gao X Q, Dong W J, Chou J F 2001 *Adv. Atmosph. Sci.* **18** 701 (in Chinese)
- [19] Ren H L, Chou J F 2005 *Acta Meteorol. Sin.* **63** 988 (in Chinese) [任宏利, 丑纪范 2005 气象学报 **63** 988]
- [20] Zhen 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]
- [21] Wang Q G, Feng G L, Zheng Z H, Zhi R 2011 *Chin. J. Atmos. Sci.* **35** 287 (in Chinese) [王启光, 封国林, 郑志海, 支容 2011 大气科学 **35** 287]
- [22] Xiong K G, Feng G L, Huang J P, Chou J F 2012 *Acta Meteorol. Sin.* **70** 213 (in Chinese) [熊开国, 封国林, 黄建平, 丑纪范 2012 气象学报 **70** 213]
- [23] Yang J, Zhao J H, Zhen Z H, Xiong K G, Shen B Z 2012 *Chin. J. Atmos. Sci.* **36** 11 (in Chinese) [杨杰, 赵俊虎, 郑志海, 熊开国, 沈柏竹 2012 大气科学 **36** 11]
- [24] Chen G Y, Zhao Z G 1998 *Quart. J. Appl. Meteor.* **19** 178 (in Chinese) [陈桂英, 赵振国 1998 应用气象学报 **19** 178]
- [25] Yang J, Wang Q G, Zhi R, Feng G L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 029204 (in Chinese) [杨杰, 王启光, 支容, 封国林 2011 物理学报 **60** 029204]
- [26] 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]
- [27] Shi N 2002 *Weather Research and Forecasting How Far the Analysis Method* (2nd Ed.) (Beijing: Meteorological Press) p129 (in Chinese) [施能 2002 气象科研与预报中的多远分析方法 (北京: 气象出版社) 第 129 页]
- [28] Wei F Y 2007 *Diagnosis and Prediction of Modern Climate Statistics Technology* (2nd Ed.) (Beijing: Meteorological Press) p144 (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 144 页]
- [29] Qin Z Q, Lin Z H, Chen H, Sun Z B 2011 *Acta Meteorol. Sin.* **69** 0289 (in Chinese) [秦正坤, 林朝晖, 陈红, 孙照渤 2011 气象学报 **69** 0289]
- [30] Li F, Lin Z D, Zuo R T, Zeng Q C 2005 *Adv. Climate Change Res.* **10** 658 (in Chinese) [李芳, 林中达, 左瑞亭, 曾庆存 2005 气候与环境研究 **10** 658]

# Error correction on summer model precipitation of China based on the singular value decomposition\*

Su Hai-Jing<sup>1)†</sup> Wang Qi-Guang<sup>2)</sup> Yang Jie<sup>3)</sup> Qian Zhong-Hua<sup>1)3)</sup>

1) (*Physical Science and Technology College of Yangzhou University, Yangzhou 225002, China*)

2) (*Chinese Academy of Meteorological Cadre Training Colleges, Beijing 100081, China*)

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

(Received 29 August 2012; revised manuscript received 22 January 2013)

## Abstract

In this paper, singular value decomposition (SVD) is used to correct the National Climate Center business model CGCM, thus improving the forecast results. By performing the SVD decomposition using field coupling between the summer rainfall patterns forecasted in 1983–2011 and actual rainfall values, by selecting the mode forecast and 3–7 modals that are best correlated with the live precipitation, and comparing these revised results of the different numbers of modal number, and by selecting the number of modals with the best correction effect in the China region, the revised results are obtained from the model predictions. The 2004–2009 cross hindcast experiments and the return results tested by using the anomaly correlation coefficient and the root mean square error as evaluation criterion show that the best corrections are obtained by taking the first five modals in 2004–2009 as the number of modal revised in the year. The examinations of 2004–2009 mode and actual precipitation data demonstrate the correction effect obtained by the five modals is indeed best. A comparison between the result and the systematic errors shows that the Dhamma revised results are better than the systematic errors. Taking the year of 2010 as the forecast year, using the results of the cross-examination of 27 years 1983–2009 to determine the number of modals, and analyzing the forecast results by the determined number of modals constitute a method that has a potential business value.

**Keywords:** singular value decomposition, model forecasts revised, precipitation in flood season

**PACS:** 92.60.Wc

**DOI:** 10.7498/aps.62.109202

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41105055, 40930952), the Major Global Change Research Program (Grant No. 2012CB955902) and the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant Nos. GYHY201006016, GYHY201106015).

† Corresponding author. E-mail: yyjshj6054@126.com