

杨杰, 赵俊虎, 郑志海, 等. 2012. 华北汛期降水多因子相似订正方案与预报试验 [J]. 大气科学, 36 (1): 11–22. Yang Jie, Zhao Junhu, Zheng Zhihai, et al. 2012. Estimating the prediction errors of dynamical climate model on the basis of prophase key factors in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 11–22.

# 华北汛期降水多因子相似订正方案与预报试验

杨杰<sup>1</sup> 赵俊虎<sup>1</sup> 郑志海<sup>2</sup> 熊开国<sup>1</sup> 沈柏竹<sup>1</sup>

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

**摘 要** 本文基于动力—相似预报的基本原理, 在已初步建立的华北汛期降水模式的动态最优多因子组合相似订正方案工作基础上, 研究前期关键因子之间的相互配置对夏季降水的影响, 挑选关键的大气环流预报因子。根据预报年前期气候因子的异常状况, 通过 EOF 压缩自由度进行相似年选取, 进一步构建了基于前期异常信号的汛期降水相似订正预报方案。研究发现, 预报年前期大气环流中异常因子个数的偏多或偏少与该年华北降水的多寡呈现较好的对应关系, 并以异常因子的个数状况作为判断该年是否为异常年的标准, 将异常多因子方案与动态最优多因子方案相结合, 建立模式误差相似订正的多因子综合预报方案。通过诊断分析发现, 该方案对降水异常年有着较好的针对性。2003~2009 年 7 年的独立样本回报结果表明: 该方法进一步提高了模式对华北汛期降水的预报能力, 将华北汛期降水预报的距平相关系数 (ACC) 平均分从系统订正结果的 0.38 提高至 0.61, 具有良好的业务应用前景。

**关键词** 汛期降水 异常因子 模式误差估计 预测

**文章编号** 1006-9895 (2012) 01-0011-12

**中图分类号** P426

**文献标识码** A

## Estimating the Prediction Errors of Dynamical Climate Model on the Basis of Prophase Key Factors in North China

YANG Jie<sup>1</sup>, ZHAO Junhu<sup>1</sup>, ZHENG Zhihai<sup>2</sup>, XIONG Kaiguo<sup>1</sup>, and SHEN Baizhu<sup>1</sup>

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

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

**Abstract** Based on the basic principle of dynamical analogue prediction, the authors have established the optimal dynamic multi-factor schemes to revise prediction errors. In this paper, the authors studied the correlations between the interactions of prophase key factors and the precipitation of rainy season in China and found the key atmospheric circulation predictor. According to the predictors which are abnormal in prophase, the authors compressed the dimensions of the factors to select the similar years through EOF analysis. Furthermore, a new dynamical analogue prediction scheme is constructed, which is based on the anomalous signals of prophase environment field. Analyses show that there is a good corresponding relationship between precipitation in North China and numbers of atmospheric circulation factors which are abnormal in prophase. The authors developed a comprehensive scheme to revise prediction errors of numerical model combined with the abnormal factors scheme and the optimal dynamic multi-fac-

**收稿日期** 2010-11-24, 2010-05-23 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 41105055、40930952, 全球变化重大研究计划 2012CB955902 和公益性行业 (气象) 科研专项 GY-HY201006016、GYHY201106015

**作者简介** 杨杰, 男, 1984 年出生, 博士研究生, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: yangjie19840827@163.com

tor scheme. Through the diagnostic analysis, the authors found that the comprehensive scheme has a good adaptability. Results of independent sample return during 2003–2009 show that the anomaly correlation coefficient (ACC) score has increased from 0.38 to 0.61. The similarity revised method has further improved the prediction capacity of numerical model and has a good application prospect for summer precipitation in North China.

**Key words** summer precipitation, abnormal factors, estimation of model errors, prediction

## 1 引言

汛期是一年中降水最集中、强度最大的时期, 洪涝灾害多在此时期发生, 因此, 汛期预测一直是气象学者重点研究探讨的对象, 也是政府和公众关注的焦点。由于气候系统内部产生的一系列复杂物理过程和非线性相互作用 (李建平和丑纪范, 2003; 王晓娟等, 2009; Zhi et al. 2010), 使得汛期降水的预测困难重重。传统的预测方法都存在一定的缺陷: 天气学方法主要依赖于预报员的主观经验, 统计学方法没有充分利用已知的物理规律, 二者都不能实现真正意义上的非线性预报 (任宏利和丑纪范, 2007)。从发展的角度来看, 要实现定时、定量、客观的非线性预报只能依靠基于数值预报模式的动力学方法。

随着非线性科学的发展, 人们逐渐认识到气候模拟的复杂性 (严华生等, 1999)。数值预报模式虽已取得了长足的发展, 但距完美模式仍相去甚远, 无论怎样发展, 模式中未知误差部分总是客观存在。模式误差的范围比较广, 主要包括模式中时空离散化的截断误差、物理参数化方案的缺陷、计算方案误差、参数不准、动力方程本身缺陷等, 正是由于这些误差的存在, 使得模式本身存在很大的不确定性。丑纪范 (2003a, 2003b) 认为, 就现阶段而言, 解决问题的关键是将动力模式与统计方法有机结合, 取长补短, 通过充分利用历史统计信息达到修正动力模式积分过程中产生的系统性误差的目的。围绕这一问题, 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 (邱崇践和丑纪范, 1989; 黄建平和王绍武, 1991)、基于大气自记忆原理的方法 (曹鸿兴, 1993)、回溯差分格式 (封国林等, 2001; Feng and Dong, 2003; Feng et al., 2004)、物理模型预测技术以及模式后处理等 (范可等, 2007; 范可等, 2008; Wang and Fan, 2009), 大量研究表明动力和统计相结合是现阶段提高短期气候预测准确

率的有效途径。

基于动力—统计相似预报原理, 我们已构建了一种动态最优多因子组合模式误差订正方案, 建立了适用于华北夏季降水的动态相似因子库, 通过独立样本回报检验获取多因子最优化配置方案进行模式误差的相似订正, 以此来提高模式预报水平。然而, 降水有时可能是多种因子共同综合作用的结果, 有时又可能是部分因子甚至是个别因子的异常信号引起的。考虑到前期因子的异常情况往往会对汛期降水有着更好的指示意义, 本文在动态多因子组合相似订正方案基础上, 根据预报年前期因子异常的状况, 筛选大气环流中的关键预报因子进行历史相似信息的选取, 发展了基于前期异常信号的动力模式误差预报方案, 并将该方案与动态最优多因子预报方案进行整合叠加、优势互补, 构建了既包含对降水正常年具有普适性的动态多因子相似订正方案同时又包含对降水异常年具有一定针对性的异常因子相似订正方案的华北汛期降水模式误差订正综合预报模型。在此基础上, 针对华北地区 2003~2009 年的汛期降水进行了实际业务模式的预报试验与诊断分析。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料介绍

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 and 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的 40 项气候指数作为预报因子进行误差场相似年的选取, 考虑到业务应用以及影响因子更新等问题, 将 114 项指数在当年 1、2 月份因子和前一年 3~12 月份的因子作为预测年前期因子, 共  $114 \times 12 = 1368$  个因子。

利用国家气候中心全球气候模式生成的 1983~2010 年共 27 年回报和预报数据资料集, 这里采用 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组合降雨分析 (简称 CMAP) 资料的总降水量作为实况观测资料, 用 27

年模式回报数据中的汛期预报降水场，来计算汛期降水预报误差场，并以 1983~2002 年资料计算气候平均态。

2.2 相似预报方法原理

相似预报方法中，把多年的实际观测资料看成气候动力系统的一系列特解，根据相似的初值条件寻找相应的特解，用于模式误差的预报试验（严华生等，1999）。将每年的模式预报误差变化看作非线性时变系统，虽不知道描述这一系统的具体数学物理模型，但却掌握了它的一系列特解，即多年的实际模式预报误差资料。

在相似的初始场和边界条件下，大气状况的演变往往也是相似的（郑志海等，2009）。因此，对于气候动力系统的任一初值，可考虑使用与之相似的历史实况所提供的模式误差信息代替，把预报场视为在历史相似场上叠加了一个小扰动，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。

相似预报的关键问题在于历史相似的选取，相似性判据是相似程度的度量，相似方法成效在很大

程度上取决于相似性判据选取得是否客观合理。常用的相似性判据主要有相关距离系数、相似系数、距离系数等（阎惠芳等，2003），本文采用距离系数中的欧氏距离作为相似性判据。

3 研究方案

基于相似预报的基本原理，我们首先给出模式误差相似订正综合预报方案的总体流程图（图 1）。

从图 1 中可以看出，在总体的预报方案中采用了两种方法：一为对正常年份具有普适性的动态多因子组合方法，另一为针对前期因子发生异常的降水异常年采用异常因子方法。杨杰等（2011）、王启光等（2011）、Xiong et al（2011）基于相似预报原理，分别从不同的角度构建了华北地区、长江流域、东北地区的动态多因子组合方案并得到了较好的预报效果，本文工作致力于异常因子模式误差相似预报方案的研究，旨在使汛期相似预报方案对异常年更具针对性，能够针对前期的异常信号给出异常预报。这里给出异常因子相似预报思路：

第 1 步（资料集的获取）：根据 CMAP 历年降水资料和模式回报结果得到汛期降水 1983~2009

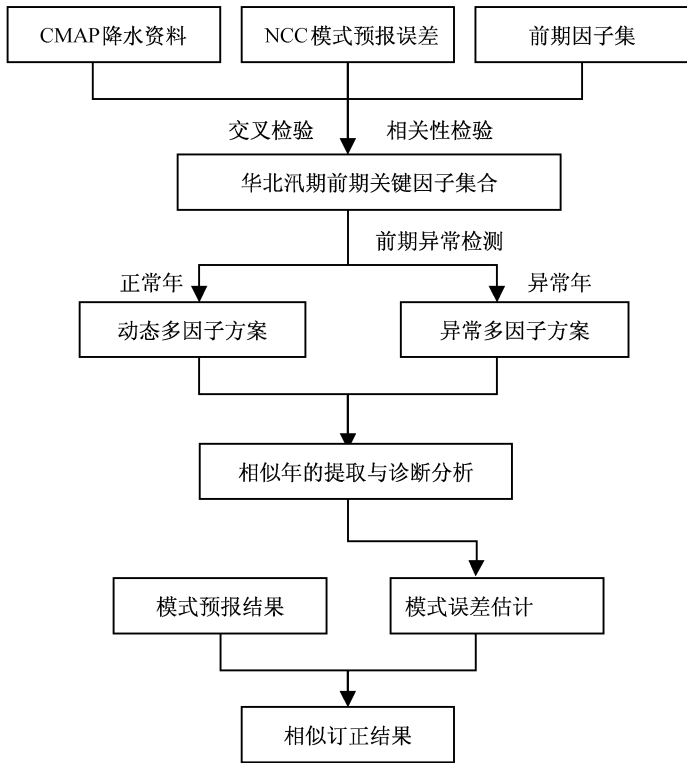


图 1 总体预报方案流程  
Fig. 1 Forecast scheme flowchart

年 27 年的模式预测误差场集合；将 114 项指数在当年 1、2 月份因子和前年 3~12 月份的因子作为预测年前期因子，通过相关系数计算和显著性检验，挑选出与华北地区汛期降水相关较好的因子作为待选因子集；

第 2 步（筛选关键因子）：将筛选出的待选因子集进一步以单因子形式计算欧氏距离系数来作为标准选取相似年对模式结果进行交叉检验相似订正，得到单因子相似误差订正距平相关系数 (ACC) 较高的因子作为前期关键因子集合；

第 3 步（异常年的判断）：对前期关键因子集合进行异常检测，判断是否有因子强度发生异常，并统计异常因子的个数，通过异常因子的个数判断该预报年是否为异常年；

第 4 步（相似年的选取）：将检测出的所有前期异常因子组合，将得到的异常因子组合进行 EOF 分解，以分解出的前 2 个主要模态为标准进行相似年的选取，选取 4 个最相似年进行相似订正；

第 5 步（输出预报结果）：将选取出的相似年的误差场进行集合平均得到预报的误差场，然后进行订正给出预报结果。

## 4 方案设计

### 4.1 华北汛期异常降水

华北地区汛期降水在 1950 年代至 1960 年代中期为多雨期，1960 年代后期降水减少；1970 年代夏季降水相对增多，进入相对多雨期；到了 1980 年代，夏季华北降水量又急剧减少，进入干旱期，

直至 1990 年代中期降水才有所增加，但之后又明显减少（赵声蓉等，2002；周晓霞等，2008）。图 2a 给出了 1983~2009 年 CMAP 降水资料的近 27 年华北地区夏季平均降水量变化。从图 2a 可以看出近 27 年间华北地区汛期干旱年有：1983、1985、1986、1989、1997、1999、2002 年，其中干旱最为严重的是 1997 和 1999 年，华北地区汛期洪涝年有 1988、1990、1994、1995、1996、1998、2003、2004 年，其中最为严重的为 1990 和 1998 年。图 2b 给出了近 27 年历年的国家气候中心气候模式华北地区预报结果误差变化，可以看出实际降水量与模式预报结果存在较大差异并且年际变化也较大，预报效果并不理想，特别是对于降水异常年份，例如 1997、1999 两个严重干旱年，预报误差尤为显著。此外，对比图 2a、b 我们可以看出模式系统性误差与降水的年际变化非常相似，说明模式系统性误差与气候异常之间有很好的相关关系，气候的异常能够在模式系统性误差上较好地表现出来，而这正是我们能够通过气候的异常信号进行模式误差订正的基础。

影响我国降水的因素十分复杂，影响因子多种多样（黄嘉佑等，2004）。大气环流的异常变化是造成我国天气气候异常变化的直接原因（孙燕等，2010；廉毅等，2010），因此，需要寻找对华北汛期旱涝变化有重要影响的前期大气环流场的关键因子及其关键时期。我国华北地区夏季降水与夏季风的强弱有关：夏季风强时降水偏多，反之降水偏少。此外，华北地区夏季降水和当年的 El Niño 也有较

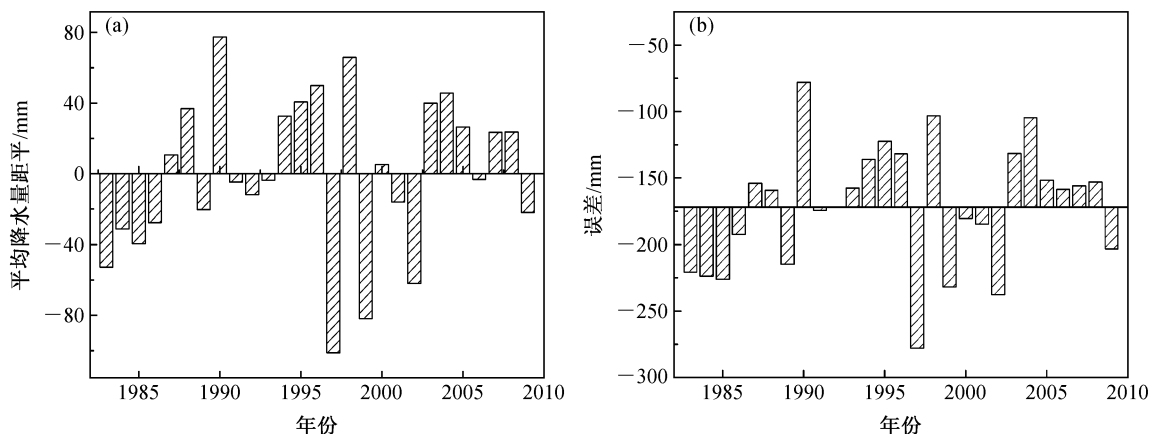


图 2 近 27 年华北地区 (a) 夏季平均降水量距平和 (b) 模式预报误差变化

Fig. 2 The interannual change of (a) average precipitation anomaly in summer and (b) prediction error of numerical model in North China in recent 27 years

好的相关。El Niño 现象导致信风变弱，沿赤道出现西风异常和东亚偏北风异常使得孟加拉湾、南海及西太平洋的大量水汽被输送到长江流域，亚洲季风气流向华北输送的水汽减弱，造成华北夏季降水显著减少而长江流域降水增加（黄荣辉等，1998，1999；黄刚和周文，2006）。大部分 El Niño 年对应着华北地区的降水偏少，但是在 1953 年和 1963 年这两个 El Niño 年，却是华北地区的特大涝年。因此，仅用单个因子来预测华北地区降水的多寡是片面的。

4.2 前期异常信号的提取

图 3a 是近 27 年平均每年前期因子（将 114 项指数在当年 1、2 月份因子和前一年 3~12 月份的因子作为预测年前期因子，共有  $114 \times 12 = 1368$  个因子）发生强度的频次分布，横坐标中的  $\sigma$  表示因子的标准偏差。可以看出因子发生强度的频次分布较好地符合正态分布，且各因子的强度距平的绝对值大于 2 倍标准偏差的发生次数很少，其发生概率较小，因此，我们在判断因子是否发生异常时以  $2\sigma$  为标准，当因子强度距平的绝对值大于  $2\sigma$  时，则将该年因子看作异常因子。从图 3a 中可看出平均每年都会有大概 20~30 个因子强度发生异常，这属于正常情况，并不是只要有异常因子的发生就代表该年为异常年。气候系统的异常往往反映在多个方面上，并导致多个因子强度的异常，因此对于异常年的判断还需要考虑每年发生异常因子的数量。

图 3b、c 分别给出了 1983~2009 前期因子异常偏大和异常偏小的数目，可以看出，每年汛期前期都会有异常因子出现，异常偏大的因子平均每年 30 个左右。近 27 年每年异常偏大的因子个数整体有逐渐增多的趋势，特别是 1998 年和 1999 年，这两年前期异常因子个数的偏多尤为显著，主要是由于这两年前期的气候系统分别出现了非常强的外强迫信号：El Niño 和 La Niña 事件，其导致该年大量的前期因子发生异常。异常偏小的因子平均每年 20 个左右，且整体呈现减小的趋势，其中 1985 年和 2009 年异常偏小的因子个数明显多于其他年份，而这恰好对应华北地区降水异常偏少。

从图 3 中了解到每年异常因子个数的变化，从发生异常的因子数量上我们可以大致了解该年的气候是否存在异常，由于我们是针对华北地区这一小

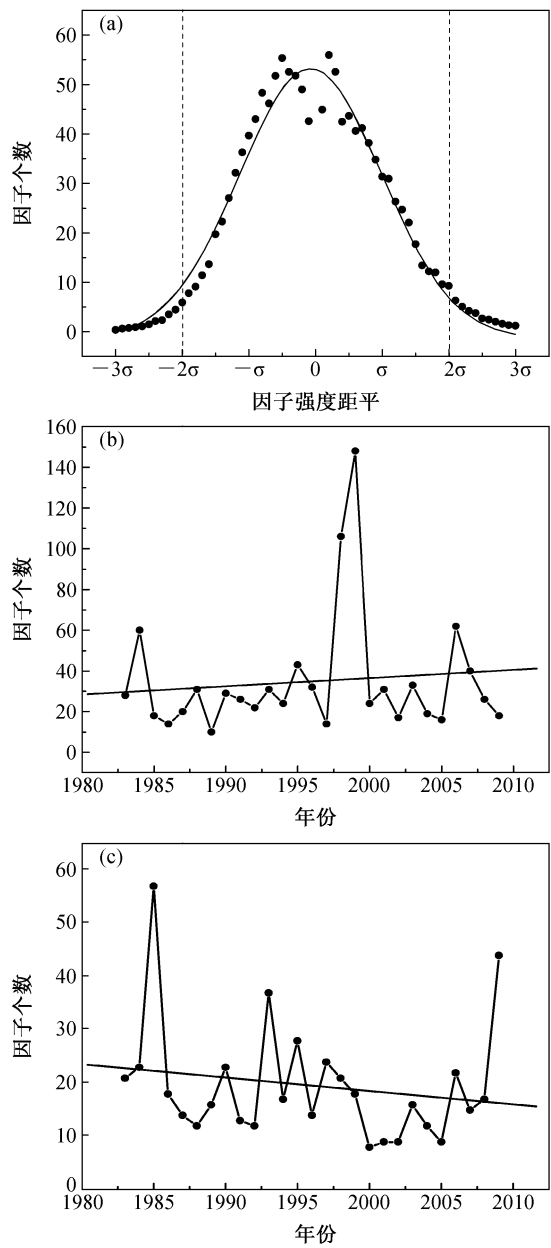


图 3 1983~2009 年 (a) 前期因子强度频次分布、(b) 前期异常偏大因子总数以及 (c) 前期异常偏小因子总数  
Fig. 3 The statistical characteristics of prophase factors from 1983 to 2009: (a) Frequency distribution of prophase factors; (b) numbers of strong prophase factors; (c) numbers of weak prophase factors

区域的汛期降水，有些气候信号的异常并不会影响到华北地区，因此在针对小区域汛期降水的前期异常因子进行甄别时，需要考虑这些因子发生异常是否会影响该区域的汛期降水。我们将近 27 年每年的异常因子进行了相关性检验，剔除与华北地区汛期降水相关性较差的因子，得到影响华北地区汛期

降水的关键异常因子个数的年际变化情况（如图 4 所示）。图 4a 给出了异常偏大的关键因子数，从图中可以看到异常偏大因子个数的变化与图 3 中未经过筛选的异常因子个数变化大致相当，但我们也可以看到在图 3b 中异常最显著的 1998、1999 年前期的总体的异常偏大因子个数是很多的，但是通过相关性检验筛选后，1999 年异常因子个数变得很少，由此可以看出，1999 年前期异常偏大的因子个数虽然很多，但这些因子的异常偏大并不会影响到华北的汛期降水，而 1998 年经过相关性检验后还有很多的异常偏大因子数，因此，该年前期的异常因子大多对华北的汛期降水有较大影响，可以初步判断该年华北汛期降水很有可能为降水异常年，而降水实况也证实该年为华北地区的洪涝年；图 4b 中给出的是经过相似性检验以后的异常偏小的关键因子个数的年际变化，可以看出在图 3c 中的一些异常偏小因子个数偏多的年份经过因子筛选后变成了正常年，如 1995 年，而有些年份经过筛选后则变

成了明显的异常年，例如 1999 年、1989 年，这两个年份中强度异常偏小的因子个数明显高于其他年份，而这两年恰是华北地区汛期降水典型的干旱年。

为了直观地了解前期因子异常与华北降水的对应情况，表 1 给出了前期异常因子个数与华北汛期降水异常的对应情况。其中“+”表示正异常，对于前期因子和降水分别表示异常偏大的因子个数偏多、降水偏多；“-”表示负异常，对于前期因子和降水分别表示异常偏小的因子个数偏多、降水偏少。从表中可以看到除了 1983 年、1994 年、2008 年前期因子异常与华北的降水异常不对应以外，其他年份的前期信号的异常状况与华北汛期降水的多寡有着很好的对应关系。因此，前期异常因子个数的偏多或偏少对华北地区汛期降水具有较好的指示意义，基于此我们将前期异常因子个数的偏多或偏少作为判断该年是否作为降水异常年进行异常相似订正的标准。

表 1 前期异常因子个数的异常与华北地区汛期降水异常

Table 1 Corresponding relationship between the numbers of abnormal prophase factors and the abnormal precipitation in North China

| 年份   | 前期因子 | 降水 | 年份   | 前期因子 | 降水 | 年份   | 前期因子 | 降水 |
|------|------|----|------|------|----|------|------|----|
| 1983 | +    | -  | 1994 | -    | +  | 2002 | -    | -  |
| 1984 | -    | -  | 1995 | +    | +  | 2003 | +    | +  |
| 1985 | -    | -  | 1996 | +    | +  | 2006 | -    | -  |
| 1988 | +    | +  | 1997 | -    | -  | 2007 | +    | +  |
| 1989 | -    | -  | 1998 | +    | +  | 2008 | -    | +  |
| 1992 | -    | -  | 1999 | -    | -  | 2009 | -    | -  |

注：“+”表示正异常；“-”表示负异常。

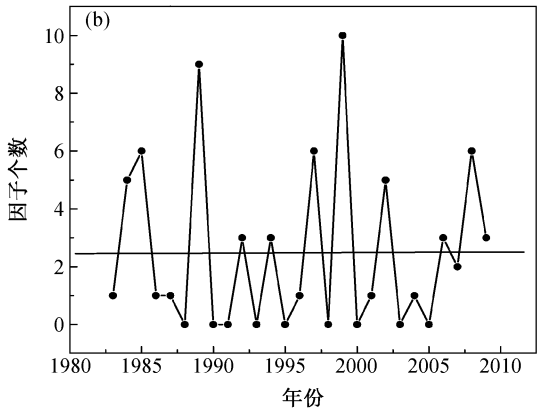
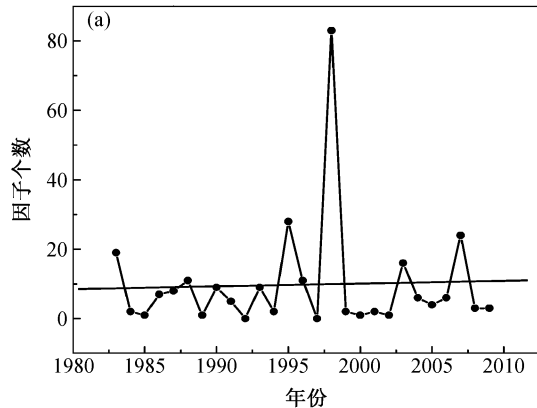


图 4 与华北地区降水相关较好的前期关键因子数：(a) 异常偏大；(b) 异常偏小

Fig. 4 Numbers of (a) strong and (b) weak prophase factors which have good correlations with the precipitation in North China

综上所述，对于华北地区汛期降水的异常，不仅取决于某个单一的因子，往往是多种影响因子共同作用所致，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，可看作该年汛期降水起主导作用的关键因子集。若能通过前期因子的异常状况在历史因子集中找到对应的较为接近的因子异常年份，则可以提取出相应的历史模式误差并对预报年的模式误差进行预报。

4.3 相似年的选取

对预报年前期因子进行检测，由于单个因子并不能完全影响降水的分布状况，需要多个关键因子相互配置，因此，选取出一系列强度异常因子，为了消除多个因子配置时产生的噪声问题以及因子间的自相关导致的误差出现非线性增长，采用经验正交分解（EOF）方法进一步压缩前期环境场的自由度。将异常因子构成的变量场 $\mathbf{X}_{m \times n}$ 进行 EOF 分

解，即

$$\mathbf{X}_{m \times n} = \mathbf{V}_{m \times n} \mathbf{T}_{n \times n}, \tag{1}$$

其中， $\mathbf{V}_{m \times n}$  为空间函数矩阵， $\mathbf{T}_{n \times n}$  为时间系数矩阵。

图 5 给出了 2008 年前期异常因子进行组合后 EOF 分解的前三个模态时间系数年际变化，从图中可以看出，关键异常因子的 EOF 第一模态的时间系数在 2008 年体现了很强的异常信号，而第二模态的时间系数在 2008 年的异常虽没有第一模态表现得那么明显，但也体现了较强的异常。而在第三模态及后面的模态上则没有体现出异常，其他年份情况类似（图略），由此可知，对前期异常因子进行 EOF 后大部分的异常信号都是集中体现在第一模态和第二模态的时间系数上，因此，我们将异常因子组合 EOF 分解后的第一模态和第二模态的时间系数作为相似年的选取依据，以欧氏距离系数作为相似标准进行历史相似年的选取。

图 6a、b 分别给出了异常因子相似订正的 ACC 与均方根误差（RMSE）随选取的相似年个数  $N$  的变化，这里是对 2003~2009 年 7 年独立样本检验 ACC 和 RMSE 的平均值随着相似年个数的变化。总体来讲，ACC 先是随着相似年个数的增加而增大，当相似年个数为 4 时，ACC 最高，当相似年个数大于 4 时，随着相似年个数的增加 ACC 呈明显的减小趋势，RMSE 也呈现出增加趋势，说明随着相似年个数的增加相似订正的效果越来越差，主要是因为采用前期异常因子进行相似选取时，由于异常年份前期异常因子强度很大，使得在历史年中相似的年份较少，因而当相似年个数较少时，可以选

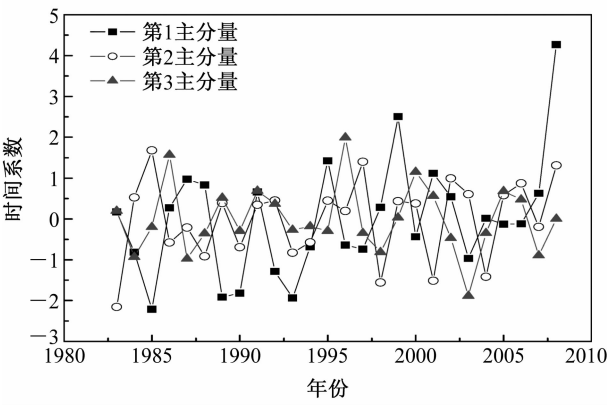


图 5 异常因子 EOF 分解前三个模态时间系数变化  
Fig. 5 The interannual variation of the first three main modes of abnormal factors EOF analysis

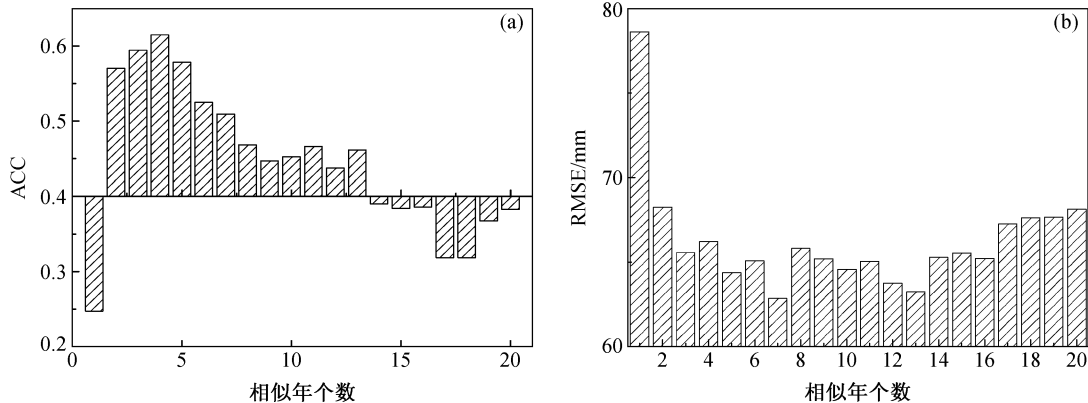


图 6 异常因子相似订正 (a) 距平相关系数、(b) 均方根误差随相似年个数  $N$  的变化  
Fig. 6 Changes of (a) anomaly correlation coefficient (ACC) and (b) root mean square error (RMSE) corrected by dynamical analogue prediction using abnormal factors with similar samples' number

择出与预报年较为相似的异常年,而当相似年的个数不断增加时,筛选出的异常年信息往往会被大部分正常年份的信息所掩盖,失去了对异常年份采取有针对性异常预报的意义,因此在进行异常因子相似订正时相似年个数不宜过多,而只选择一个相似年进行相似订正会有较大的偶然性。综上所述,根据前期异常因子进行相似年选取时,选取 4 个历史相似年进行相似订正的效果最好。

#### 4.4 误差场分析

基于相似年个数对 ACC 影响的敏感性试验,为达到最佳的预报效果,我们在进行相似误差订正时是选取 4 个相似误差场来对预报年的误差场进行估计,然而选取出的相似误差场与实际误差场之间的相似程度以及如何将 4 个相似误差场进行合成都直接影响到相似订正的效果。因此,有必要对选取出的各相似年的误差分布特征进行分析,为了对误差场有直观的了解,这里以 2009 年为典型个例,分析实况的模式误差场和相似年的模式误差场间的关系,探讨相似误差订正效果。

图 7a、b 分别给出了 2009 年华北地区模式预报误差与汛期降水实况的分布特征,通过降水实况可以看出 2009 年华北地区降水整体呈现北少南多的带状分布特征,整个华北北部较常年偏旱,部分地区甚至呈现很强的降水负异常,而南部地区降水量为正常略偏多,在山东半岛地区呈现较强的降水正异常。模式误差的分布与降水实况较为相似,总体也表现为北负南正的分布特征,模式误差在华北北部也出现了很强的负异常信号,而在东南部的降水正异常信号在模式误差的分布特征中也有较好的反映,且通过对比可以看到异常信号在模式误差的分布中表现得更为显著,这也再次印证了模式误差异常与气候异常之间有着较好的对应关系,是我们进行异常相似订正的基础。

图 8 是针对 2009 年前期异常信号选取出的 4 个相似年(2000、2001、2008、1984 年)的误差场分布特征。2009 年的误差场在华北北部为很强的负异常而在华北东南部则表现为较强的正异常,我们首先分析这些较为重要的异常信号是否能够在筛选出的相似年误差场中有所反映,通过对比发现,华北北部在 2000 年、2001 年、1984 年 3 个相似年中误差场均表现为很强的负异常信号,而对于华北东南部的误差正异常在 2000 年、2001 年、2008 年

这 3 个相似年中也有着较好的反映,由此看出预报年中的误差异常信号可以在相似年中能够找到很好的对应。

其次,分析相似年与预报年之间的相似程度,通过比较 4 个相似年之间的分布特征发现,2000 年、2001 年、1984 年 3 个相似年具有较为相似的分布特征,这 3 个相似年误差场与 2009 年误差场除了在小部分地区有所差异外,总体分布特征有着较好的一致性,而 2008 年误差场虽然与这 3 个年份相似程度相对较低,但比较 2008 年与 2009 年的误差场可以发现两者仍然具有较好的相似性,这是因为 2008 和 2009 年的相似性与其他相似年相比是体现在不同区域上的。由此可知,相似年之间的相似程度并不能代表该相似年与预报年之间的相似程度。相似年分布特征不可能完全与预报年一致,通过进一步比较发现,对于预报年中华北地区的各个小区域,例如西北部、东南部等,在 4 个相似年中至少有 3 个相似年能够与其分布特征有着较高的相似性特征。4 个相似年的预报效果在不同的小区域上是不同的,由于 4 个相似年中至少 3 个年份对其有较好的相似性,弥补了个别年份的差异,已起到了类似加权的作用,因此,我们这里对 4 个相似年采用等权重取平均的方法合成最终的预报误差场。

图 9 给出了 4 个相似年合成后的 2009 年误差场以及降水场分布,对比图 7a、b 中的降水及模式预报误差可以看出,通过相似订正后的误差场和降水分布很好地预报出了实况降水北少南多的带状分布特征,并且对于模式误差和实际降水中的异常信号都有较好的体现,只是在强度和范围上有所出入,总体而言达到了很好的预报效果。

#### 4.5 独立样本回报

为了检验异常因子相似订正方案对于模式误差的订正效果,利用该方案对 2003~2009 年进行了独立样本回报检验(图 10)。图 10a、b 分别是独立样本回报的华北地区汛期降水系统误差订正和相似误差订正的 ACC 以及 RMSE,从图中可以看出,相似误差订正的结果要明显优于系统误差订正结果,在系统误差订正的基础上有了很大的提高。近 7 年独立样本的系统订正平均 ACC 为 0.38,而异常因子相似订正将平均 ACC 提升至 0.61,相比提高了 0.23,计算 7 年系统订正 ACC 的标准偏差为 0.28,而相似订正 ACC 的标准偏差为 0.23,说明

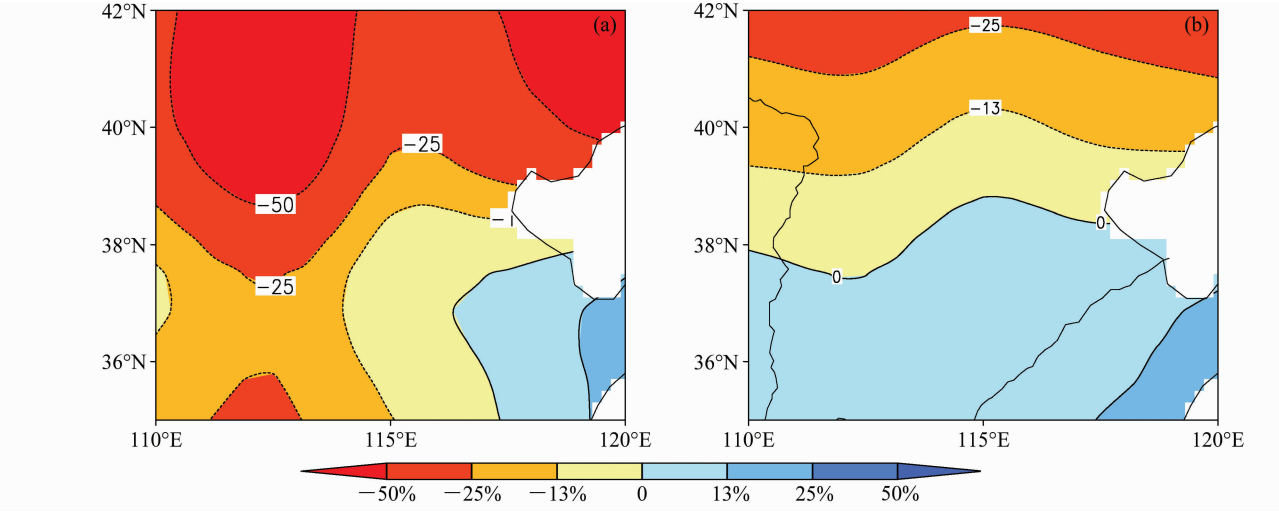


图 7 2009 年汛期实际降水及模式误差场距平百分率：(a) 模式误差；(b) 降水实况

Fig. 7 The precipitation anomaly percentage in the rainy season of 2009: (a) Prediction errors; (b) observed precipitation

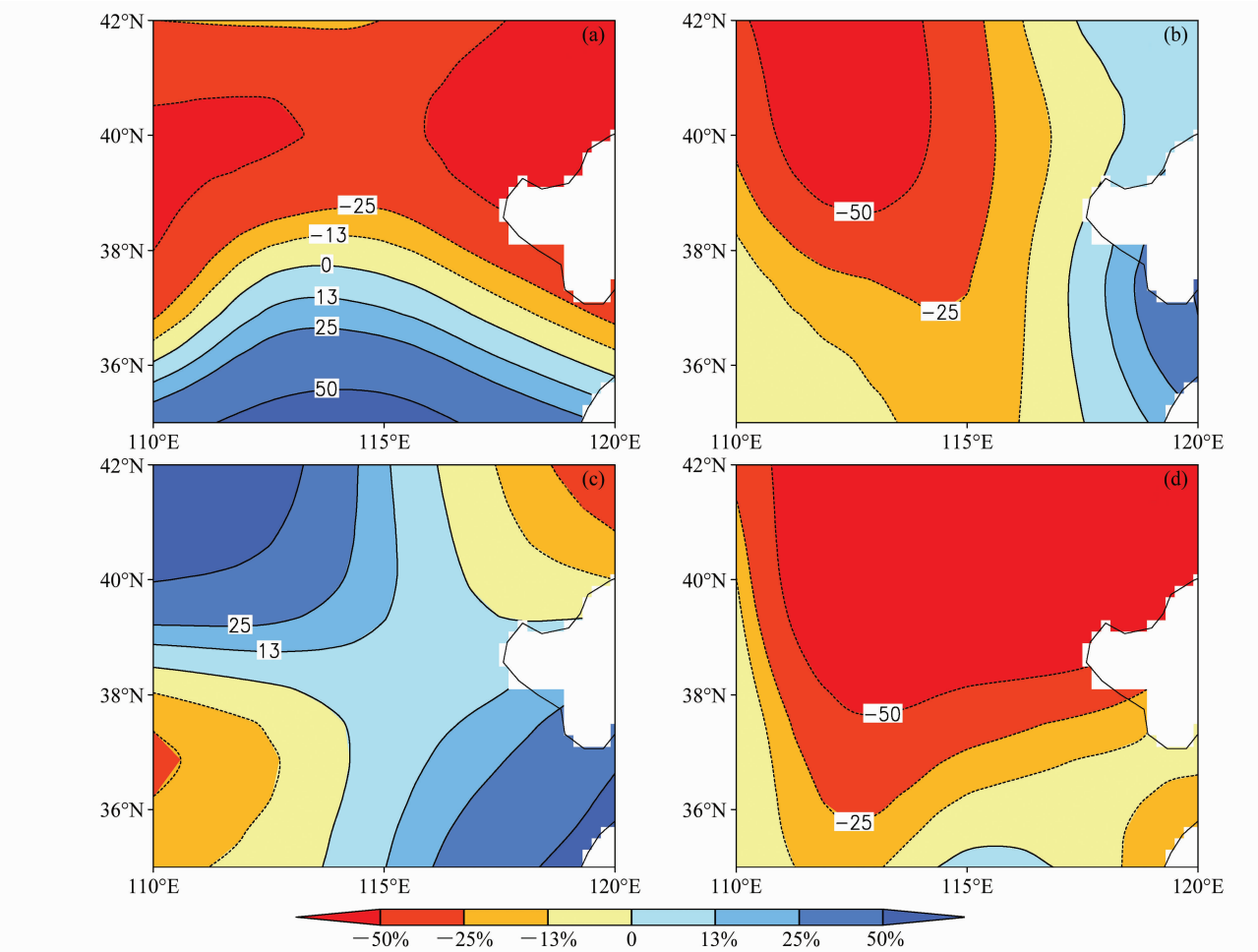


图 8 2009 年的相似误差距平百分率：(a) 2000 年；(b) 2001 年；(c) 2008 年；(d) 1984 年

Fig. 8 The anomaly percentage fields of prediction errors for similar years (a) 2000, (b) 2001, (c) 2008, and (d) 1984

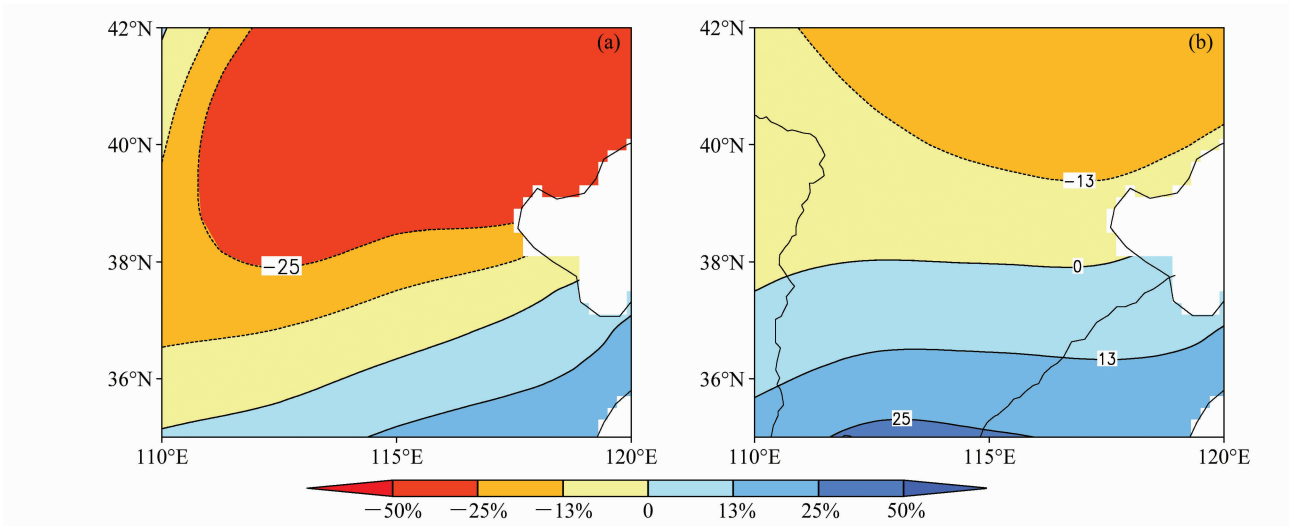


图 9 2009 年相似订正结果: (a) 模式误差场; (b) 降水场

Fig. 9 Predictions of rainy season in 2009 using dynamical analogue estimating method: (a) Anomaly field of model errors; (b) anomaly field of precipitation

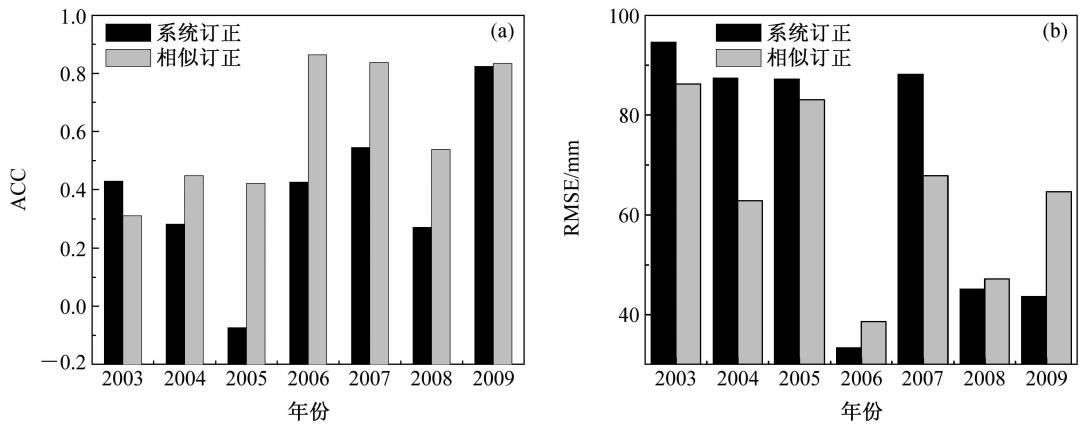


图 10 2003~2009 年独立样本回报: (a) 距平相关系数; (b) 均方根误差

Fig. 10 Results of independent sample return during 2003–2009: (a) ACC; (b) RMSE

相似订正 ACC 的年际变率相对较小, 相似预报结果相较系统订正结果更为稳定, 能够保持每年都有较高的预报准确率。对于图 10b 中的均方根误差而言, 相似订正效果较系统订正总体也有一定的提高。基于异常因子的相似订正方法能够稳定且显著地改善模式预报的准确率。

### 5 结论

本文在已构建的华北汛期降水模式的动态最优多因子组合相似订正方案工作基础上, 提出了针对异常年进行异常预报的思路, 建立了基于预报年前期因子异常的汛期降水相似订正预报方案, 并将此方案与动态多因子方案结合形成多因子综合预报方

案, 提高华北地区汛期降水预报水平。主要结论如下:  
对近 27 年前期因子的异常状况统计分析发现, 异常因子个数的偏多或偏少与预报年的降水异常存在很高的一致性, 可作为异常年的判断标准。通过相关性检验筛选前期关键异常因子形成影响华北地区汛期降水的关键异常因子集。对前期异常因子 EOF 压缩自由度后发现其异常信号主要体现在第 1 模态和第 2 模态的时间系数上, 以这 2 个模态时间系数作为相似年的选取依据, 以欧氏距离系数为标准进行历史相似年的选取。ACC 敏感性试验以及相似年误差场分析表明, 相似年与预报年之间有着较好相似性, 选取 4 个相似年进行等权重集合平均能够较好地反映出预报年的整体误差分布特征以及

误差场的异常信号。7 年的独立样本检验结果显示, 异常因子方案将 7 年的平均 ACC 从系统订正的 0.38 提高至 0.61, ACC 标准偏差从 0.28 降低至 0.23, 提高了其预报稳定性及其准确率, 且能够针对降水异常年给出异常预报, 改善华北地区汛期降水的预报水平。

## 参考文献 (References)

- 曹鸿兴. 1993. 大气运动的自忆性方程 [J]. 中国科学 (B 辑), 23 (1): 104–112. Cao Hongxing. 1993. The equations of atmospheric self-memorial [J]. Science in China (Ser. B) (in Chinese), 23 (1): 104–112.
- 丑纪范. 2003a. 短期气候预测的现状、问题与出路 (一) [J]. 新疆气象, 26 (1): 1–4. Chou Jifan. 2003. Short term climatic forecast: Present condition, problems and way out [J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology (in Chinese), 26 (1): 1–4.
- 丑纪范. 2003b. 短期气候预测的现状、问题与出路 (二) [J]. 新疆气象, 26 (2): 1–5. Chou Jifan. 2003. Short term climatic forecast: Present condition, problems and way out [J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology (in Chinese), 26 (2): 1–5.
- 范可, 林美静, 高煜中. 2008. 用年际增量方法预测华北汛期降水 [J]. 中国科学 (D 辑), 38 (11): 1452–1459. Fan K, Lin M J, Gao Y Z. 2008. Forecasting the summer rainfall in North China using the year-to-year increment approach [J]. Science in China (Ser. D), 52: 532–539.
- 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 [J]. 科学通报, 52 (24): 2900–2905. Fan K, Wang H J, Choi Y J. 2007. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of Yangtze River valley summer rainfall [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (24): 2900–2905.
- 封国林, 曹鸿兴, 魏风英, 等. 2001. 长江三角洲汛期预报模式的研究及其初步应用 [J]. 气象学报, 59 (2): 206–212. Feng Guolin, Cao Hongxing, Wei Fengying, et al. 2001. On area rainfall ensemble prediction and its application [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (2): 206–212.
- Feng G L, Dong W J. 2003. Evaluation of the applicability of a retrospective scheme based on comparison with several difference schemes [J]. Chinese Physics B, 12: 1076–1086.
- Feng G L, Dong W J, Jia X J. 2004. Application of retrospective time integration scheme to the prediction of torrential rain [J]. Chinese Physics Letters, 13: 413–422.
- 黄刚, 周文. 2006. 华北夏季降水气候场的主分量逐步回归预报模型 [J]. 气候与环境研究, 11 (3): 296–301. Huang Gang, Zhou Wen. 2006. PCA stepwise regression forecasting model of climatic field of North China summer rainfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 296–301.
- 黄嘉佑, 刘炯, 赵昕奕. 2004. 副高、极涡因子对我国夏季降水的影响 [J]. 大气科学, 28 (4): 517–526. Huang Jiayou, Liu Ge, Zhao Xinyi. 2004. The influence of subtropical high indexes and polar vortex indexes on the summertime precipitation in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (4): 517–526.
- 黄建平, 王绍武. 1991. 相似—动力模式的季节预报试验 [J]. 中国科学 (B 辑), 21 (2): 216–224. Huang Jianping, Wang Shaowu. 1991. The experiments of seasonal prediction using the analog-dynamical model [J]. Science in China (Ser. B) (in Chinese), (2): 216–224.
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象, 18 (4): 456–476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 456–476.
- 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 1998. 夏季东亚季风水汽输送特征及其与南亚季风水汽输送的差别 [J]. 大气科学 22 (4): 460–469. Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (4): 460–469.
- 李建平, 丑纪范. 2003. 非线性大气动力学的进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 653–673. Li Jianping, Chou Jifan. 2003. Advances in nonlinear atmospheric dynamics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 653–673.
- 廉毅, 布和朝鲁, 谢作威, 等. 2010. 初夏东北冷涡活动异常与北半球环流低频变化 [J]. 大气科学, 34 (2): 429–439. Lian Yi, Bueh Cholaw, Xie Zuowei, et al. 2010. The anomalous cold vortex activity in Northeast China during the early summer and the low frequency variability of the northern hemispheric atmosphere circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 429–439.
- 邱崇践, 丑纪范. 1989. 天气预报的相似—动力方法 [J]. 大气科学, 13 (1): 20–28. Qiu Chongjian, Chou Jifan. 1989. The of analogic-dynamical method of forecasting weather [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 13 (1): 20–28.
- 任宏利, 丑纪范. 2007. 数值模式的预报策略和方法研究进展 [J]. 地球科学进展, 22 (4): 376–385. Ren Hongli, Chou Jifan. 2007. Study progress in prediction strategy and methodology on numerical model [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (4): 376–385.
- 孙燕, 朱伟军, 王谦谦, 等. 2010. 华北夏季降水异常的变化及其与大气环流的联系 [J]. 大气科学学报, 33 (1): 67–73. Sun Yan, Zhu Weijun, Wang Qianqian, et al. 2010. Spatial/temporal variations of summer precipitation anomalies in North China and their relations to atmospheric circulation [J]. Trans. Atmos. Sci.

- (in Chinese), 33 (1): 67–73.
- Wang H J, Fan K. 2009. A new scheme for improving the seasonal prediction of summer precipitation anomalies [J]. *Wea. Forecasting*, 24: 548–554.
- 王启光, 封国林, 郑志海, 等. 2011. 长江中下游汛期降水优化多因子组合客观定量化预测研究 [J]. *大气科学*, 35 (2): 287–297.
- Wang Qiguang, Feng Guolin, Zheng Zhihai, et al. 2011. The study of the objective and quantifiable forecasting based on optimal factors combinations in precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (2): 287–297.
- 王晓娟, 龚志强, 周磊, 等. 2009. 温度关联网稳定性分析 I——极端事件的影响 [J]. *物理学报*, 58 (9): 6651–6658.
- Wang Xiaojuan, Gong Zhiqiang, Zhou Lei, et al. 2009. Analysis of the stability of temperature networks Part I—The influence of extreme events [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 58 (9): 6651–6658.
- Xiong Kaiguo, Feng Guolin, Huang Jianping, et al. 2011. Analogue–dynamical prediction of monsoon precipitation in Northeast China based on dynamic and optimal configuration of multiple predictors [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 25 (3): 316–326.
- 杨杰, 王启光, 支蓉, 等. 2011. 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 [J]. *物理学报*, 60 (2): 029204.
- Yang Jie, Wang Qiguang, Zhi Rong, et al. 2011. Dynamic optimal multi-indexes configuration for estimating the prediction errors of dynamical climate model in North China [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 60 (2): 029204.
- 阎惠芳, 李社宗, 黄跃青, 等. 2003. 常用相似性判据的检验和综合相似系数的使用 [J]. *气象科技*, 31 (4): 211–215.
- Yan Hui-fang, Li Shezong, Huang Yueqing, et al. 2003. Tests for conventional similarity criteria and application of composite similar coefficient [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 31 (4): 211–215.
- 严华生, 曹杰, 谢应齐, 等. 1999. 降雨年际气候变化的非线性动力统计模拟预测 [J]. *气象学报*, 57 (4): 502–509.
- Yan Hua-sheng, Cao Jie, Xie Yingqi, et al. 1999. Nonlinear dynamical/statistical simulation and prediction of interannual climatic evolution in rainfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 57 (4): 502–509.
- 赵声蓉, 宋正山, 纪立人. 2002. 华北汛期降水与亚洲季风异常关系的研究 [J]. *气象学报*, 60 (1): 68–75.
- Zhao Shengrong, Song Zhengshan, Ji Liren. 2002. Study on the relationship between the anomalies of rainfall over North China and the Asian monsoon anomalies [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 60 (1): 68–75.
- 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 [J]. *物理学报*, 58 (10): 7359–7367.
- Zheng Zhihai, Ren Hongli, Huang Jianping. 2009. Analogue correction of errors based on seasonal climatic predictable components and numerical experiments [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 58 (10): 7359–7367.
- Zhi Rong, Feng Guolin, Gong Zhiqiang, et al. 2010. Spatio-temporal correlation analysis of global temperature based on the correlation matrix theory [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 24 (2): 150–162.
- 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 2008. 影响华北汛期降水的水汽输送过程 [J]. *大气科学*, 32 (2): 345–357.
- Zhou Xiaoxia, Ding Yi-hui, Wang Panxing. 2008. Features of moisture transport associated with the precipitation over North China during July–August [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 345–357.