

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量化预测研究 [J]. 大气科学, 35 (2): 287–297. Wang Qiguang, Feng Guolin, Zheng Zhihai, et al. 2011. A 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.

长江中下游汛期降水优化多因子组合客观 量化预测研究

王启光¹ 封国林^{2,3} 郑志海² 支蓉²

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

3 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

摘 要 针对长江中下游区域汛期降水模式预报误差, 利用历史资料的有用信息订正模式预报误差。根据国家气候中心预测室提供的 74 项环流特征量和美国国家海洋和大气管理局发布的 40 项气候指数, 确定降水预报误差场的相似年份, 利用相似年的降水误差场对模式结果进行相似误差订正, 有别于传统的模式系统误差订正。研究发现, 相似误差订正效果明显优于系统误差订正。在此基础上, 对前期因子进行筛选, 确定相似误差场的多因子优化组合, 并结合加权集合平均的方法, 提出了基于优化多因子组合的客观量化预测 (OQF) 技术。2003~2009 年 7 年的独立样本回报结果表明, 基于优化多因子组合的 OQF 方案具有较高的预报技巧, 平均距平相关系数为 0.43。最后对历史资料中误差场间的距平相关系数进行分析, 发现确定误差场相似年的关键技术还有待于进一步完善, 并指出了改进方法的可能途径。

关键词 客观量化预测 优化多因子组合 长江中下游汛期降水 模式预报误差

文章编号 1006-9895 (2011) 02-0287-11

中图分类号 P426

文献标识码 A

A 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

WANG Qiguang¹, FENG Guolin^{2, 3}, ZHENG Zhihai², and ZHI Rong²

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

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

3 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract A new approach to improve precipitation in the Yangtze River in summer by using the useful historical data is suggested. The outcomes of the model can be improved by determining the years in which there are similar prediction error fields of precipitation based on 74 circulation characteristic indexes of Weather Diagnostic Forecasting

收稿日期 2010-05-18, 2010-08-12 收修定稿

资助项目 公益性行业科研专项 GYHY200806005、GYHY201106016, 国家自然科学基金资助项目 40875040、40930952、41005041, 国家科技支撑计划 2007BAC29B01、2009BAC51B04

作者简介 王启光, 男, 博士研究生, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: photon316@163.com

通讯作者 封国林, E-mail: fenggl@cma.gov.cn

Room of National Climate Center and 40 climate indexes of NOAA, and then the fields are integrated to revise the output errors of the model. The results show that the revised errors using the above method are better than system ones. On the basis of the above conclusions, the objective and quantifiable forecasting (OQF) technique can be established. The steps are selecting pre-factors, determining optimal factor combinations (OFC) of the analogy forecasting error fields, and using the method of weighted average integration. It shows that the technique of OQF based on OFC has a better prediction skill to the regression results of independent samples between 2003 and 2009. Finally, the anomaly correlation coefficient (ACC) of historical data in the error field is analyzed. It is found that the determining of the analogy error field in different years can be improved more, and the possible way to improve is to be discussed.

Key words objective and quantifiable forecasting, optimal factors combinations, the precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer, the error of model forecast

1 引言

夏季旱涝异常分布对国民经济特别是对农业生产影响极大,是中央领导和各级政府极为关注的重要问题,也是众多气象学家长期以来研究的主要科学难题。中国汛期降水一个非常显著的特点是年际变化大,影响因素多种多样,特别是长江中下游地区,影响因素更为复杂多变,汛期降水有时可能是部分因素甚至是个别因素起主要作用,有时又可能是多种因素共同作用的结果。因此,长江中下游地区汛期降水预测具有很大的挑战性,这一科学难题吸引了众多科学家参与,几十年来取得了一系列研究成果。早在 20 世纪 50 年代,以陶诗言等(1958)为代表的气象学家从东亚大气环流和天气过程的变化角度研究长江流域的汛期降水,指出长江中下游汛期降水是亚洲大气环流季节变化的典型表现。20 世纪 80 年代,陈隆勋(1984)、Tao and Chen(1987)进一步提出,东亚夏季风系统内存在热带辐合带和长江中下游汛期降水锋带。海温变化尤其是 ENSO 事件作为大气环流变化的背景场,对长江中下游夏季降水有较为重要的影响。黄荣辉和孙凤英(1994)研究表明,热带西太平洋和赤道中、东太平洋海温异常偏低,致使菲律宾周围的热带西太平洋对流活动很弱,从而造成副热带高压偏南。吴国雄和刘还珠(1995)的研究表明,长江中下游的旱涝与中国近海海温(南海、印度洋等)关系密切。最近,Zhou and Wang(2006)研究了北半球春季 Hadley 环流对长江流域夏季降水的可能影响,指出春季 Hadley 环流变化可以激发印度洋和南海海表温度异常,该异常从春季一直持续到夏季,反过来引起东亚夏季环流异常,进而影响到长江流域夏季降水。范可(2006)研究表明,北半球春季正的

南极涛动有利于长江中下游降水,在春、夏两季中,南半球在整个对流层中持续异常增温,季风推动力减弱,长江中下游易出现涝年。Sun et al.(2009)对南极涛动作用机制进行了深入研究,揭示了北半球春季南极涛动对夏季西太平洋副热带高压(下称西太副高)的可能影响途径。刘芸芸和丁一汇(2009)分别从时间和空间角度分析了西北太平洋夏季风与中国长江流域夏季降水的联系,发现二者存在显著的负相关关系。鲍名(2009)从中期天气过程的角度分析了近八年不利于长江中下游梅雨的主要因子。目前面临的主要问题是:影响长江中下游区域汛期旱涝的影响因子众多,如何利用这些多因子优化组合来提高该地区汛期降水的预报水平?

当前的相关研究表明,动力和统计相结合是提高短期气候预测准确率比较有效的途径之一(Barnett and Preisendorfer, 1978; Chao et al., 1982; Huang et al., 1993; van den Dool, 1994)。围绕两者如何有效结合的问题,国内外开展了广泛的研究,如集合预报技术、物理模型预测技术以及模式后处理等(范可等, 2007, 2008; Wang and Fan, 2009; 柯宗建等, 2009; 庄照荣等, 2010)。其中,在气候模式预报基础上结合物理统计方法,利用历史资料信息对模式误差进行预报是引人注目的研究方向。顾震潮(1958)早在 1958 年就提出将数值预报从初值问题改为演变问题,指出了数值天气预报中使用历史资料的重要性和可行性;丑纪范(1974, 1986)从理论上探讨了在长期预报中实现动力和统计相结合的做法;曹鸿兴(1993)提出一种基于大气自记忆原理的方法,从而把大气运动方程推广为包含多时次观测的自忆性方程;封国林等(2001)、Feng and Dong(2003)、Feng et al.(2004)提出了一种回溯阶差分格式方法,给出了由过去时次

资料动态求取记忆函数的方法;任宏利和丑纪范(2005, 2007a, 2007b)、任宏利等(2006)和郑志海等(2009)提出和发展了一种适用于动力季节预测的相似误差订正方法,预报结果显示该方法能有效提高热带降水和环流的预报技巧。但是对于长江中下游地区汛期降水而言,其预测水平有待进一步提高。

本文基于历史相似信息对动力模式的误差进行预报的思路,采用优化多因子组合的方式确定相似误差场,进一步发展了相似误差的提取技术。同时基于3种不同多因子优化组合选取相似误差场,并进行加权集合平均处理,提出了客观量化预测(Objective and Quantifiable Forecasting, 简称OQF)方法。该方法从数值预报模式出发,以推导出的动力相似预报方程作为理论依据,将日益丰富的历史资料相似信息有效地运用到不断完善的数值模式中,利用已知的历史相似信息估计当前未知的模式预报误差。采用多个前期因子综合判断历史相似,选取了具有针对性的历史相似年,在不改变动力模式框架的基础上,有效地改进了模式的预测效果。利用该方法对长江中下游地区(27.5°N~32.5°N, 110°E~122.5°E) 2003~2009年共7年的汛期降水进行了独立样本回报试验,结果表明该方法可以明显改善汛期降水预测效果,最后指出了OQF方法可能的改进思路。

2 资料和方法

2.1 资料介绍

利用国家气候中心(NCC)全球气候业务模式生成的1983~2009年共27年回报和预报数据资料集,选用2月底起报的48个初始场每年6~8月集合平均结果。将美国气候预报中心组合降雨分析(CMAP)资料的总降水量作为实况观测资料(本文研究区域包含18个格点),结合27年模式回报数据中的汛期预报降水场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。利用国家气候中心气候系统诊断预测室提供的74项环流特征量以及美国国家海洋和大气管理局(NO-

AA)发布的40项气候指数作为因子选取误差场相似年。本文独立样本回报指的是在不包含预报年及其以后年份资料信息前提下所进行的回报检验。

2.2 相似误差订正原理

大气数值预报模式可以简化表示为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Psi}{\partial t} + L(\Psi) = 0, \\ \Psi(x, t_0) = \Psi_0(x), \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\Psi(x, t)$ 为模式预报变量, x 和 t 分别表示空间坐标和时间, L 是 Ψ 的微分算子, 对应于实际的数值模式。 t_0 为初始时刻, Ψ_0 为初值。

长期业务预报的经验表明, 在相似的初始场和边界条件下, 大气状况的演变在一定的尺度范围内也具有一定的相似性(任宏利和丑纪范, 2007a)。因此, 在相似动力模式中可以将当前的预报场 Ψ 看成是历史相似 $\tilde{\Psi}$ 加上一个小扰动 $\hat{\Psi}$, 即 $\Psi = \tilde{\Psi} + \hat{\Psi}$ 。将历史参考态 $\tilde{\Psi}$ 代入式(1), 有:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial t} + L(\tilde{\Psi}) = E(\tilde{\Psi}), \\ \tilde{\Psi}(x, 0) = \tilde{\Psi}_0(x), \end{cases} \quad (2)$$

其中, E 为模式的误差算子。式(2)结合式(1)经过一系列变换(郑志海等, 2009), 得到模式预报结果为:

$$\hat{P}(\Psi_0) = P(\Psi_0) + \check{P}(\tilde{\Psi}_j) - P(\tilde{\Psi}_j), \quad (3)$$

其中, $\hat{P}(\Psi_0)$ 为进行误差项相似估计的情况下所得到的预报结果, $P(\Psi_0)$ 为数值预报模式对当前初值 Ψ_0 的预报结果, $\check{P}(\tilde{\Psi}_j)$ 为历史相似对应的实况, $P(\tilde{\Psi}_j)$ 为历史相似初值的预报结果。该方程的本质是引入历史相似对应的预报误差信息来估计当前的预报误差, 即式(3)右端的 $\check{P}(\tilde{\Psi}_j) - P(\tilde{\Psi}_j)$, 从而减小数值模式误差, 将动力预报问题转化为预报误差的估计问题。

2.3 检验标准

本文回报结果采用WMO推荐的标准化检验方案, 利用常用的距平相关系数(ACC)和均方根误差(RMSE)。考虑到沿纬圈的情况, ACC计算标准如下:

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

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

$$\begin{cases} M_f(j) = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} [F(i, j) - C(i, j)], \\ M_a(j) = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} [A(i, j) - C(i, j)]. \end{cases} \quad (5)$$

考虑纬度订正后的 ACC 值为

$$Q = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^N P(j) \cos \theta_j, \quad (6)$$

其中, $K = \sum_{j=1}^N \cos \theta_j$, 对高斯纬圈而言, θ_j 为高斯纬度. ACC 是预报的气候距平与实况的气候距平之间位相误差的度量, 当两距平之间位相完全相同或相反, ACC 评分为 1 或 -1.

第 j 纬圈上的 RMSE 值为

$$R(j) = \sqrt{\frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} [F(i, j) - A(i, j)]^2}, \quad (7)$$

其中, $R(j)$ 为 RMSE 的值. 考虑纬度订正后总的 RMSE 值为

$$R = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^N R(j) \cos \theta_j, \quad (8)$$

RMSE 越小, 表示模式的预报效果越好, 当预报值与实况完全一致时其值为 0.

3 相似误差订正方法的改进

3.1 单因子相似误差订正

本文首先尝试从相关系数的角度入手, 选取合适的前期因子进行相似误差订正. 基于第 2 节相似误差订正原理, 利用国家气候中心预测室提供的 74 项环流特征量和 NOAA 的 40 项气候指数进行相似降水误差场的选取. 首先, 将降水误差场进行经验正交 (EOF) 分解 (黄嘉佑, 1990; 施能, 1992), 计算第一主分量时间系数与各个指数的相关系数, 在通过 95% 信度检验的因子集中寻找前期关键因子. 由于各项指数在不同月份对长江中下游区域的降水影响可能不同, 因此本文由 114 项指数可以构造出样本量为 $114 \times 12 = 1368$ 逐月变化的因子集. 确定合适的前期关键因子之后, 计算单个前期关键因子预报当年的值与其他年份值的欧氏距离并进行比较, 根据距离越小则判断为越相似的原则, 确定预报误差场的相似年. 为了保证预报误差场质量, 每个前期关键因子选取了 4 个相似年 (任宏利和丑纪

范, 2007a) 的降水误差场进行等权重线性误差估计. 比较发现, 相关系数高的因子其交叉检验的订正效果未必就好, 例如选取相关系数最高的 8 月份大西洋副高北界指数作为前期因子 (相关系数为 0.63), 得到相似误差订正 27 年交叉检验 ACC 仅为 0.11 (图略).

表 1 列出了针对长江中下游汛期降水利用单个前期因子进行 27 年交叉检验 ACC 排名前五位因子, 研究发现, 单因子相似误差订正的平均 ACC 相对于系统误差订正有明显提高, 比仅利用相关系数选取的订正更有优势. 例如, 利用前期 10 月份全球平均陆地海洋温度指数进行相似误差订正的 27 年平均 ACC 为 0.32, 比系统误差订正的一 0.01 提高了 0.33.

表 1 单因子 27 年交叉检验相似误差订正平均 ACC 排序
Table 1 The rank of the average ACC (anomaly correlation coefficient) of single factor in 27 years through the cross-examination of analogue error correction (only top five factors are listed)

因子	月份	ACC
全球平均陆地海洋温度指数	10	0.32
北美副高强度指数	9	0.31
西太平洋副高面积指数	12	0.30
太平洋副高强度指数	8	0.29
热带北大西洋指数	10	0.29

3.2 多因子相似误差订正

一般而言, 不同的单个前期因子在交叉检验时对相同年份的 ACC 提高是不同的, 具有一定的偶然性, 在实际操作过程中很难预先确定预报年前期起主导作用的关键因子, 因此有必要考虑将多个因子组合起来选取相似误差场, 为此进行了如下试验.

多因子相似误差订正的具体做法是, 将各因子序列标准化后, 利用 EOF 分解提取解释方差占 80% 的主分量, 然后根据各主分量的时间系数来确定 4 个降水误差场相似年, 进而得到 27 年相似误差订正的交叉检验的结果. 采用式 (9) 选取 4 个相似年对应的模式误差场的平均值作为预报年的相似误差场.

$$D = \left[\frac{\sum_{i=1}^k w_i (\phi'_{ij} - \phi'_{ik})^2}{\sum_{i=1}^k w_i} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

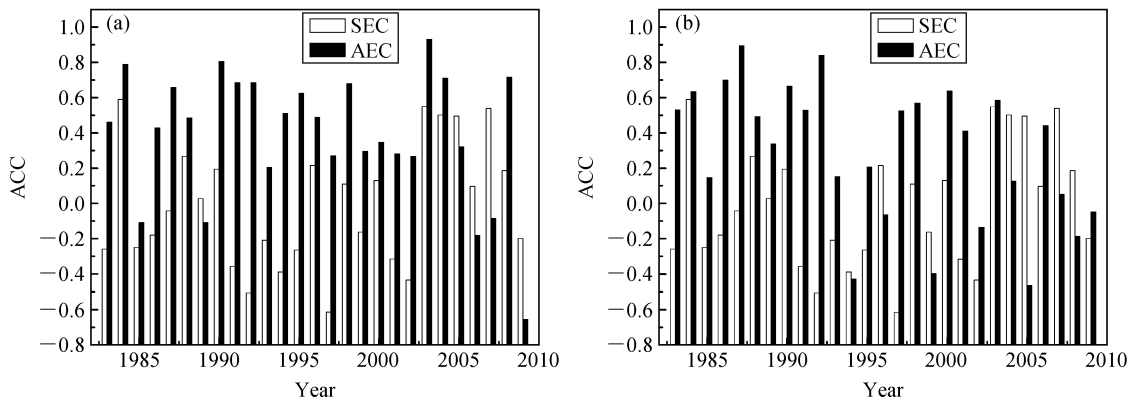


图1 利用全球平均陆地海洋温度指数和北美副高强度指数双因子及结合西太副高面积指数三因子相似误差订正 (AEC) 与系统误差订正 (SEC) 结果比较: (a) 双因子 ACC; (b) 三因子 ACC

Fig. 1 Comparison between analogue error correction (AEC) and systematic error correction (SEC) for ACC through (a) double factors and (b) triple factors, the double factors are global average land – ocean temperature index and the strength of subtropical high in North America, the triple ones plus the western Pacific subtropical high area index

式中, D 为提取的各主分量时间系数间的欧氏距离, ϕ' 代表各主分量的时间系数。 j 和 k 分别代表两个不同时刻, w_i 为权重系数, 取各主分量的解释方差, 欧氏距离越小则说明越相似。这里采用 EOF 分解可以消除因子之间可能存在的相互影响和联系, 从而避免多因子线性相关导致的误差非线性增长, 并且降低了因子场的维数。

图 1a 为采用表 1 中全球平均陆地海洋温度指数和北美副高强度指数这两个因子相似误差订正结果, 图 1b 为采用全球平均陆地海洋温度指数、北美副高强度指数及西太副高面积指数进行三因子相似误差订正结果。从图 1a、b 可以发现采用双因子和三因子的相似误差订正得到的交叉检验平均 ACC 都比系统误差订正要高, 双因子组合订正后的 27 年平均 ACC 达到 0.39, 三因子组合订正后的 27 年平均 ACC 达到 0.29。这两种因子组合相似误差订正的效果呈现一定的年代际特征, 双因子组合订正效果明显的阶段处于 27 年的中后期的 15 年中 (1990~2004 年), 三因子组合订正效果明显的阶段主要集中在前期的 11 年 (1983~1993 年), 这说明不同因子组合对不同降水预测时段具有一定的针对性。从交叉检验的结果可以发现, 采用双因子相似误差订正的效果要优于单因子和三因子组合, 这恰恰印证了“对线性系统资料用得越多越好, 对非线性系统则不然, 有巧不在多” (丑纪范和任宏利, 2006) 这一结论。因此, 采用多因子组合的方法进行相似误差订正可以取长补短, 在一定程度上提高

预报效果。因而本文接下来的工作就是寻找合适的、有针对性的因子组合方案, 从而确定更为合适的预报年的相似误差场。

3.3 基于优化多因子组合的 OQF 方法

多因子相似误差订正的组选择方案: 首先将单因子相似误差订正交叉检验的平均 ACC 按从大到小排序, ACC 最大值因子作为起始因子, 将因子从两个开始逐步累加, 得到预报年前期历史交叉检验 ACC 评分最高的双因子组合, 然后再添加第三个因子, 使得此种情况下预报年前期历史交叉检验 ACC 评分最高, 依此类推逐步增加因子个数。将降水预报年之前的历年交叉检验平均 ACC 作为判断组合优劣的标准, 可以得到较为稳定的交叉检验的相似误差订正效果 (图 2)。从图 2 中可以看出, 2003~2009 年前期历史交叉检验的 ACC 开始时随因子个数的增多而增大, 但当因子个数达到 10 个以上时, 增大趋势逐渐变缓, 趋于平稳的状态, 因此, 在选定因子组合的时候可以考虑取前 10 个因子。但是, 在研究中发现选择的前 10 个因子中往往存在历年平均 ACC 为负值的单因子, 考虑到该部分因子对误差场相似年的确定会提供虚假信息, 有必要予以剔除。

图 3 给出了在 ACC 排序的基础上对因子进行进一步筛选, 将单因子前期历史交叉检验中 ACC 高于 0.1 以上的因子作为前期关键因子, 再进行以上逐步累加的过程, 选取不同因子个数组下预报年前期历史交叉检验 ACC 最高的因子组合, 从而

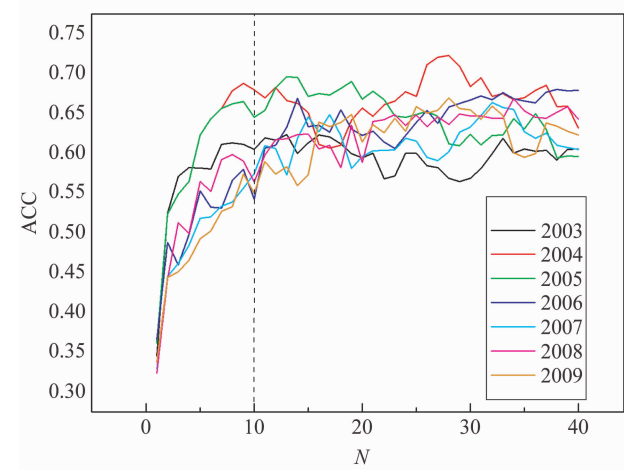


图 2 2003~2009 年的逐步累加的前期因子组合个数 (N) 与预报年之前年份交叉检验 ACC 关系

Fig. 2 The relationship between the number (N) of accumulated pre-factors and the ACC in the years before forecasting through cross-examination from 2003 to 2009

得到优化多因子组合。

图 3 显示在经过进一步筛选的因子集中, 当因子组合个数达到 10 个左右时, 2003~2009 年的前期历史交叉检验 ACC 基本都会达到一个比较平稳的值, 其中, 2003 年在 12 个以上因子组合的时候平均 ACC 随因子个数的增加呈现下降趋势, 其他年份在因子个数累加到 20 个左右时平均 ACC 也都呈现出衰减的趋势。因此本文分别选取 9、10、11 个优化多因子组合确定误差场相似年, 既可保证所选因子组合在前期历史交叉检验中订正效果明显, 又可通过三种不同的优化多因子组合提取有一定区别的相似年误差场, 从而在一定程度上克服以往误差场相似年固定为 4 个的局限性。

表 2 以 2007~2009 年为例, 列出了采用 9、10、11 个优化多因子组合选取的误差场相似年, 可以看出, 尽管采用的因子个数不同, 但所选取的误差场相似年有很多都重复出现, 例如 2007 年的误差场相似年中, 2004、1995 这两年重复出现了三次, 2006 年和 1988 年重复出现了两次。其他年份

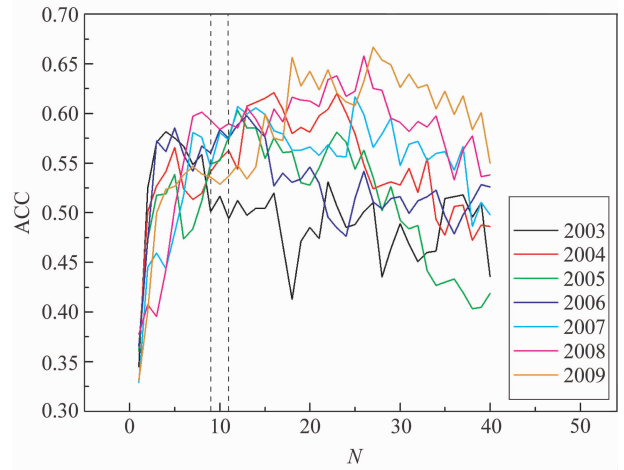


图 3 2003~2009 年优化配置的前期因子组合个数与预报年之前年份交叉检验 ACC 关系

Fig. 3 The same as Fig. 6, but for the relationship between the number of optimal factor combinations (OFC) and the ACC

选取的误差场相似年也都存在类似的情况, 这说明优化多因子组合选取相似误差场的性能是稳定的。因此, 本文在进行相似误差场合成的过程中, 把三种优化多因子组合选取的相似年误差场进行集合平均, 并且根据误差场相似年重复出现的次数, 将各相似年误差场赋予 $n(i)/12$ 的权重系数, 其中 $n(i)$ 为误差场相似年重复出现的次数, 分母 12 为三种情况的优化多因子组合选取的 12 个误差场相似年, 这有利于克服进行误差场合成时没有考虑欧氏距离差异的缺点。最后, 将加权集合平均相似误差场与模式预报的降水场合成, 形成该区域汛期降水的 OQF 结果 (流程如图 4 所示), 具体步骤如下:

第 1 步: 根据 CMAP 历年降水资料和历年模式回报结果得到汛期降水历年模式预测误差;

第 2 步: 将 114 项指数在预测年 (例如 2009 年) 的 1 月份因子和前一年 (2008 年) 的 2~12 月份的因子作为预测年前期因子, 利用各单因子以交叉检验的方式对模式结果进行相似误差订正, 与 CMAP 降水资料对比, 得到单因子相似误差订正的 26 年 (1983~2008) 平均 ACC 排序;

表 2 2007~2009 年不同因子个数的优化多因子组合选取的误差场相似年

Table 2 The analogue years of 2007 to 2009 in error fields on different numbers of OFC

	9 个因子	10 个因子	11 个因子
2007 年	2004、1995、1999、2006	1995、1988、2004、2006	1995、1988、2004、1994
2008 年	2005、1991、1985、2004	2001、2005、1985、2000	2005、1985、2001、1993
2009 年	2001、1991、1992、1989	2001、1992、1989、2008	2001、1991、1992、2008

第 3 步：选取 26 年平均 ACC 大于 0.1 的因子进行优化组合，将其中 ACC 最大值因子作为组合的首因子，根据双因子对 1983~2008 年交叉检验的平均 ACC 值的大小判断第二个因子，依此类推得到前 11 个优化多因子组合；

第 4 步：对前 9、10、11 个优化多因子组合，采用 EOF 分解提取解释方差占 80% 的主分量，由式 (9) 得到每种因子组合选取的 4 个相似年，结合历年模式误差分别选取相似误差场；

第 5 步：将各相似年误差场根据重复出现的次数加权集合平均，结合 2009 年模式预测结果，得

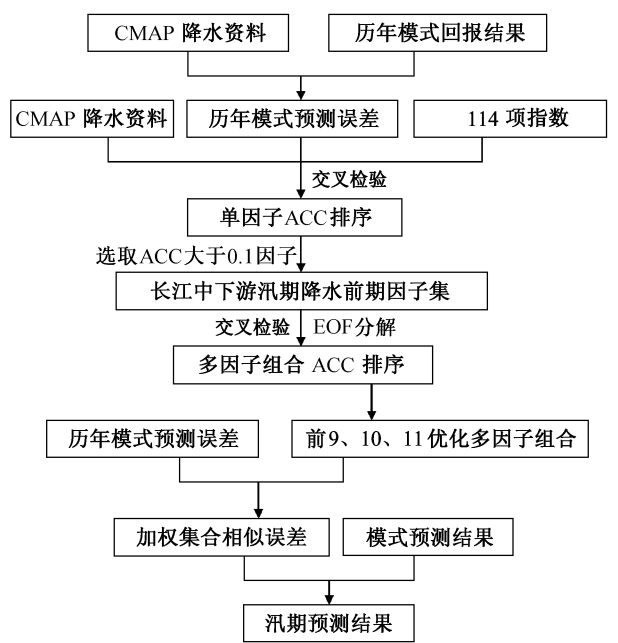


图 4 OQF 方法流程图

Fig. 4 The flow chart of OQF method

到基于优化多因子组合的 OQF 方法预测的 2009 年汛期降水状况。

4 独立样本回报效果

为检验 OQF 方法的效果，本文利用该方法对 2003~2009 年进行了独立样本回报检验，各年 ACC 评分和 RMSE 如图 5 所示。

图 5a 给出了基于优化多因子组合的 OQF 方法回报的降水场的 7 年 ACC，可以发现，7 年回报结果 ACC 分别为 0.58、0.49、0.76、0.09、0.55、0.04、0.47。7 年平均 ACC 为 0.43，相比于系统误差订正的 7 年 ACC 平均值 0.28 有了明显提高，并且除 2006 年和 2008 年外，其余 5 年利用 OQF 方法的 ACC 均高于系统误差订正。图 5b 是采用两种误差订正方法后的历年均方根误差，其平均值也从系统误差订正的 99.48 减小到 OQF 方法的 92.63，尤其在 2003、2004、2005 和 2009 年 4 年中 OQF 方法的均方根误差比系统误差订正的结果明显减小，体现出利用 OQF 方法对该地区汛期降水有较高的预测技巧。

4.1 2009 年独立样本回报年优化多因子组合及其订正效果

本节将以 2009 年为例，详细分析基于优化多因子组合的 OQF 方法的订正效果。这里采用的优化多因子组合如表 3 所示。11 个因子主要集中在 7、8、10 三个月，以北半球环流指数为主，还涉及到表征热带中东太平洋海表温度的指数。

在表 2 最后一行列出了利用优化多因子组合选取的 2009 年误差场相似年，从中可以看出，虽然

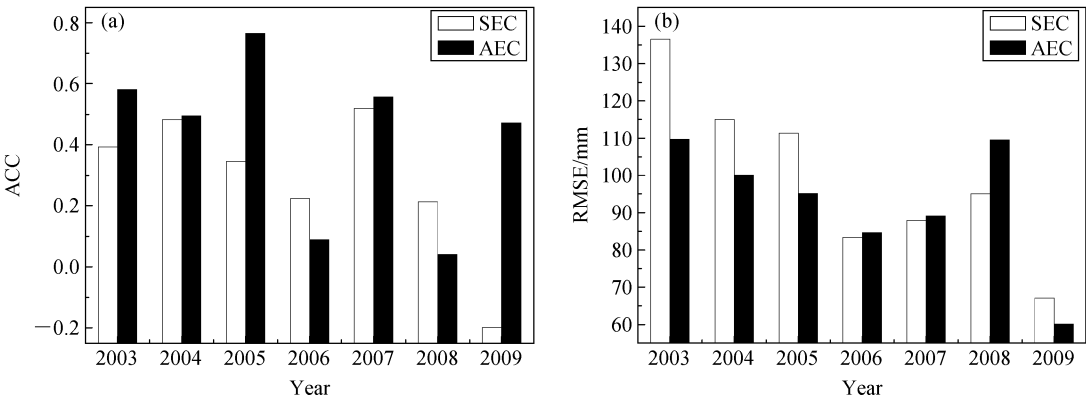


图 5 2003~2009 年 OQF 方法与系统误差订正的独立样本回报比较：(a) ACC；(b) RMSE

Fig. 5 The independent sample regression outcomes of OQF technique and system error correction from 2003 to 2009; Comparison of the two methods on (a) ACC and on (b) root mean square error

表 3 2009 年前期优化多因子组合
Table 3 The pre-OFC in 2009

序号	月份	因子	单因子 ACC
1	10	全球平均海陆温度指数	0.34
2	8	南海副高北界	0.23
3	8	南海副高脊线	0.29
4	2	大西洋欧洲环流型 E	0.12
5	7	热带中太平洋 SST	0.10
6	7	大西洋欧洲区极涡强度指数 4 区	0.16
7	8	全球平均角动量	0.14
8	10	西太平洋副高面积指数	0.14
9	4	北半球极涡中心位置	0.12
10	10	北半球副高面积指数	0.12
11	9	大西洋欧洲区极涡面积指数	0.11

利用不同个数的前期因子组合，但是选取的相似年基本类似，例如 2001、1991、2008、1989 年都重复出现，其中 2001 年在三种情况下都出现，这说明了优化多因子组合选取误差场相似年的稳定性。

图 6 给出了 2009 年降水距平百分率回报与实况的比较，长江中下游地区 2009 年汛期降水总体呈现东多西少的分布，该区域中包含的湖南、湖北、安徽、江西等地区降水普遍偏少，在浙江西部和东部钱塘江口降水也偏少，仅在江苏南部和浙江中东部区域降水偏多，区域总体较平均态偏少（图 6a）。系统误差订正后模式预报的区域降水总体偏多，并且东少西多，仅在浙江东北部出现了降水偏少的情况，与实况降水场的 ACC 为一 0.15，和实况基本相反（图 6b）。采用优化多因子组合相似误差订正后模式预报的区域降水分布呈现东多西少的分布型，与实况的降水分布型较为吻合，与实况降水场的 ACC 为 0.47，达到了较好的预测效果。但是在该区域西北部 OQF 方法预测的降水仍然比实际偏多。

4.2 误差场相似年选取的探讨

从以上研究可以看出，利用优化多因子组合选取的相似年误差场订正模式预报结果，可以改进长江中下游区域的汛期降水预报效果，提高预报技巧。但是这里选取的误差场是否就是历史资料中最优的误差场组合，需要进一步验证，以期对 OQF 方法的改进提供一定的思路。因此，本节计算了 2003~2009 年各年模式误差场与其前期历年模式误差场的 ACC，通过计算可知 ACC 为正值年份均在 10 个以上，表 4 仅依次列出了 ACC 靠前的 4

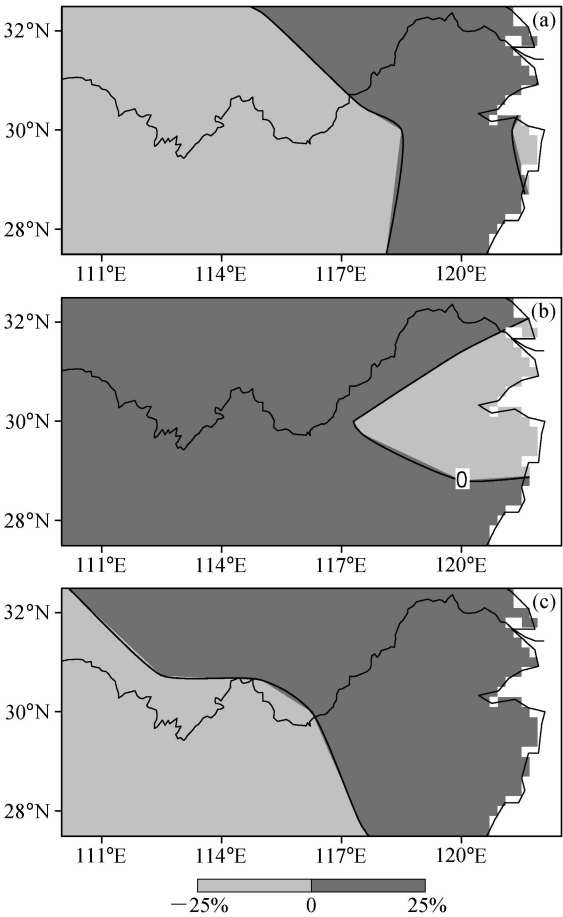


图 6 2009 年独立样本回归结果比较：(a) 降水距平百分率实况；(b) 系统误差订正后模式预报的降水距平百分率；(c) 优化多因子组合相似误差订正后模式预报的降水距平百分率

Fig. 6 Comparisons of the independent sample regression outcomes in 2009 between (a) precipitation anomaly percentage of the in-situ observation, (b) that revised by systematic error correction, and (c) that revised by OFC analogue error correction

个相似年份，以及各相似年误差场与回报年误差场 ACC 评分。

从表 4 中可以发现，2003~2009 年各年的实际误差场在历史上都可以找到 ACC 比较高的误差场第一相似年，最小为对应 2009 年与 1990 年的 0.53，最大为对应 2003 年与 1991 年的 0.87。即使第四相似年误差场与回报年误差场 ACC 最小值也可达到 0.38（2004 年与 1998 年）。表 4 中的“集合平均”为相似误差订正的预报结果与当年汛期降水实况的 ACC，7 年 ACC 均值为 0.79，远高于优化多因子组合相似误差订正的 0.43。当然，此种情况在理想的状况下才会出现，如以 2009 年为例，四个理想相似年分别为 1990 年、1984 年、2005 年、

表 4 2003~2009 年模式误差场与其前期各年模式误差场距平相关系数前四位

Table 4 The top four ACC of actual error fields and their top four pre-analogue years error fields from 2003 to 2009

	第一相似年		第二相似年		第三相似年		第四相似年		集合平均
	年	ACC	年	ACC	年	ACC	年	ACC	ACC
2003 年	1991	0. 87	1984	0. 84	1987	0. 71	1986	0. 70	0. 89
2004 年	1988	0. 64	1996	0. 58	2002	0. 43	1998	0. 38	0. 67
2005 年	1990	0. 74	2000	0. 71	1984	0. 68	1989	0. 58	0. 87
2006 年	1997	0. 65	1994	0. 63	2002	0. 53	1992	0. 47	0. 78
2007 年	2004	0. 68	2005	0. 58	2003	0. 54	1986	0. 51	0. 81
2008 年	1996	0. 72	1986	0. 67	2007	0. 67	2003	0. 66	0. 84
2009 年	1990	0. 53	1984	0. 47	2005	0. 46	2001	0. 42	0. 68

2001 年，此种情况下 ACC 可以达到 0. 68，与采用优化多因子组合选取的相似年比较，仅有 2001 年是相同的，且为理想情况下的第四相似年。通过该部分的分析可以得知，虽然历史资料中存在很好的相似误差场，但实际选取的各相似年误差场经常会出现 ACC 为负值的情况，说明利用相似误差订正方法提高区域降水预报技巧还有较大的提升空间，选取误差场相似年的工作还存在需要改进之处。本文仅考虑前期因子某个月的情况，没有涉及因子出现异常的情况，而因子异常往往会对区域降水产生较明显的影响，因此，下一步工作将主要针对因子在一定时间段内的演化情况来选取误差场相似年并考虑因子出现异常的状况。

5 结论与讨论

本文首先利用单因子相似误差订正的方法改进长江中下游地区降水预报效果，结果表明该方法可以提高该区域汛期降水预报技巧。在此基础上，根据独立样本回报年前期交叉检验的 ACC 评分，对因子进行优化组合，并且采用加权集合平均的方法对相似年误差场进行合成，提出了基于优化多因子组合的 OQF 方法。2003~2009 年 7 年的独立样本回报结果显示，利用 OQF 方法得到的相似误差订正的 7 年 ACC 均值为 0. 43，比系统误差订正提高了 0. 15，使得模式预测效果得到明显改善。以 2009 年为例研究了优化多因子组合及其选取的相似年状况，比较了相似误差场间的关系，发现选取的相似年误差场与 2009 年降水误差场有较好的匹配关系。从以上研究结果可知，OQF 方法是针对模式误差利用历史资料进行预报的有效方法，但该方法所选取的因子组合与长江中下游地区汛期降水

之间产生关系的物理机制需要进一步深入研究。本文最后从理想试验的角度出发，分别计算了 2003~2009 年与其前期逐年误差场的 ACC，研究发现，各年在历史资料中都可以寻找到 4 个比较匹配的误差场相似年，从而获得优良的模式订正效果，显示了选取误差场相似年的工作还存在较大的改进余地。

参考文献 (References)

Barnett T P, Preisendorfer R W. 1978. Multifield analog prediction of short-term climate fluctuations using a climate state vector [J]. J. Atmos. Sci., 35 (10): 1771-1787.

鲍名. 2009. 从中期天气过程看近几年长江中下游梅雨偏少的原因 [J]. 大气科学, 33 (4): 708-718. Bao M. 2009. Causes of deficit Meiyu over the middle and lower reaches of the Yangtze River in the last several years viewed from medium range weather process [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 708-718.

丑纪范. 1974. 天气数值预报中使用过去资料的问题 [J]. 中国科学 (A 辑), 6 (11): 635-644. Chou J F. 1974. A problem of using past data in numerical weather forecasting [J]. Science in China (Ser. A) (in Chinese), 6 (11): 635-644.

丑纪范. 1986. 为什么要动力-统计相结合?——兼论如何结合 [J]. 高原气象, 5 (4): 367-372. Chou J F. 1986. Why to combine dynamical and statistical methods together?—Also discuss how to combine [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 5 (4): 367-372.

丑纪范, 任宏利. 2006. 数值天气预报——另类途径的必要性和可行性 [J]. 应用气象学报, 17 (2): 240-244. Chou J F, Ren H L. 2006. Numerical weather prediction—Necessity and feasibility of an alternative methodology [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (2): 240-244.

Chao J P, Guo Y F, Xin R N. 1982. A theory and method of long-range numerical weather forecasts [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 60: 282-291.

- 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.
- 陈隆勋. 1984. 东亚季风环流系统的结构及其中期变动 [J]. 海洋学报, 6 (6): 744–758. Chen L X. 1984. The configuration of the East Asian monsoon circulation and its medium-term oscillation [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 6 (6): 744–758.
- 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 G L, Cao H X, Wei F Y, et al. 2001. On area rainfall integration 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 Phys., 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 Phys., 13: 413–422.
- 范可. 2006. 南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. 地球物理学报, 49 (3): 672–679. Fan K. 2006. Atmospheric circulation anomalies in the Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River valley [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 49 (3): 672–679.
- 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 mid-lower reaches of the Yangtze River valley summer rainfall [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (24): 2900–2905.
- 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), 地球科学, 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) (in Chinese), 38 (11): 1452–1459.
- 顾震潮. 1958. 天气数值预报中过去资料的使用问题 [J]. 气象学报, 29 (3): 176–184. Gu Z C. 1958. On the utilization of past data in numerical weather forecasting [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (3): 176–184.
- Huang J P, Yi Y H, Wang S W, et al. 1993. An analogue-dynamical long-range numerical weather prediction system incorporating historical evolution [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 119: 547–565.
- 黄嘉佑. 1990. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 182–188. Huang J Y. 1990. Statistical Analysis and Forecasting Method in Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 182–188.
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状况及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响 [J]. 大气科学, 18 (2): 141–151. Huang R H, Sun F Y. 1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the Tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (2): 141–151.
- 柯宗建, 张培群, 董文杰, 等. 2009. 最优子集回归方法在季节气候预测中的应用 [J]. 大气科学, 33 (5): 994–1002. Ke Z J, Zhang P Q, Dong W J, et al. 2009. An application of optimal subset regression in seasonal climate prediction [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 994–1002.
- 刘芸芸, 丁一汇. 2009. 西北太平洋夏季风对中国长江流域夏季降水的影响 [J]. 大气科学, 33 (6): 1225–1237. Liu Y Y, Ding Y H. 2009. Influence of the western North Pacific summer monsoon on summer rainfall over the Yangtze River basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1225–1237.
- 任宏利, 丑纪范. 2005. 统计—动力相结合的相似误差订正法 [J]. 气象学报, 63 (6): 988–993. Ren H L, Chou J F. 2005. Analogue correction method of errors by combining both statistical and dynamical methods together [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (6): 988–993.
- 任宏利, 张培群, 李维京, 等. 2006. 基于多个参考态更新的动力相似预报方法及应用 [J]. 物理学报, 55 (8): 4388–4396. Ren H L, Zhang P Q, Li W J, et al. 2006. A new method of dynamical analogue prediction based on multi-reference-state updating and its application [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 55 (8): 4388–4396.
- 任宏利, 丑纪范. 2007a. 数值模式的预报策略和方法研究进展 [J]. 地球科学进展, 22 (4): 376–385. Ren H L, Chou J F. 2007a. Study progress in prediction strategy and methodology on numerical model [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (4): 376–385.
- 任宏利, 丑纪范. 2007b. 动力相似预报的策略和方法研究 [J]. 中国科学 (D 辑), 37 (8): 988–993. Ren H L, Chou J F. 2007b. Strategy and methodology of dynamical analogue prediction [J]. Science in China (Ser. D) (in Chinese), 37 (8): 988–993.
- 施能. 1992. 气象统计预报中的多元分析方法 [M]. 北京: 气象出版社, 210–227. Shi N. 1992. The Multianalysis Method of Meteorological Research and Prediction (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 210–227.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2009. A possible mechanism for the co-variability of the boreal spring Antarctic Oscillation and the Yangtze River valley summer rainfall [J]. International Journal of Climatology, 29: 1276–1284.
- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 1958. 东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系 [J]. 气象学报, 29 (2): 119–134. Tao S Y, Zhao Y J, Chen X M. 1958. The relationship between May-Yu in Far East and the behaviour of circulation over Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (2): 119–134.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East

- Asian Summer Monsoon in China [M]// Monsoon Meteorology. Oxford University Press, 60–92.
- van den Dool H M. 1994. Searching for analogues, how long must we wait? [J]. *Tellus*, 46A: 314–324.
- 吴国雄, 刘还珠. 1995. 降水对热带海表温度异常的邻域响应 I: 数值模拟 [J]. *大气科学*, 19 (4): 422–434. Wu G X, Liu H Z. 1995. Neighbourhood response of rainfall to tropical sea surface temperature anomalies. Part I: Numerical experiment [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 19 (4): 422–434.
- Wang H J, Fan K. 2009. A new scheme for improving the seasonal prediction of summer precipitation anomalies [J]. *Wea. Forecasting*, 24: 548–554.
- 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试验 [J]. *物理学报*, 58 (10): 7359–7367.
- Zheng Z H, Ren H L, Huang J P. 2009. Analogue correction of errors based on seasonal climatic predictable components and numerical experiments [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 58 (10): 7359–7367.
- Zhou B T, Wang H J. 2006. Relationship between the boreal spring Hadley circulation and the summer precipitation in the Yangtze River valley [J]. *J. Geophys. Res.*, 111: D16109, doi: 10.1029/2005JD007006.
- 庄照荣, 薛纪善, 李兴良, 等. 2010. GRAPES 全球模式的模式误差估计 [J]. *大气科学*, 34 (3): 591–598. Zhuang Z R, Xue J S, Li X L, et al. 2010. Estimation of model error for the global GRAPES model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (3): 591–598.