

刘颖, 范可, 张颖. 2013. 基于 CFS 模式的中国站点夏季降水统计降尺度预测 [J]. 大气科学, 37 (6): 1287–1296, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12143. Liu Ying, Fan Ke, Zhang Ying. 2013. A statistical downscaling model for summer rainfall over China stations based on the Climate Forecast System [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (6): 1287–1296.

基于 CFS 模式的中国站点夏季降水 统计降尺度预测

刘颖^{1,2} 范可² 张颖²

1 国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 本研究针对中国夏季站点降水, 研制建立了基于 Climate Forecast System (CFS) 实时预测数值产品及观测资料的统计降尺度预测系统。此预测系统选取了 CFS 模式中当年夏季 500 hPa 高度场和观测资料中前一年秋、冬季海表面温度场作为预测因子, 两因子的关键区分别为泛东亚地区和热带太平洋地区。统计降尺度模型对 1982~2011 年中国夏季降水的回报效果较 CFS 模式原始结果显著提高, 空间距平相关系数由 0.03 提高到 0.31, 时间相关系数在中国大部分地区显著提高, 最大可达 0.6。均方根误差较 CFS 模式原始结果明显降低, 同时, 此降尺度模型较好的回报出 2011 年汛期降水的距平百分率的空间分布型。

关键词 CFS 中国 夏季降水 统计降尺度

文章编号 1006-9895(2013)06-1287-10

中图分类号 P446

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12143

A Statistical Downscaling Model for Summer Rainfall over China Stations Based on the Climate Forecast System

LIU Ying^{1,2}, FAN Ke², and ZHANG Ying²

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

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract A statistical downscaling system for forecasting summer precipitation at stations in China has been established in this study on the basis of real-time prediction of numerical products from the Climate Forecast System (CFS) and observational data. The summer 500-hPa geopotential height in the current year from CFS and the previous autumn–winter sea surface temperature from observations were selected as the two predictors, with corresponding key regions of Pan–East–Asia and the tropical Pacific, respectively. The statistical downscaling hindcast on the 1982–2001 summer precipitation over China improved the performance of the prediction compared with that of the original CFS. The spatial anomaly correlation coefficients increased from 0.03 to 0.31, and the temporal correlation coefficients over most parts of China also increased significantly by the downscaling scheme with a maximum of 0.6. The root mean square error decreased in comparison with the output of the original CFS. Furthermore, we successfully created a hindcast on the 2011 summer precipitation anomaly pattern in China by using this statistical downscaling scheme.

Keywords CFS, China, Summer precipitation, Statistical downscaling

收稿日期 2012-09-03, 2012-11-07 收修定稿

资助项目 全球变化研究国家重大科学研究计划 2010CB950304, 国家自然科学基金 (Granted) 41175071, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200906018, 中国科学院知识创新工程重要方向项目青年人才类 (Grant) KZCX2-YW-QN202, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206016 (部分资助)

作者简介 刘颖, 女, 1982 年生, 博士, 从事短期气候预测研究。E-mail: liuying@cma.gov.cn

1 引言

在全球变暖背景下,气候变化成为科学界的研究热点之一,气候的形成和变化不仅是大气内部状态和过程的反映,也是陆地、海洋、冰雪圈以及生物圈等与大气相互作用的结果(曾庆存等,2003)。王会军(1997)指出,气候异常变化对全球各方面都会产生重要影响,因此,气候预测成为当今人类社会面临的一个重大课题。由于影响气候短期变化的因子众多,且因子间又有复杂的相互作用,我们尚未对其中的这些预测因子的详细物理过程及其影响有清晰的科学认识。对于中国来讲,夏季降水占全年比重较大,在北方地区占50%以上,南方地区占40%左右(图1),因此,夏季降水预测对我国的国民经济以及现代化建设有着非常重要的作用。但是,由于中国地处东亚季风区,自然条件复杂,剧烈变化的气候影响着东亚季风系统等因素,导致中国夏季降水的短期气候预测业务平均水平一直不高。

短期气候预测方法主要分为数值模式方法和物理统计方法,对于大尺度环流模式(GCM)而言,其对热带地区以及大尺度环流具有较高预测能力,但对东亚地区的降水几乎没有预测能力,那么,降尺度方法的提出有效利用了GCM的高预测性能对局地变量进行预测。近年来,我国学者已在夏季降水短期气候预测以及降尺度方面取得诸多成果。如提出了年际增量的预测方法并将其应用到我国夏季降水、台风等预测中(范可等,2007;范可等,2008; Fan and Wang, 2009)。Zhu et al. (2008)利用经验正交分解和奇异值分解相结合的方法对亚太地区的夏季风降水做了降尺度预报,提高了本区域夏季风降水的距平相关系数,同时均方根误差显著降低。Wang and Fan (2009)利用模式对热带地区较好的可预测性对东亚地区降水进行降尺度预测,研究证明,这种方法能够提高东亚乃至中国夏季降水的预测能力。Lang and Wang (2010)对中国6个区域进行了研究,将模式输出资料与观测资料相结合,针对不同区域选取影响因子,研究结果显示,新的预测方法对各区域夏季降水距平符号、量值以及年际变化上优于模式本身的预报。Gu et al. (2011)利用中国气象局国家气候中心的大尺度海—气耦合模式(CGCM-NCC)对中国不同区域夏季降水进行了统计降尺度研究,降尺度结果较模

式原始结果提高了中国区域夏季降水的预测技巧。Chen et al. (2012)和 Sun and Chen (2012)分别针对中国站点以及全球的夏季降水从GCM的大尺度环流变量中选取最优预测因子,降尺度模型结果的距平相关系数以及均方根误差均较GCM模式原始结果分别有显著的提高和降低。

美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的气候预测系统(Climate Forecast System, CFS)可以为全球提供最新的多时间尺度预测资料(Saha et al., 2006)。此预测系统的第一代从2004年8月开始业务运行,同时,对1981~2004年共24年进行了历史回报。第二代在2011年3月开始进行业务实时预测,并提供了1982~2010年的回报试验结果。已经有许多利用CFS模式资料展开的研究。Yang et al. (2008)对亚洲季风区的气候、主要降水区的年际变化以及大尺度环流系统做了细致分析。陈官军等(2010)也对此模式系统不同初始场资料对东亚夏季的预报效能进行了检验评估。Yuan and Liang (2011)针对美国降水,利用WRF (Weather Research and Forecasting)模式对CFS模式资料进行了动力降尺度回报。Gao et al. (2011)评估了CFS模式资料对梅雨带的预测能力。然而,现阶段利用CFS模式资料对中国地区站点夏季降水进行统计降尺度预测的研究还很少。因此,我们利用此资料对中国夏季降水进行预测。

2 数据

降水资料来源于中国气象局国家气候中心1982~2011年的160站点月平均数据。大气资料为NCEP/NCAR再分析资料(1982~2011年)中的500 hPa高度场(GH5),水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al., 1996)。海温资料为1981~2011年秋、冬季NOAA的海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)资料,水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ (Smith et al., 2008)。

CFS模式有两个版本(CFSv1和CFSv2),本研究使用CFSv2版本的月平均资料,起始时间为1982年,资料更新至今。其中1982~2010年的结果取自回报试验。各月每隔5天分别从0、6、12和18 UTC开始积分,积分时间为9个月,即回报当月数据并对未来1~9个月进行预报。2011和2012年的CFS资料取自实时预测,每天都从上述4个时

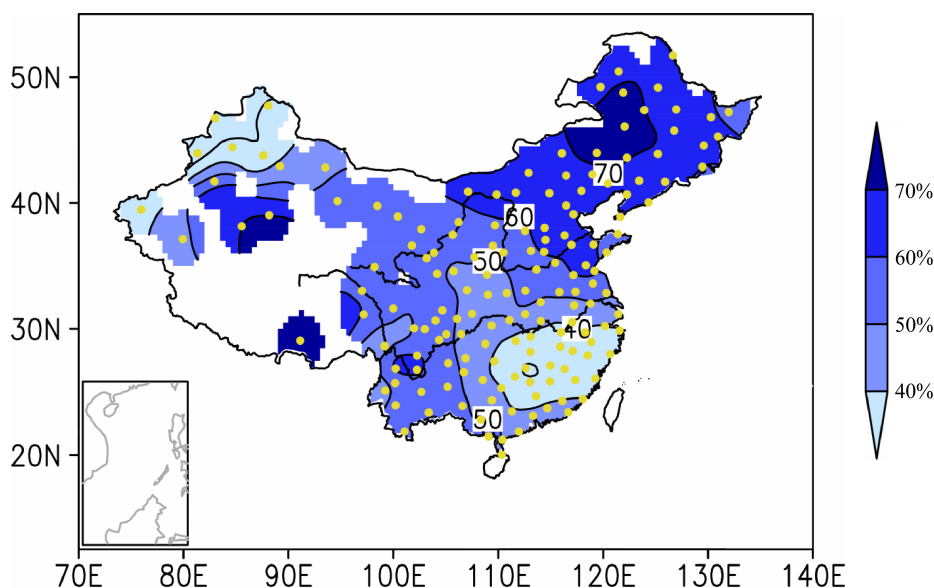


图1 1982~2011年夏季降水量占全年降水的百分率空间分布以及中国160站分布情况。黄色圆点代表160站位置

Fig. 1 The percentage pattern of the summer precipitation in annual mean during 1982–2011 and the 160 station locations in China. Yellow dots represent the locations of 160 stations

次开始积分, 积分时间同为9个月。在本研究中, 对每个月中所有不同初值的积分进行集合平均, 并利用双线性插值方法将集合结果插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 水平网格上。为了保证资料完整性并及时参加国家气象局的汛期会商, 我们选取2月份起报的6、7、8月GH5高度场资料。

3 方法

本文使用场信息耦合型方法建立统计降尺度预测模型。此方法的优点在于, 能够针对预测因子和预测量空间场的主要信息, 通过提取两变量场的最优耦合变化型建立模型。具体步骤为:

首先, 在建模的拟合时段 t 内, 利用EOF (Empirical Orthogonal Function) 分析, 分别对预测因子和预测量变量场进行分解, 基于Kaiser's 标准 (Wilks, 2006) 保留主模态进而将预测因子和预测量回算到原始变量场形式。此步骤能够将变量场中多余的噪音去除, 达到滤波目的。Kaiser's 标准公式为

$$\lambda_m > \frac{T}{K} \sum_{k=1}^K s_{k,k}, \quad (1)$$

其中, λ_m 表示保留的 EOF 特征值, $s_{k,k}$ 为所分解变量的第 k 个方差, T 为阈值参数, 这里取 $T=0.7$ (Jolliffe, 1972; 2002)。

其次, 将滤波之后的预测因子和预测量利用SVD (Singular Value Decomposition) 分解, 提取两

变量场之间的耦合变化型。

最后, 利用得到的预测因子和预测量的 SVD 模态对、对应的时间系数以及预测时间段 $t+1$ 预测因子场, 利用多元线性回归方法, 做出统计降尺度预测 (Liu and Fan, 2012a, 2012b), 建模过程如图2所示。

4 预测因子选取

500 hPa 高度场代表着对流层中层的无辐散层, 可以很好地体现高空大尺度环流波动 (例如, 槽脊移动、阻塞系统等) 的情况。由于天气系统的斜压性以及上下游效应, 从 GH5 中可以抓住大尺度环流背景场的变化, 从高低空系统的配置关系我们就可以推知低空系统的变化, 从而对地面天气的未来发展形势做出预测预报。因此, 我们选取来自于 CFS 模式资料的同期因子夏季 GH5 为预测因子, 其关键区为 $30^{\circ}\text{S} \sim 60^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}\text{E}$, 以下称泛东亚地区。图3为1982~2011年NCEP再分析资料与CFS资料之间的GH5相关场。可以看到, 显著的正相关区集中在低纬度地区, 相关系数最大可达到0.6以上, 东亚及周围地区上空也存在显著的正相关区。同时, 1982~2011年NCEP再分析资料与CFS模式资料中泛东亚地区GH5的空间相关系数能够达到0.97以上。观测与CFS模式资料中GH5的EOF第一模态主成分, 都显示出了随时间下降的趋势, 两者之间的相关系数可以达到0.46 (图略)。

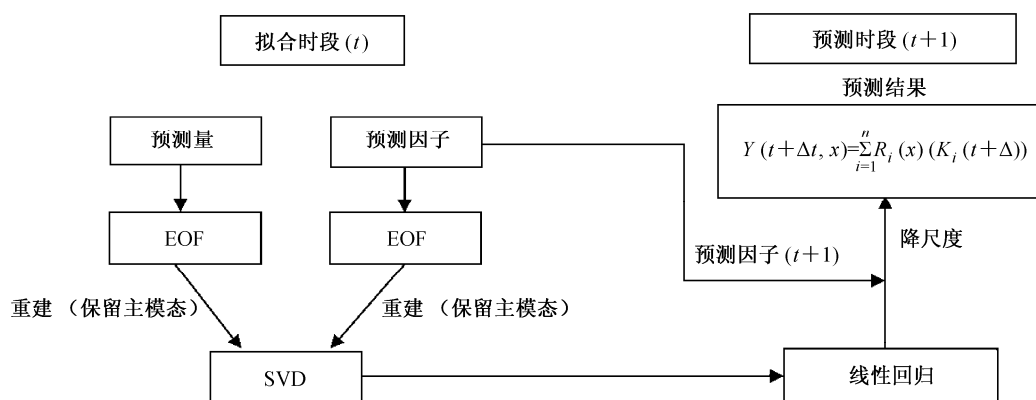


图2 场信息耦合型统计降尺度方法示意图 $Y(t+\Delta t)$ 为预报年的降水值, $R_i(x)$ 为降水的 SVD 空间模态, $\hat{K}(t+\Delta t)$ 为预报年的 SVD 时间系数。

Fig. 2 The sketch map of the field information coupled patterns statistical downscaling method

因此, CFS 模式对 1982~2011 年夏季 500 hPa 高度场的回报能力较好, 本研究将考虑利用夏季 GH5 为预测因子, 建立统计降尺度模型。

中国夏季降水与泛东亚地区 GH5 的 SVD 第一模态空间分布以及对应的时间系数由图 4 给出。对于观测情形, 由图 4c 可以看出, GH5 场在泛东亚地区中高纬为代表冷空气活动的高度异常场; 在日本—中太平洋上空存在着一个异常的 PJ (Pacific–Japan) 波列 (Nitta, 1987; Nitta and Hu, 1996)。PJ 遥相关分布型与中国的气候变化有着密切的联系, 例如, 影响西太平洋副热带高压和中国降水 (Huang and Li, 1987; Kosaka and Nakamura, 2006)。而热带及其以南地区则代表了南半球通过越赤道气流等系统的作用, 对中国降水产生影响。降水场中, 中国的东部地区大体呈现出南北多中间少 (南北少中间多) 的中国降水典型空间分布特征 (图 4e)。相对于观测情形, 在 CFS 中 GH5 的 SVD 模态空间分布场中, 其热带地区大片带状负值区分裂为两块, 而存在于东亚东北部地区的正值中心消失, 取而代之的是在偏东的地方出现了一个负值的高值中心 (图 4c、d)。而相应的降水场中, CFS 回报出了除东北地区的中国东部大部分地区的异常降水型 (图 4a、b)。在观测与 CFS 中 SVD 第一模态对应的时间系数之间相关都超过了 0.8 (图 4e、f)。

ENSO (El Niño–La Niña) 存在于热带太平洋, 是海气相互作用的重要系统。它是全球天气和气候年际变化的重要原动力之一 (Kiladis and Diaz, 1989), 影响着全球气候的年际变化 (Webster et al., 1998), 也是短期气候预测一个重要的基础。虽然 ENSO 与东亚夏季风之间的关系在长期变化中显示

出不稳定特征 (Wang, 2002), 但它仍然是引起中国降水变化的主要外强迫因子之一。一般来讲, El Niño 易于导致弱的夏季风, 而 La Niña 易于导致强的夏季风 (Wang et al., 1999)。当发生 El Niño 时, 纬向 Walker 环流的上升支东移, 西太平洋副热带高压偏强, 东亚季风偏弱, 容易导致中国南方地区降水偏多, 北方偏少; 而发生 La Niña 时, 情况相反 (Bjerknes, 1966, 1969; 臧恒范和王绍武, 1984; 任富民等, 2012)。许多学者利用 ENSO 信号对降水进行预测预报 (Ropelewski and Halpert, 1987; Jain and Lall, 2001; Maity and Kumar, 2006)。1982~2011 年中国夏季降水 EOF 第一模态的时间系数与 1981~2010 年秋、冬季 SST 的 EOF 第一模态的时间系数的相关系数可以达到 0.52 (超过 99% 信度检验水平)。

1982~2011 年夏季降水与 1981~2010 秋冬季 SST 的 SVD 第一模态由图 5 给出。可以看到, SST 的 SVD 第一模态为 ENSO 的典型分布型, 表现为热带中东太平洋和热带西太平洋呈现相反的变化趋势 (图 5b), 而对应此 ENSO 型分布的中国夏季降水为北方大部分地区和华南、长江下游之间相反的降水趋势, 且雨带呈现东北—西南走向, 而不是经典的准东西走向的“三明治”雨带分布特征。降水与 SST 的 SVD 第一模态对应的时间系数之间的相关系数为 0.85。同时, 可以看到, 在 2000 年前后, 时间系数出现了一个转型期。Zhu et al. (2011) 指出, 中国东部雨带在 2000 年前后出现了转型, 其原因在于: 太平洋年代际涛动 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 在 2000 年前后同样出现了转型, 这就影响了西风急流以及中高纬环流, 从而导致中

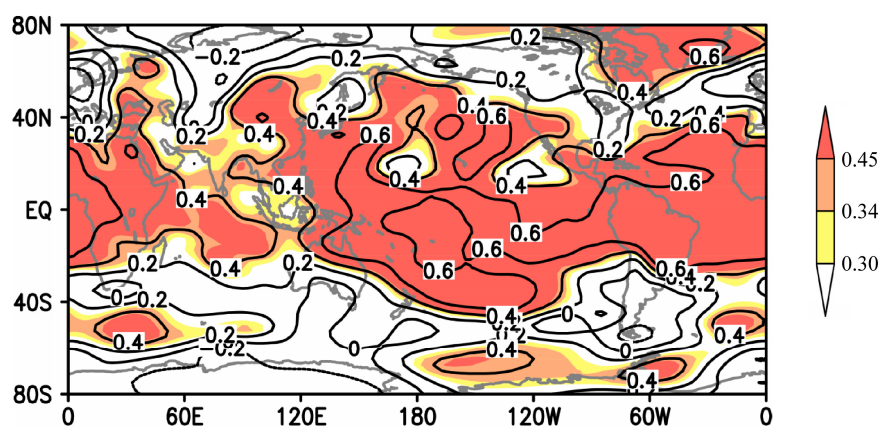


图3 1982~2011年 CFS 模式与观测的夏季 GH5 相关场。阴影区颜色由浅到深分别代表 90%、95% 以及 99% 的信度检验水平

Fig. 3 The correlation coefficients for summer 500 hPa geopotential height between the reanalysis data (NCEP) and Climate Forecast System output during 1982–2011. The shaded areas (from light to dark) correspond to 90%, 95%, and 99% confidence levels, respectively

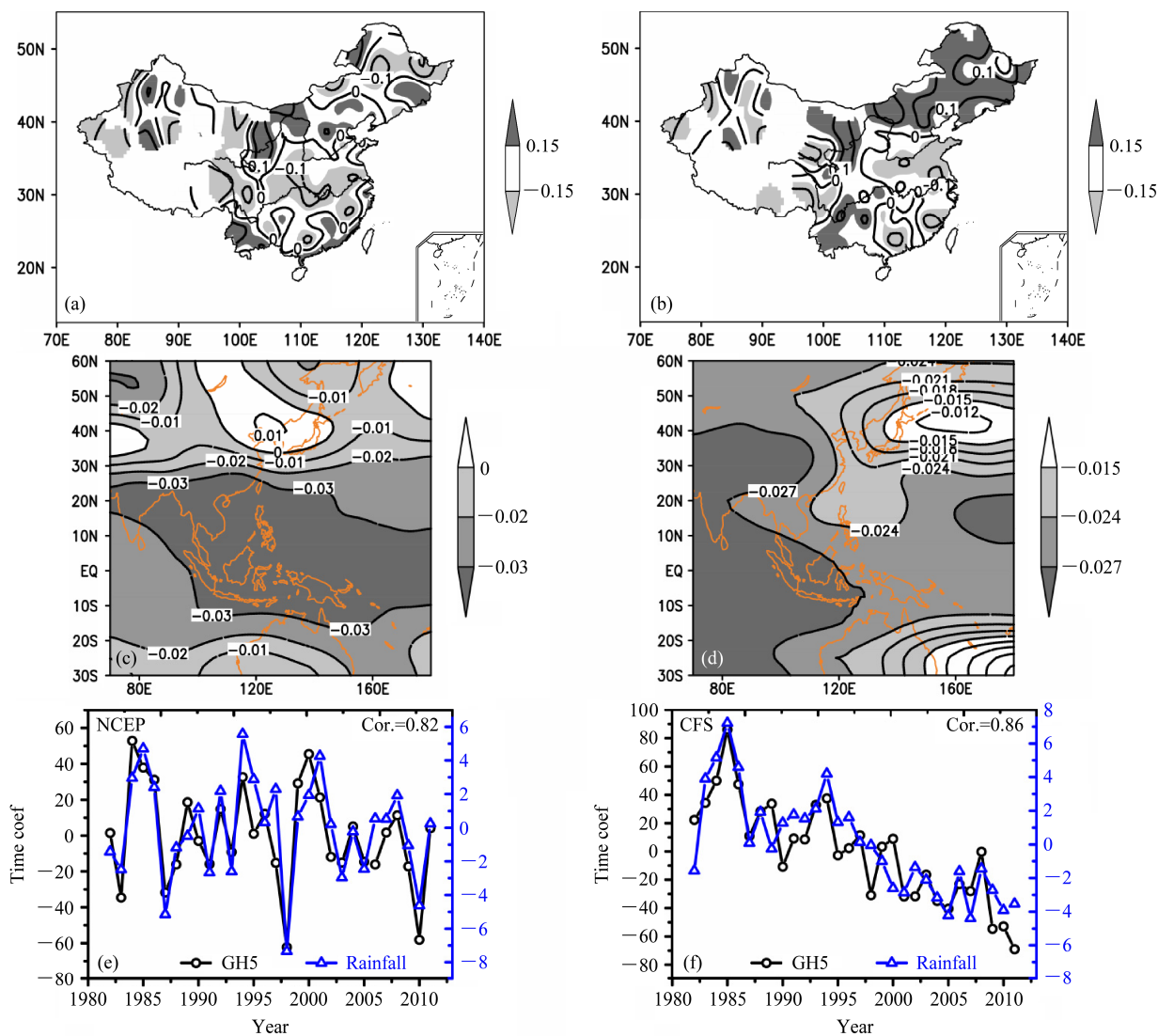


图4 1982~2011 夏季 (a, b) 中国观测站点降水、(c, d) 泛东亚地区 GH5 的 SVD 第一模态空间分布型以及 (e, f) 对应的时间系数。(a, c, e) 基于 NCEP 资料, (b, d, f) 基于 CFS 模式资料

Fig. 4 The first leading SVD modes for the observed rainfall in China and the GH5 over Pan-East Asia, and the corresponding time coefficients during 1982–2011 summers. (a, c, e) Based on the NCEP dataset; (b, d, f) based on the CFS GCM output

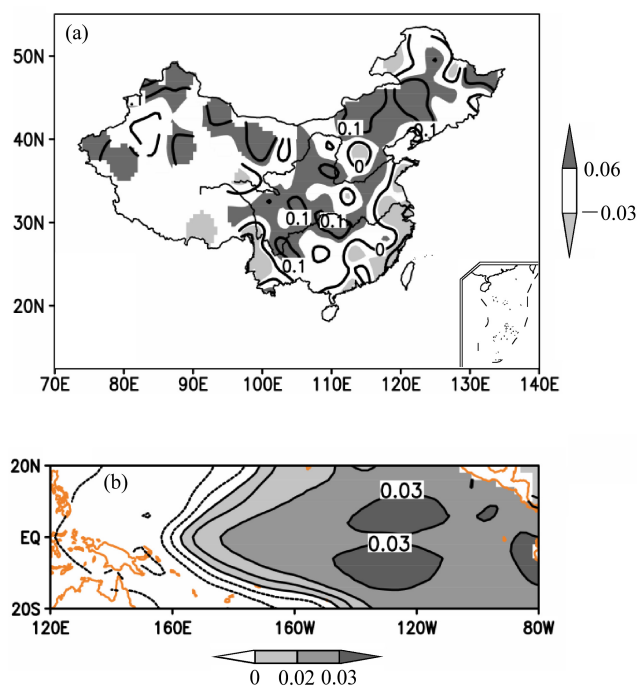


图 5 1982~2011 夏季中国观测站点降水 (a) 与 1981~2010 年秋冬热带太平洋 SST (b) 的 SVD 第一模态空间分布型以及对应的时间系数 (c)

Fig. 5 The first leading SVD modes of the (a) observed rainfall in China during 1982–2011 summers and (b) 1982–2010 autumn–winter SST over the tropical Pacific, and (c) the corresponding time coefficients

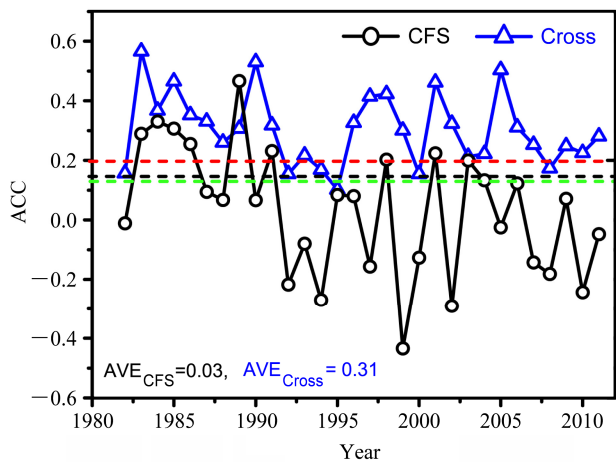


图 6 1982~2011 年观测数据与 CFS 模式原始数据 (黑色) 以及降尺度结果 (蓝色) 夏季降水空间距平相关系数。AVE 为多年平均值, Cross 代表交叉检验降尺度结果。绿色、黑色和红色虚线分别代表了 90%、95% 和 99% 的信度检验水平。

Fig. 6 The spatial anomaly correlation coefficients of summer precipitation between the observations and the CFS GCM output as well as the downscaling result. AVE and Cross represent the multi-year average and the cross validation results of downscaling. The green, black, and red dashed lines correspond to the 90%, 95%, and 99% confidence levels

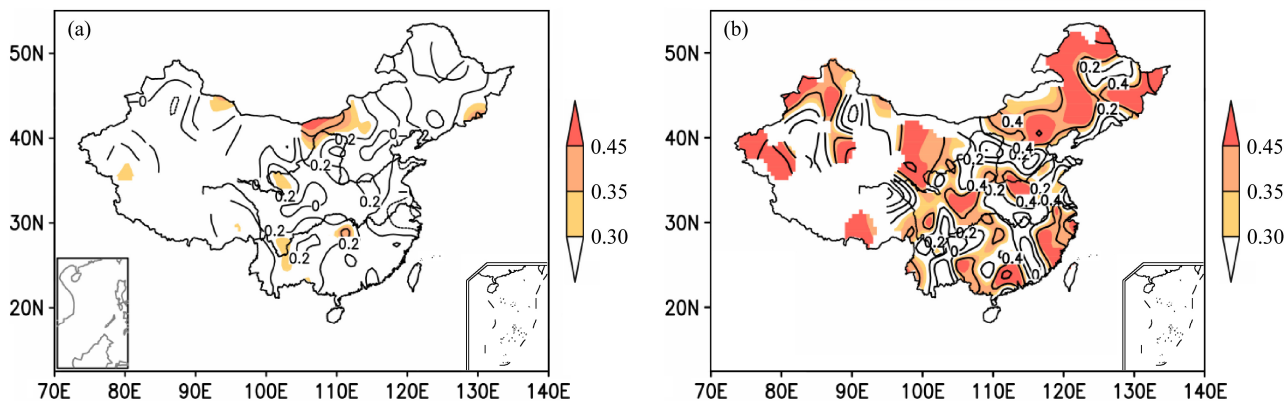


图 7 观测与 CFS 模式原始结果 (a) 以及降尺度结果 (b) 夏季降水的时间距平相关系数的空间分布。阴影区颜色由浅到深分别代表 90%、95% 以及 99% 的信度检验水平

Fig. 7 The anomaly correlation coefficients of summer precipitation between the observation and (a) the original CFS output, (b) the downscaling result. The shaded areas (from light to dark) correspond to 90%, 95%, and 99% confidence levels, respectively

国雨带的变化。

5 统计降尺度预测结果

由于建模和检验的时段为 1982~2011 年, 因此我们采用去掉一年的交叉检验方法来对降尺度模型进行检验。图 6 给出了观测与模式结果以及降尺度结果的降水量之间的空间距平相关系数 ACC (Anomaly Correlation Coefficient)。降尺度模型将 30 年平均的 ACC 从模式原始结果的 0.03 提高到 0.31, 且在 97% 年中降尺度结果的 ACC 都超过了 95% 的信度检验水平, 在 80% 的年份中 ACC 超过了 99% 的信度检验水平 (图 6), 最大值可以达到 0.6。同时, 对于 30 年的时间距平相关系数 TCC 的空间场来讲, CFS 模式原始结果的 TCC 只有在内蒙古的部分地区, 相关系数通过了显著性检验, 其他大部分地区的相关系数均小于 0.3 (图 7a)。而降尺度结果与观测数据之间在中国的西北、东北大部、黄淮、华南以及西南地区都具有显著的相关系数, 最大值可以达到 0.6 (图 7b)。因此, 降尺度模型显著提高了 1982~2011 年中国夏季降水的时间 TCC 和空间 ACC。

那么, 我们又比较了降尺度结果的均方根误差 (RMSE, Root Mean Square Error) 与模式原始结果 RMSE 之间的差异。 P_{RMSE} (RMSE 的降低百分率) 的表达式为:

$$P_{RMSE} = \frac{E_{GCM} - E_{SD}}{E_{GCM}} \times 100\%, \quad (2)$$

其中, E_{GCM} 和 E_{SD} 分别代表模式原始结果和降尺度结果的 R_{MSE} , P_{RMSE} 大于零且绝对值越大, 说明降尺度结果越接近于观测值。

图 8 为 1982~2011 年 P_{RMSE} 空间分布情况, 对于全国的 160 个站来讲, 除个别站点之外, 大多数站点的 P_{RMSE} 都大于零。降尺度结果的 RMSE 比模式原始结果的 RMSE 最多可减小 40% 以上。因此, 此降尺度模型回报的 1982~2011 年夏季降水在量级上较 CFS 模式原始结果更加接近观测数据。

由前面的分析可以看到, 此降尺度模型夏季降水预测能力在 1982~2011 年的总体 (平均) 水平较高, 那么, 对具体年份的预测效能如何呢? 1982~1983 年发生了较强的 El Niño 事件, 而中国地区的长江流域在 1983 年夏季出现洪涝, 华北及华南地区普遍干旱 (图 9a)。实际预测业务中, 1983 年的夏季降水预报评分 (PS 评分) 不到 45 分。而

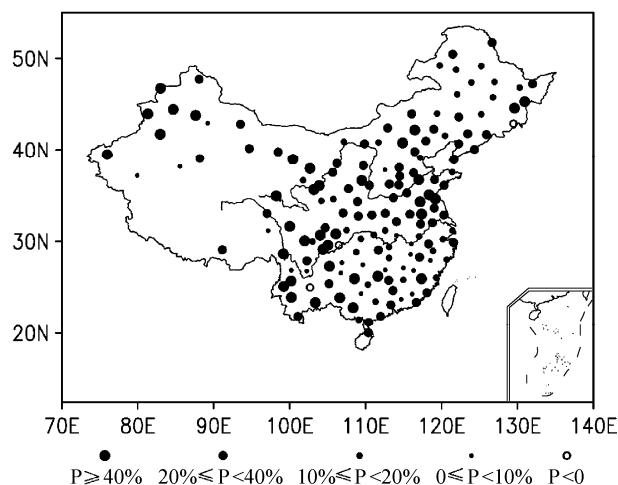


图 8 1982~2011 年 P_{RMSE}

Fig. 8 The decreased percentage of RMSE (P_{RMSE}) during 1982–2001

CFS 模式将中国东部大部分地区回报了降水正距平 (图 9b), 与实际降水型相差较大。经过降尺度之后, 此降尺度模型大体回报出了“+ - +”的降水距平空间分布型 (图 9c), PS 评分提高到了 87 分。同样, 此模型对于 2006 年夏季降水的预测较 CFS 模式原始结果, 以及历史实际业务预测都有显著提高。此模型回报出了中国东部地区“+ - +”的降水距平空间分型 (图 9d、f), PS 评分也从 67 分提高到 85 分。1982 年 (2005 年) 秋冬季, 赤道中东太平洋地区出现了显著的海温异常偏高 (偏低) 现象, 使得亚洲季风环流减弱 (增强) (Wang et al., 1999), 最终导致雨带的偏南 (偏北)。因此, 赤道太平洋地区的海温是夏季降水预测的重要因素之一。

我们又对 2011 年夏季的降水距平百分率做了检验, 公式为:

$$P = \frac{R - \bar{R}}{\bar{R}} \times 100\%, \quad (3)$$

其中, P 代表降水距平百分率, R 为某一站点的某年降水量, $\bar{R}$ 为某站点降水量的气候平均态, 这里为 1982~2011 年。 P 大于 13% 表示降水偏多, P 小于 -13% 表示降水偏少 (王绍武等, 1999), P 介于两者之间表示降水正常。

图 10 为 2011 年夏季降水距平百分率的情况。2011 年夏季东北大部分地区降水偏少, 同时在西南地区以及华南也出现了较严重的干旱现象, 而在长江下游地区的降水偏多, 西北地区大部分地区降水偏多 (图 10a)。图 10b 为回报的 2011 年汛期降水情况。东北地区的偏旱, 以及长江下游地区的降水

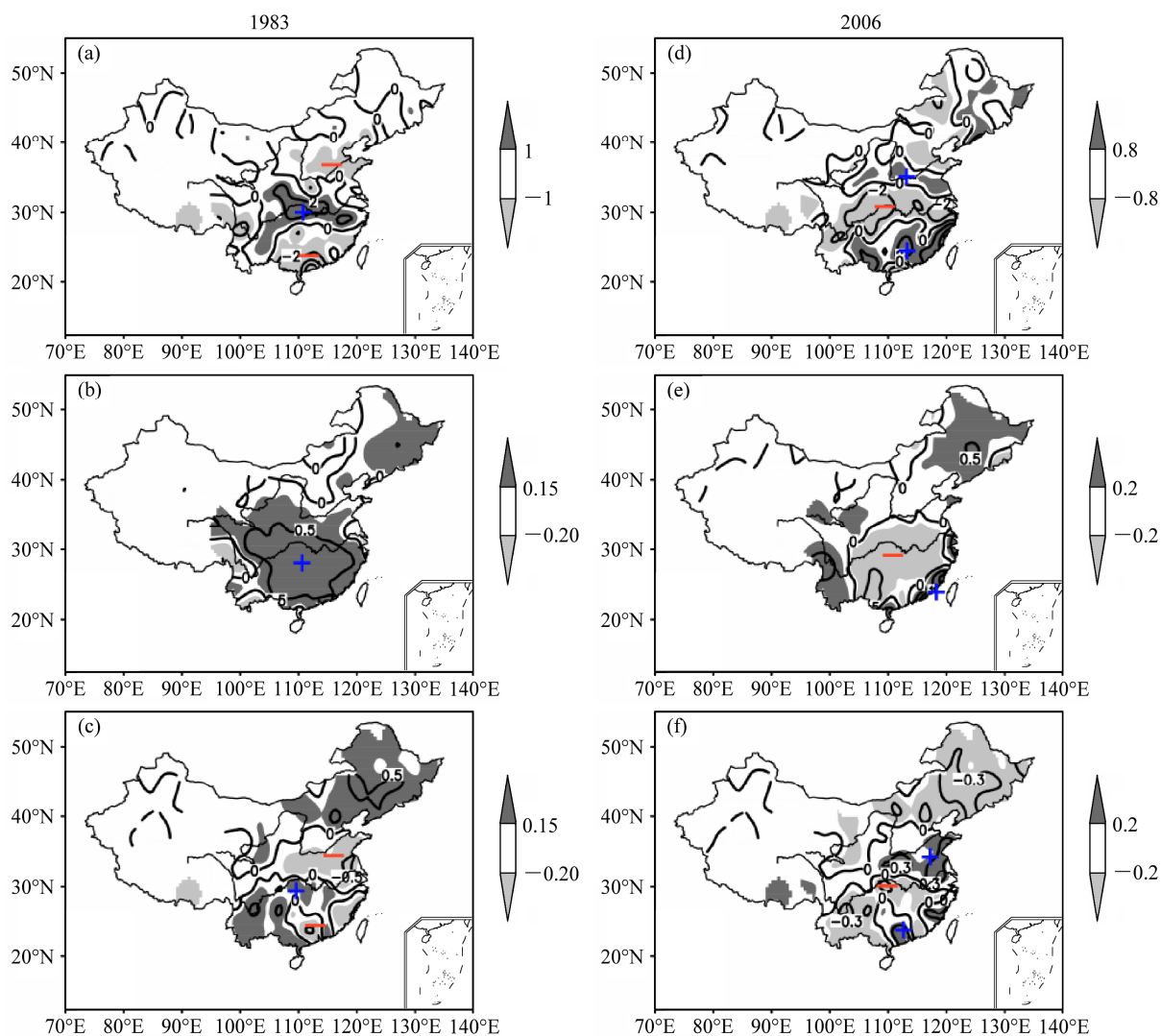


图9 (a, b, c) 1983 年和 (d, e, f) 2006 年夏季降水距平空间分布型: (a, d) 观测数据, (b, e) CFS 模式原始结果, (c, f) 降尺度结果。单位: mm d^{-1}

Fig. 9 The spatial patterns of summer precipitation anomalies in (a, b, c) 1983 and (d, e, f) 2006. (a, d), (b, e), and (c, f) represent observations, CFS output, and the downscaling result, respectively. Units: mm d^{-1}

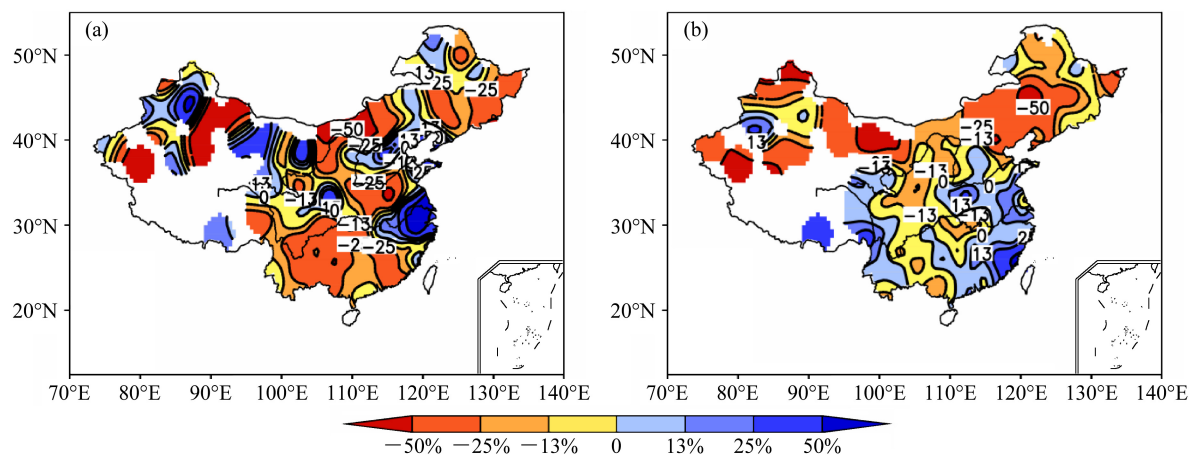


图10 2011 年夏季降水距平百分率空间分布型: (a) 观测数据; (b) 降尺度结果

Fig. 10 The patterns of the 2011 summer precipitation anomaly percent from (a) observations and (b) downscaling result

偏多都较好的回报了出来, 然而对于西南地区干旱, 预测的结果偏弱, 而华南地区的降水偏少没有回报出来, 回报结果与观测之间的 ACC 为 0.28。总体来讲, 此预测模型回报出了 2011 年汛期主要的降水区。

基于前面对此预测模型的回报检验, 我们利用 1982~2012 年每年 2 月起报的 GH5 的 CFS 模式资料以及 1981~2011 年秋冬季 SST 建立预测模型, 对 2012 年夏季降水进行预测 (图略)。2012 年汛期预测结果显示, 在东北地区、内蒙古地区以及长江中游的小部分地区降水偏少, 在黄淮、长江下游以及华南地区降水偏多。

6 结论

本文利用同期夏季 CFS 实时预测模式资料以及前期秋、冬季观测资料, 针对中国 1982~2011 年夏季站点降水建立了以场信息耦合型为建模方法的统计降尺度预测模型。此降尺度模型引入的两个预测因子, 分别为泛东亚地区 CFS 模式资料的 GH5 和热带太平洋地区观测资料的 SST。文中分析了预测因子与预测量之间的 SVD 第一模态对, 结果显示, 两预测因子与预测量之间不仅有明晰的物理过程, 而且具有显著的统计关系。

此降尺度模型对 1982~2011 年中国夏季降水的回报效果较 CFS 模式原始结果显著提高, 表现为距平相关系数(ACC)的提高和均方根误差(RMSE)的降低。此模型较好回报出了 1983 年和 2006 年中国夏季降水距平的空间分布型, 说明 ENSO 信号是影响中国夏季降水的重要因素之一。同时, 该模型较好的回报出了 2011 年汛期降水的距平百分率的空间分布型, 空间距平相关系数可以达到 0.28。因此, 此降尺度模型有效结合前期因子与同期因子的综合作用, 能够获取天气系统更多的同期和滞后效应, 从而影响中国夏季降水, 为夏季降水的预测提供有价值的信号。

参考文献 (References)

- Bjerknes J. 1966. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature [J]. *Tellus*, 18: 820–829.
- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 97: 163–172.
- 陈官军, 魏凤英, 巩远发. 2010. NCEP/CFS 模式对东亚夏季延伸预报的检验评估 [J]. *应用气象学报*, 21 (6): 659–670. Chen G J, Wei F Y, Gong Y F. 2010. Assessing the extended range forecast error of NCEP/CFS in the summer of East Asia [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 21 (6): 659–670.
- Chen H P, Sun J Q, Wang H J. 2012. A statistical downscaling model for forecasting summer rainfall in China from DEMETER hindcast datasets [J]. *Wea. Forecasting*, 27: 608–628.
- Fan K, Wang H J. 2009. A new approach to forecasting typhoon frequency over the western North Pacific [J]. *Wea. Forecasting*, 24 (4): 974–978.
- 范可, 王会军, Choi Young-Jean. 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. 2008. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of the Yangtze River valley summer rainfall [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53 (4): 602–609.
- 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. 2009. Forecasting the summer rainfall in North China using the year-to-year increment approach [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 52 (4): 532–539.
- Gao H, Yang S, Kumar A, et al. 2011. Variations of the East Asian Meiyu and simulation and prediction by the NCEP Climate Forecast System [J]. *J. Climate*, 24: 94–108.
- Gu W Z, Chen L J, Li W J, et al. 2011. Development of a downscaling method in China regional summer precipitation prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 25 (3): 303–315.
- Huang R H, Li W J. 1987. Influence of the heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia [C]// *Proc. International Conference on the General Circulation of East Asia*, 40–51.
- Jain S, Lall U. 2001. Floods in a changing climate: Does the past represent the future? [J]. *Water Resour. Res.*, 37: 3193–3205.
- Jolliffe I T. 1972. Discarding variables in a principal component analysis. I: Artificial data [J]. *Applied Statistics*, 21: 160–173.
- Jolliffe I T. 2002. *Principal Component Analysis (2nd ed.)* [M]. New York: Springer, 487pp.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–471.
- Kiladis G N, Diaz H F. 1989. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation [J]. *J. Climate*, 2: 1069–1090.
- Kosaka Y, Nakamura H. 2006. Structure and dynamics of the summertime Pacific–Japan teleconnection pattern [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 132: 2009–2030.
- Lang X M, Wang H J. 2010. Improving extraseasonal summer rainfall prediction by merging information from GCMs and observations [J]. *Wea. Forecasting*, 25: 1263–1274.
- Liu Y, Fan K. 2012a. A new statistical downscaling model for autumn precipitation in China [J]. *Int. J. Climat.*, doi: 10. 1002/joc. 3514.
- Liu Y, Fan K. 2012b. Prediction of spring precipitation in China using a downscaling approach [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 118: 79–93.
- Maity R, Kumar D N. 2006. Bayesian dynamic modeling for monthly Indian summer monsoon rainfall using El Niño–Southern Oscillation (ENSO) and Equatorial Indian Ocean Oscillation (EQUINOO) [J]. *J. Geophys. Res.*, 111: D07104.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their

- impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65: 373–390.
- Nitta T, Hu Z Z. 1996. Summer climate variability in China and its association with 500-hPa height and tropical convection [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74: 425–445.
- 任富民, 袁媛, 孙丞虎, 等. 2012. 近 30 年 ENSO 研究进展回顾 [J]. *气象科技进展*, 2 (3): 17–23. Ren F M, Yuan Y, Sun C H, et al. 2012. Review of progress of ENSO studies in the past three decades [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2 (3): 17–23.
- Ropelewski C F, Halpert M S. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 1606–1626.
- Saha S, Nadiga S, Thiaw C, et al. 2006. The NCEP climate forecast system [J]. *J. Climate*, 19: 3483–3517.
- Smith T M, Richard W R, Thomas C P, et al. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880–2006) [J]. *J. Climate*, 21: 2283–2296.
- Sun J Q, Chen H P. 2012. A statistical downscaling scheme to improve global precipitation forecasting [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 117: 87–102.
- 王会军. 1997. 试论短期气候预测的不确定性 [J]. *气候与环境研究*, 2 (4): 333–338. Wang H J. 1997. A preliminary study on the uncertainty of short-term climate prediction [J]. *Climatic and Environmental Research*, (in Chinese), 2 (4): 333–338.
- Wang H J. 2002. The instability of the East Asian summer monsoon ENSO relations [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19: 1–11.
- Wang H J, Fan K. 2009. A new scheme for improving the seasonal prediction of summer precipitation anomalies [J]. *Wea. Forecasting*, 24 (2): 548–554.
- Wang H J, Zhang R H, Julie C, et al. 1999. El Niño and the related phenomenon Southern Oscillation (ENSO): The largest signal in interannual climate variation [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96: 11071–11072.
- 王绍武, 龚道溢, 陈振华. 1999. 近百年来中国的严重气候灾害 [J]. *应用气象学报*, 10: 43–53. Wang S W, Gong D Y, Chen Z H. 1999. Serious climatic disasters of China during the past 100 years [J]. *Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese)*, 10: 43–53.
- Webster P J, Magana V O, Palmer T N, et al. 1998. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction [J]. *J. Geophys. Res.*, 103: 14451–14510.
- Wilks D S. 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (2nd ed.) [M]. New York: Wiley, 627pp.
- Yang S, Zhang Z, Kousky V E, et al. 2008. Simulations and seasonal prediction of the Asian summer monsoon in the NCEP Climate Forecast System [J]. *J. Climate*, 21: 3755–3775.
- Yuan X, Liang X Z. 2011. Improving cold season precipitation prediction by the nested CWF-CFS system [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38: L02706.
- 臧恒范, 王绍武. 1984. 赤道东太平洋水温对低纬大气环流的影响 [J]. *海洋学报*, 6: 16–24. Zang H F, Wang S W. 1984. The impact on atmospheric circulation at low latitude by sea surface temperature over tropical eastern Pacific [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 6: 16–24.
- 曾庆存, 王会军, 林朝晖, 等. 2003. 气候动力学与气候预测理论的研究 [J]. *大气科学*, 27 (4): 468–483. Zeng Q C, Wang H J, Lin Z H, et al. 2003. A study of the climate dynamics and climate prediction theory [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2 (4): 333–338.
- Zhu C W, Park C K, Lee W S, et al. 2008. Statistical downscaling for multi-model ensemble prediction of summer monsoon rainfall in the Asia-Pacific region using geopotential height field [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (5): 867–884.
- Zhu Y L, Wang H J, Zhou W, et al. 2011. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation [J]. *Climate Dyn.*, 36: 1463–1473.