

张丽霞,周天军. 2020. 夏季亚洲对流层中上层温度年际变率的预测水平评估及其在我国东部降水预测中的应用 [J]. 大气科学, 44(1): 150-167. ZHANG Lixia, ZHOU Tianjun. 2020. Evaluation on the Prediction Skill of the Interannual Variability of Summer Asian Upper Tropospheric Temperature and Its Application to Prediction of Precipitation in Eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(1): 150-167. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1906.18244

夏季亚洲对流层中上层温度年际变率的预测水平评估及其在我国东部降水预测中的应用

张丽霞^{1,2} 周天军^{1,3}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG), 北京 100029

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 夏季亚洲对流层温度异常与中国东部夏季降水紧密相关并可能作为降水的有效预报因子。基于欧盟ENSEMBLES计划的季节预测试验耦合模式每年5月1日开始的回报试验, 分析了其对1960~2005年夏季亚洲对流层中上层温度(以200~500 hPa厚度替代, 简称对流层温度)年际变率的预测结果, 发现模式集合平均对夏季亚洲对流层温度年际变率具有较高的预报技巧, 可以合理回报其前两个EOF(Empirical Orthogonal Function)主导模态(EOF1、EOF2), 只是未能回报出EOF2高纬度的温度异常, 模式集合平均预测的第一模态主成分(PC1)和第二模态主成分(PC2)与再分析资料的时间相关系数分别达到0.63和0.77。再分析资料中前两个EOF模态分别由ENSO(El Niño - Southern Oscillation)发展年印度夏季降水异常所激发的丝绸之路遥相关波列和ENSO衰减年西北太平洋夏季降水异常对应的太平洋—日本遥相关波列导致。ENSEMBLES计划可以合理预测出相应的海温异常及遥相关波列, 进而合理预测出前两个EOF模态。对流层温度PC1和PC2分别表征了欧亚大陆与周围海洋之间的纬向和经向热力对比异常, 模式对由PC1的预报技巧远高于前人定义的纬向热力对比的东亚夏季风指数, 对前人定义的经向热力对比指数的预测技巧与PC2相当。将PC1和前人定义的经向热力对比指数作为预报因子, 建立了中国夏季降水的动力—统计降尺度预测模型, 交叉检验的结果表明该预报模型显著提高了东北和长江流域上游夏季降水的预报技巧。本文提出的亚洲对流层温度年际变率的EOF1及PC1, 既能较好表征纬向热力对比与中国东部夏季降水显著相关, 又能被模式合理预测, 可以作为我国中高纬度地区, 特别是东北地区降水的重要预测因子之一。

关键词 季节预测 可预报性 动力—统计降尺度预测模型 对流层温度

文章编号 1006-9895(2020)01-0150-18

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1906.18244

Evaluation on the Prediction Skill of the Interannual Variability of Summer Asian Upper Tropospheric Temperature and Its Application to Prediction of Precipitation in Eastern China

ZHANG Lixia^{1,2} and ZHOU Tianjun^{1,3}

1 Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

收稿日期 2018-10-30; 网络预出版日期 2019-06-04

作者简介 张丽霞, 女, 1982年出生, 副研究员, 主要从事季风变化的观测分析和数值模拟研究。E-mail: lixiazhang@mail.iap.ac.cn

通讯作者 周天军, E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41675076

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41675076)

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Variations in Asian upper tropospheric temperature during summer is closely related to, and may, indeed, serve as a useful predictor of East Asian precipitation. The predictability of these interannual variations in summer UTT (upper tropospheric temperature, represented by 500–200 hPa thickness) for the period 1960–2005 in the ENSEMBLES multi-model seasonal forecast, initiated 1 May every year, was examined in this study. Results showed that the interannual variability of Asian UTT in summer was skillfully predicted by ENSEMBLES, as measured by the good prediction of its standard deviation centers in the mid-latitude and high correlation coefficient of its first two leading interannual variability modes compared with observations. The main deficiency of the multimodel ensemble mean (MME) was that the temperature at high-latitudes could not be captured. The correlation coefficients of the first (PC1) and second (PC2) principle components in the MME with those from NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) reanalysis were 0.63 and 0.77, respectively. The first two leading models of Asian UTT in summer in observation were dominated by (1) the silk-road teleconnection at the upper troposphere forced by Indian monsoon precipitation anomalies in an ENSO-developing summer, and (2) the Pacific–Japan teleconnection forced by northwestern Pacific Ocean rainfall anomalies in an ENSO-decaying summer, respectively. These processes were well-predicted by ENSEMBLES; thus, a high prediction skill for Asian summer UTT was shown in ENSEMBLES. The first two leading modes of Asian summer UTT well-represented the zonal and meridional thermal contract variation. A comparison with two previous widely-used East Asian Summer Monsoon (EASM) indices was performed; results showed a much better predictive outcome for PC1 than for the traditional zonal thermal contrast. Using PC1 of Asian summer UTT and the traditional meridional EASM index as two predictors of summer precipitation over eastern China, a dynamical–statistical forecast model was established. The cross-validation results showed that the new forecast model significantly improved the predictive skill of summer precipitation over Northeast China and the upper stream of the Yangtze River. The first leading mode of Asian summer UTT and corresponding PC could well represent the zonal thermal contrast, which has a correlative relationship with summer precipitation over eastern China, and can be well-predicted by climate models. It can effectively serve as one predictor of summer precipitation over mid-latitude China, particularly northeastern China.

Keywords Seasonal forecasting, Predictability, Dynamical–statistical forecast model, Tropospheric temperature

1 引言

我国东部地处季风区，夏季降水受到热带和中高纬度环流系统的共同影响，气候变率较大，气候异常所造成的旱涝灾害，常给我国国民经济和社会生活造成严重损失。因此，理解季风年际异常的产生机理并准确预测其变化，可以为我国开展防灾、减灾提供重要的科学基础。利用数值模式开展短期气候预测，是当前季节预测的重要手段。然而，当前气候模式对东亚夏季风降水的模拟能力（Chen et al., 2010; Li et al., 2010）和预测能力（Yang et al. 2008; Wang et al., 2009; Lee et al., 2010）均亟待提高。值得注意的是，动力气候模式对大尺度环流的预测效果优于降水，因此，选取与降水有关且模式具有较好预测水平的大尺度环流预测因子，开展降

水的动力—统计降尺度预测，成为当前开展夏季降水预测的重要方法之一。

当前模式对东亚夏季降水的模拟和预测能力有限，如参加“第二次季节预测模式比较计划”（SMIP2）的模式难以预测夏季降水年际变化的第一主导模态，在整个亚洲季风区，模式对东亚季风降水的预测能力最差（施洪波等, 2008）。基于 CliPAS (Climate Prediction and its Application to Society) 季节预测试验结果的研究 (Wang et al., 2009) 表明，模式对夏季降水的预测技巧亦主要体现在热带地区，东亚地区的预测技巧几乎为零。亚洲季风降水可预报性较低的问题同样出现在 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) System4 和 NCEP CFSv2 (National Centers for Environmental Prediction,

Climate Forecast System (CFS) Version 2) 两个季节回报试验中 (Kim et al., 2012)。当前国家气候中心 (BCC) 第二代季节预测模式系统对东亚地区降水与温度的可预报性仍然不高, 虽能部分分辨出长江流域及黄河流域的正负异常事件, 但对我国东北和西北地区的夏季降水仍无预报能力 (吴捷等, 2017)。因此, 如何提高气候模式对东亚夏季风降水异常的短期气候预测能力, 依然是气候数值模拟界面临的挑战性问题。

在选择大尺度环流开展降水的动力—统计预测模型时需要满足三个条件: (1) 所选环流系统与降水具有较高的相关性, 具有一定的物理联系; (2) 模式对环流具有一定的预报技巧; (3) 所选环流与降水具有较好的相关, 便于利用模式信息建立预测模型。基于上述标准, 前人对大尺度环流预报因子的选取有多种方法, 例如, 500 hPa 位势高度 (陈丽娟等, 2003; Zhu et al., 2008; 魏凤英和黄嘉佑, 2010)、海平面气压 (Liu and Ren, 2015; Liu et al., 2018)、高原雪盖和海温因子 (彭京备等, 2006; 刘颖等, 2017)、南极涛动 (范可和王会军, 2006)、最优多因子动态配置 (熊开国等, 2012) 等。考虑到对流层温度分布不均所形成的海陆热力差异, 是东亚季风异常的重要驱动因子之一, 对亚洲夏季风爆发 (何金海等, 2007, 2008)、季风强度和雨季持续时间 (Goswami and Xavier, 2005; 朱艳峰等, 2010)、东亚夏季风年代际减弱 (Yu et al., 2004; 宇如聪等, 2008) 等均具有重要作用。根据夏季对流层中高层涡动温度定义的“亚洲—太平洋涛动 (APO)”指数, 对于描述季风的年代际变化具有重要参考价值 (Zhao et al., 2007; 赵平等, 2008; 周秀骥等, 2009)。基于前春对流层温度建立的统计预测模型, 可以提升我国东部夏季降水的预报能力 (冯蕾等, 2011)。

此外, 当前模式对东亚高层环流的预测技巧明显高于热带地区和低层, 体现出模式对对流层中高层环流较高的预报能力 (Wang et al., 2009)。研究发现, 大气环流模式对对流层温度具有较强的模拟能力, 例如, 利用 SST (sea surface temperature) 强迫大气环流模式 (AGCM) 可以合理再现与 ENSO 相关的纬向平均的热带及副热带的对流层温度异常 (Zhang et al., 2010; Zhou and Zhang, 2011); 当前大气环流模式对东亚夏季风环流的预报技巧, 主要来源于其对经向海陆热力对比的预测能力 (Zhou and Zou, 2010)。北半球夏季对流层上层环

流所对应的前两个 EOF 主导模态, 可以被耦合气候模式较好的预测出来, 尽管地表温度和降水的预报技巧很低 (Lee et al., 2011)。

综上, 亚洲对流层温度一方面可以通过调制海陆热力对比影响东亚降水, 另一方面其作为中高层环流系统, 模式对其可能具有较高的可预报水平, 所以, 如果模式能合理预测夏季亚洲对流层温度变率, 有望通过动力与统计相结合的方法, 进一步提高降水的预报效果。因此, 本文将围绕如下问题开展研究: (1) 当前气候模式对夏季亚洲对流层温度年际变率的预报技巧怎样? 可预报性来源是什么? (2) 采用对流层温度作为中国东部夏季降水的预测因子建立的动力—统计降尺度模型, 能否提高夏季降水的预测技巧? 与前人定义的夏季环流因子相比, 对流层温度作为夏季降水预报因子有何优势?

本文其余部分安排如下: 第二节介绍资料和方法; 第三节讨论模式对夏季对流层温度年际变率的季节预测水平及预报水平来源; 第四节将从模式直接预报效果和降水动力—统计预测模型预测结果两个方面, 将东亚夏季对流层温度变率异常所表征的预测因子与前人定义的的东亚夏季风环流因子作对比, 探讨对流层温度作为夏季降水预测因子的优缺点; 第五节给出本文总结与讨论。

2 资料和方法介绍

2.1 季节预测回报试验资料介绍

本章采用的回报试验数据来自 ENSEMBLES Stream 2 季节一年际 (seasonal-annual) 气候预测试验, 参与此试验的全球大气—海洋耦合模式包括: 欧洲数值中心 (ECMWF) 的 IFS/HOPE 模式、英国国家气象局 (UKMO) 的 HadGEM2/AO 模式、法国气象局 (MF) 的 ARPEGE/OPA 模式、德国基尔大学莱布尼兹海洋科学研究所 (IFM-GEOMAR) 的 ECHAM5/OM1 模式、意大利欧洲地中海气候变化中心 (CMCC-INGV) 的 ECHAM5/OPA8.2 模式。ENSEMBLES 短期气候预测试验按如下方案进行: 自 1960 年起, 分别利用 2 月 1 日、5 月 1 日、8 月 1 日的初值, 连续积分 7 个月进行回报试验, 预报初始日期之后 7 个月的气候。为了减少噪音影响, 上述 5 个模式的预测试验每组均包含 9 个不同初始态的成员, 本文主要选取这 45 组成员的集合平均 (MME) 进行分析, 以克服结果对初值和模

式的依赖性。有关模式试验设计的更多信息, 参见文献(Weisheimer et al., 2009)。之前研究发现, ENSEMBLES对热带太平洋SST和印度夏季风年际变化(Rajeevan et al., 2011)、西北太平洋夏季风(Li et al., 2012)、亚洲副热带西风急流(Li and Lin, 2015), 以及夏季亚洲降水主导模态(Gao et al., 2015; 孙倩等, 2017)等方面, 均具有较好的预报效果。

作为观测依据, 本文还使用如下资料: (1) NCEP/NCAR逐月再分析环流资料(Kalnay et al., 1996); (2)基于2400余个中国地面气象台站观测资料, 通过插值建立的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率的格点化降水数据集(CN05.1)(吴佳和高学杰, 2013); (3)HadISST逐月海表面温度资料(Rayner et al., 2003); (4)PREC逐月降水距平资料(Chen et al., 2002)。ENSEMBLES季节回报试验以及观测资料长度均为1960~2005年, 为了与模式资料分辨率保持一致, 所有资料分辨率均采用双线性插值方法插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 分辨率。为评估ENSEMBLES耦合模式对夏季对流层温度异常的预报效果, 本文仅选取1960~2005年每年5月1日开始回报的夏季(6~8月平均)结果进行分析。

2.2 分析方法介绍

前人研究发现高层温度异常更能表征海陆热力对比(Yu et al., 2004; Li et al., 2008; Zhou and Zou, 2010; Dai et al., 2013), 因此, 本文参照前人工作, 将200~500 hPa平均温度代表对流层温度。由于ENSEMBLES模式数据仅输出200 hPa和500 hPa两层温度, 不能代表200 hPa到500 hPa的平均温度。根据静力平衡关系与状态方程, 可选用200 hPa与500 hPa的位势高度差($Z_{200} - Z_{500}$), 即500~200 hPa厚度, 来代表对流层中上层(200~500 hPa)平均温度(Dai et al., 2013)。

考虑到东亚夏季气候存在显著的年代际变化, 再分析资料数据质量也具有不确定性, 如NCEP/NCAR再分析资料中东亚地区的表面气压及位势高度在1970年代之前系统性地低于客观分析资料和观测资料(Yang et al., 2002; Wu and Kirtman, 2005), 为了去除资料质量、东亚气候长期趋势及年代际变化等带来的不确定性, 本文只关注对流层温度的年际变率, 相应的环流及降水等资料, 均去除了1960~2005年夏季温度的长期趋势, 并利用Fourier方法滤除周期大于8年的年代际变化。

本文采用Wang et al. (2007)提出的“可预测模态分析”(Predictable Mode Analysis, PMA)方法, 即关注ENSEMBLES计划预测回报试验结果对对流层温度变率主导模态的预报技巧, 如果模式能合理预测其EOF主导模态及对应的主成分(PC), 则认为模式具备一定的预报技巧。

3 对流层温度的预报技巧及可预报性来源

图1给出再分析资料(等值线)和各模式预测的集合平均(MME, 阴影)的对流层温度年际变率。再分析资料夏季对流层温度年际变率大值区位于东亚东北部($40^{\circ}\text{--}50^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}\text{--}120^{\circ}\text{E}$)附近, 最高可达40 m, 另外一个变率中心在西北太平洋上空, 但其量值仅为东亚东北地区的1/3。MME能合理回报上述变率大值中心, 与再分析资料的空间相关系数为0.86, 均方根误差为13.6 m, 但是MME预报的东亚东北部地区的变率明显偏弱且位置偏东, 其强度是再分析资料的1/3左右(图1a), 回报的西北太平洋地区对流层温度变率量值与再分析资料相当。MME回报的东亚地区夏季对流层温度变率偏弱, 与采用了多模式集合有关, 此外还与模式预报的位势高度强度偏弱有关(图略)。为此, 图1同时给出5个模式预测结果(图1b-f), 除了ARPEGE4/OPA模式之外, 所有模式均合理预测出再分析资料年际变率的水平分布, 与再分析资料的空间相关系数均在0.85以上, 其中HadGEM2/AO模式的空间相关系数最大(0.94)并且均方根误差最小(10.0 m), 效果高于MME。

图2给出1960~2005年MME及各模式集合平均回报的夏季对流层温度距平与NCEP/NCAR再分析资料之间点点相关系数的空间分布。就MME而言(图2a), 亚洲地区的相关系数以正为主, 整个区域平均的相关系数为0.47, 最小相关系数位于 30°N 长江流域。模式预测的低纬度地区相关系数(0.70)高于中高纬度(0.34), 20°N 以南的热带地区的相关系数均通过了5%显著性检验水平。除了热带地区之外, 另外一个相关系数大值区位于 40°N 以北的中高纬度地区, 且对应了 $Z_{200} - Z_{500}$ 年际变率中心, 说明模式对对流层温度的年际变率预测具有一定的预测能力。5个模式结果与MME相似, 其中ECHAM5/OM1与ECHAM5/OPA8.2两个模式

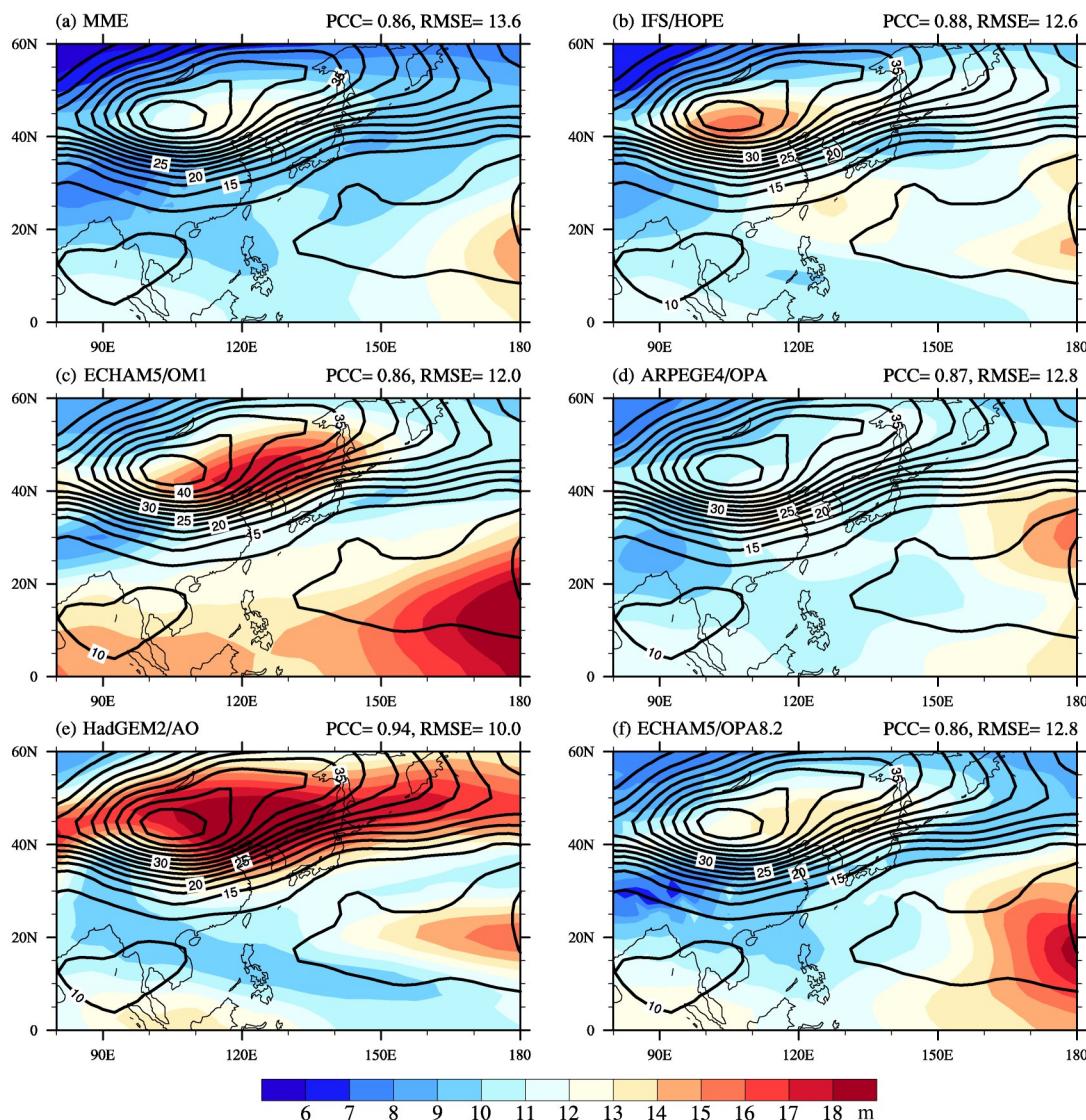


图1 1960~2005年(a-f) NCEP/NCAR再分析资料的 $Z_{200}-Z_{500}$ 标准差分布(等值线, 单位: m)以及(a) MME(各模式预测的集合平均)、(b) IFS/HOPE、(c) ECHAM5/OM1、(d) ARPEGE4/OPA、(e) HadGEM2/AO、(f) ECHAM5/OPA8.2模式预测的 $Z_{200}-Z_{500}$ 标准差分布(阴影, 单位: m)。等值线间隔为2.5 m, 右上角数字为模式预测的与再分析资料的 $Z_{200}-Z_{500}$ 标准差之间的空间相关系数(PCC)和均方根误差(RMSE, units: m)

Fig. 1 Distributions of (a-f) the standard deviations (contours, units: m) of $Z_{200}-Z_{500}$ (the geopotential height differences between 200 hPa and 500 hPa) from the NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) reanalysis data and the standard deviations (shadings, units: m) of $Z_{200}-Z_{500}$ from (a) MME (multimodel ensemble mean), (b) IFS/HOPE model, (c) ECHAM5/OM1 model, (d) ARPEGE4/OPA model, (e) HadGEM2/AO model, (f) ECHAM5/OPA8.2 model predictions during 1960–2005. Contour intervals are 2.5 m. Numbers on the right corner denote the pattern correlation coefficient (PCC) and root mean square error (RMSE, units: m) of the standard deviations of $Z_{200}-Z_{500}$ between models predictions and NCEP/NCAR reanalysis data

中显著正相关系数范围大于其他三个模式, 无论热带还是热带外地区区域平均的相关系数均高于其他三个模式, ARPEGE4/OPA的预报技巧最低。

再分析资料和模式回报的亚洲对流层温度年际变率的前两个EOF主导模态如图3所示。再分析资料前两个EOF模态的解释方差分别为39.5%和

18.3%, 这两个模态通过了North显著性检验准则(North et al., 1982), 表明前两个EOF模态相互独立且显著。MME合理预测出再分析资料中的前两个EOF模态, 只是MME中EOF1(EOF2)对应了再分析资料的EOF2(EOF1), 其前两个EOF模态的解释方差为56.4%和23.7%, 也通过了North显

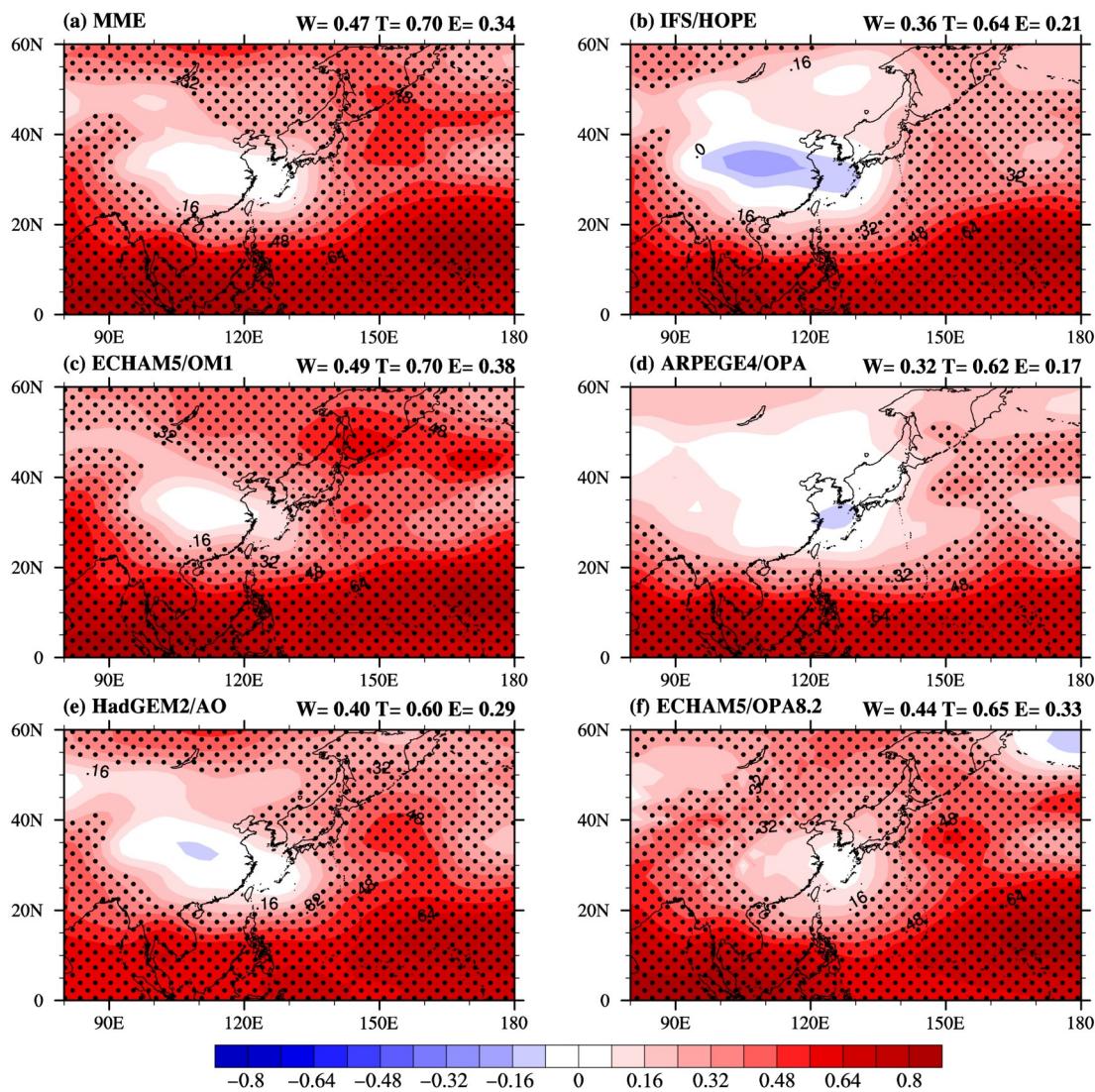


图2 1960~2005年NCEP/NCAR再分析资料夏季 $Z_{200}-Z_{500}$ 距平与(a) MME、(b) IFS/HOPE、(c) ECHAM5/OM1、(d) ARPEGE4/OPA、(e) HadGEM2/AO、(f) ECHAM5/OPA8.2模式提前1个月预测的夏季 $Z_{200}-Z_{500}$ 距平之间的点点相关系数(TCC)分布。打点区域通过了95%信度水平的显著性检验,右上角数字分别代表整个区域($0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$,简写为“W”)、热带地区($0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$,简写为“T”)和热带外地区($20^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$,简写为“E”)区域平均的相关系数

Fig. 2 Temporal correlation coefficients of JJA (June, July, August) $Z_{200}-Z_{500}$ anomalies between the NCEP/NCAR reanalysis data and the one-month-lead predictions by (a) MME, (b) IFS/HOPE model, (c) ECHAM5/OM1 model, (d) ARPEGE4/OPA model, (e) HadGEM2/AO model, (f) ECHAM5/OPA8.2 model during 1960–2005. Dots indicate correlation coefficients statistically significant above the 95% confidence level. Numbers on the right corner of each plot denote the area-averaged correlations over the whole area ($0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$, “W”), tropics ($0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$, “T”), and extratropics ($20^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$, “E”)

著性检验。因此,本文将MME的EOF1和EOF2及相应的PC调整成与再分析资料一致,即图3中MME回报的EOF1和EOF2实际为其回报的EOF2和EOF1。考虑到EOF模态的正负异常与PC的正负有关,为了方便讨论,本文将图3中所示空间型定义为对流层温度年际变率的EOF正模态。再分析资料中EOF1空间型表现为整个亚洲对流层温度

一致的冷异常,中心沿着 40°N ,与高层副热带急流轴的位置一致,表现为中高纬度陆地上空变冷而东部上空相对变暖的东西纬向热力对比异常(图3a)。MME能合理预测出亚洲中高纬度对流层温度一致的冷异常,其与再分析资料EOF1的空间相关系数为0.75。MME回报的主要偏差表现在冷异常中心位于 35°N ,较之再分析资料冷中心位置偏南,

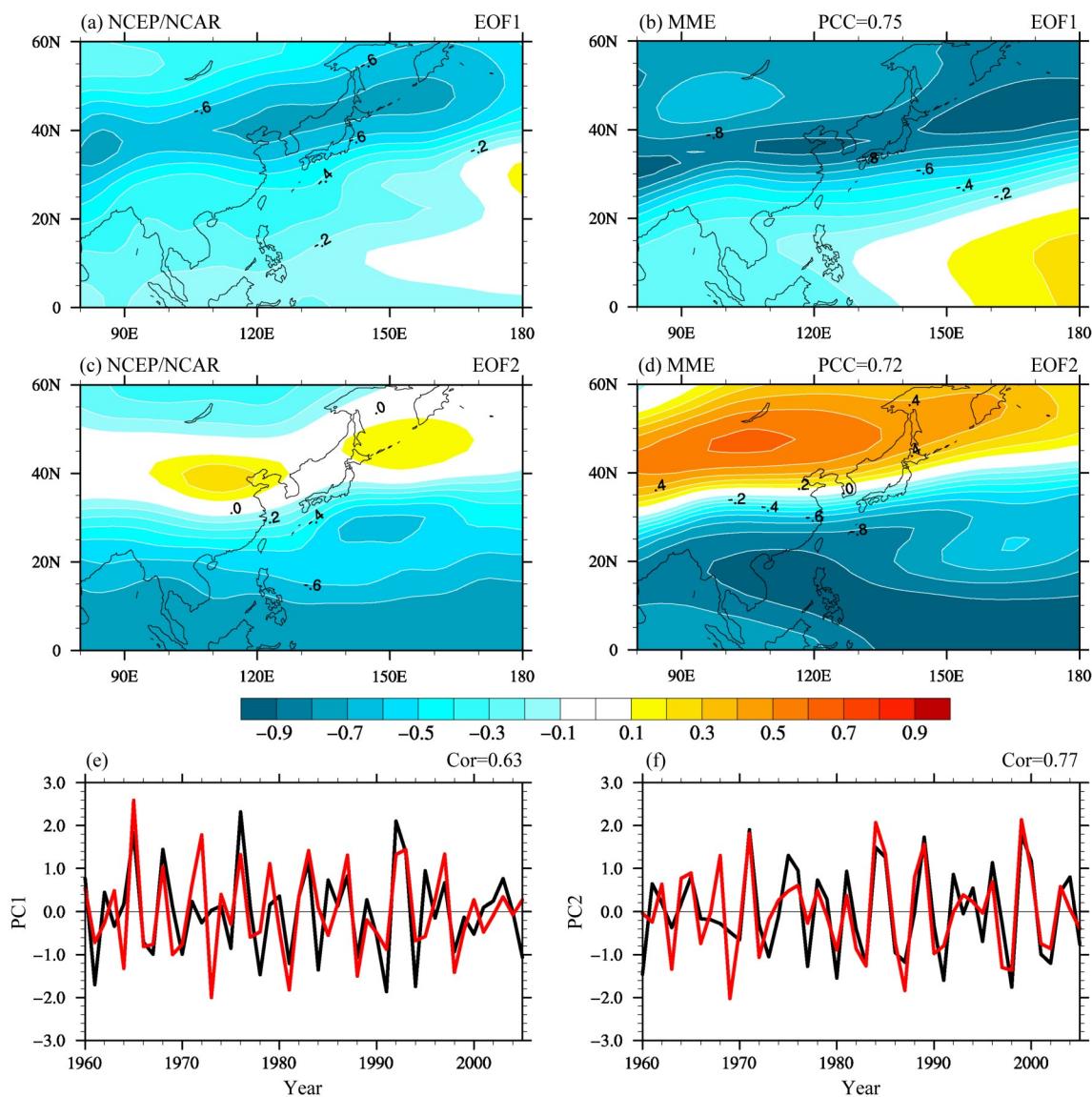


图3 1960~2005年夏季东亚(0° ~ 60° N, 80° E~ 180°) Z_{200} ~ Z_{500} 年际变率的EOF前两个模态及相应的主成分(PC1、PC2): (a) NCEP/NCAR再分析资料的EOF1; (b) MME预测的EOF1; (c) NCEP/NCAR再分析资料的EOF2; (d) MME预测的EOF2; (e) PC1; (f) PC2。图e、f中, 黑线和红线分别代表NCEP/NCAR再分析资料和MME的结果, 其右上角数字为二者之间的相关系数

Fig. 3 Spatial patterns of the first (top panels, EOF1) and second (middle panels, EOF2) leading empirical orthogonal function (EOF) modes of the interannual variability of JJA Z_{200} ~ Z_{500} and their corresponding principal components (PC1, PC2) in East Asian (0° N~ 60° N, 80° E~ 180°) during 1960~2005: (a, c) NCEP/NCAR reanalysis data; (b, d) MME predictions; (e, f) principal components. In Figs. e, f, the black solid line and the red solid line indicate principal components obtained from the NCEP/NCAR reanalysis data and MME predictions, numbers on the upper right-hand corners indicate the temporal correlation coefficients between NCEP/NCAR reanalysis data and the MME predictions

且西北太平洋地区正异常中心偏强(图3b)。再分析资料对流层温度年际变率的EOF2表现为经向的三极分布, 30° ~ 50° N为正温度异常, 其两侧均为负温度异常, 主要以热带负异常中心为主, 体现了热带温度异常的作用, 主要表现为热带上空变冷, 中纬度变暖的经向热力对比异常(图3c)。MME合理回报出再分析资料中EOF2亚洲南侧的冷异

常, 及 30° ~ 50° N的暖异常, 同样表现为热带冷异常、中纬度暖异常的经向热力对比减弱的特征, 空间相关系数为0.72。但是MME预测的冷暖异常中心较之再分析资料均偏强, 其冷暖分界线比再分析资料略偏北, 北侧的暖温度异常中心位于 50° N左右, 未能回报出再分析资料EOF2中 50° N以北的冷异常。同时, MME可以很好地预测出再分析资料

前两个EOF模态对应的主成分PC1和PC2的时间序列演变,与再分析资料的相关系数分别为0.63和0.77,通过1%的显著性检验水平。该EOF模态空间型与选取的区域关系不大,这与东亚夏季对流层温度的前两个EOF模态(Zhang and Zhou, 2012)和选取整个北半球200 hPa位势高度(可表征地表至200 hPa平均温度)前两个EOF模态(Ding and Wang, 2005)一致。

为了寻求对流层温度EOF异常的物理机制,探讨其可预报性来源,本文通过回归分析给出了与对流层温度异常前两个EOF模态对应的环流异常。对应再分析资料中EOF1(图4a、c、e),夏季赤道东太平洋为暖海温异常所控制,热带西太平洋和北太平洋高纬度地区则均为冷海温距平,且均通过了10%显著性检验水平。在低层,赤道中东太平洋SST暖异常和热带西太平洋冷海温异常,减弱了热带地区的东西向热力对比,Walker环流减弱,导致海洋大陆异常下沉,进而通过Rossby响应造成印度大陆夏季降水减弱(图4c),减弱了对大气的潜热加热作用,激发出沿着高层200 hPa副热带西风急流的Rossby波列—“丝绸之路”遥相关波列,即自印度西北到东亚的纬向波列形式,中心分别是位于印度大陆西北部的气旋性异常、青藏高原北部的反气旋异常以及东亚大陆的气旋性异常,使得中纬度对流层温度降低(图4e)。这与Zhang and Zhou(2012)解释的东亚夏季对流层温度EOF1机理一致,对应了Ding and Wang(2005)提出的夏季北半球环半球遥相关波列多发生在El Niño发展年夏季。另外一种可能原因在于中纬度海温变冷,气候态急流轴南移,进而改变中纬度准静止波,使得沿气候态急流轴的对流层温度变冷(Chattopadhyay et al., 2015)。模式可以合理预测出热带太平洋的海温异常及相应的降水异常,但是预测的海洋大陆降水异常较之观测偏弱,同时模式预测的北太平洋海温同样较之观测偏弱,使得模式预测的200 hPa位势高度异常相应偏弱(图4b、d、f)。

对应再分析资料EOF2(图5a、c、e),热带太平洋与印度洋为显著冷海温距平,主要环流异常在西北太平洋地区,对应了La Niña衰减年夏季。此时,热带印度洋为冷SST异常,抑制了当地对流活

动,通过湿绝热调整激发出冷性Kelvin波,在热带印度洋和赤道西太平洋低层为异常低高压,如图5d所示的北印度洋异常反气旋性环流,由于气压梯度和Ekman层摩擦的共同作用,副热带西北太平洋低层辐合,形成异常气旋性环流异常($10^{\circ}\sim30^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim150^{\circ}\text{E}$),造成西北太平洋夏季降水增加,通过太平洋—日本(P-J)或者东亚—太平洋(EAP)遥相关波列导致东亚沿岸低层风场的三极型环流异常。在高层,受热带冷海温造成的热带对流加热减弱作用的影响,热带对流层温度降低。由此减弱夏季经向温度梯度,副热带西风减弱,通过调节瞬变动量扰动造成 $50^{\circ}\sim60^{\circ}\text{N}$ 高层西风增加,由于地转偏向力的作用,中纬度地区高空辐合,造成局地空气异常下沉,绝热增温,使得中纬度温度升高(Seager et al., 2003)。MME合理预测出了上述动力过程,只是西北太平洋气旋性异常及降水偏强,中纬度的下沉运动相应偏强,EOF2中纬度对流层暖距平较强。

上述分析发现,ENSO发展年夏季印度季风降水与ENSO衰减年夏季西北太平洋降水异常是对流层温度EOF前两个模态的重要强迫因子,为了验证二者之间的关系,参照Ding et al.(2011),本文进一步计算了观测和MME的印度季风和西北太平洋夏季降水与对流层温度的相关系数分布(图6)。可以看出,观测和MME均显示印度夏季风降水与对流层温度的显著正相关,中心位置分别位于印度西北和中国华北至东北地区,与EOF1空间型一致,但符号相反(因为EOF1为对流层温度负距平),而对应西北太平洋夏季降水的相关(图6c),显著相关区域主要位于热带 30°N 以南地区,说明是热带对流层温度异常主导,MME合理预测出热带对流层温度相关,同时加大了西太平洋和中纬度正相关强度。

上述分析研究发现,对流层温度年际变率的EOF1与EOF2分别表征了纬向热力对比和经向热力对比的年际变化,由于对ENSO对应的遥相关的合理预测,ENSEMBLES对对流层温度及其年际变率的前两个EOF模态具有较好的预报技巧。前人研究多采用东亚夏季风指数来表征东亚夏季风强弱,因为这些东亚夏季风指数与中国东部夏季降水之间存在显著相关,多被视作中国东部夏季降水的

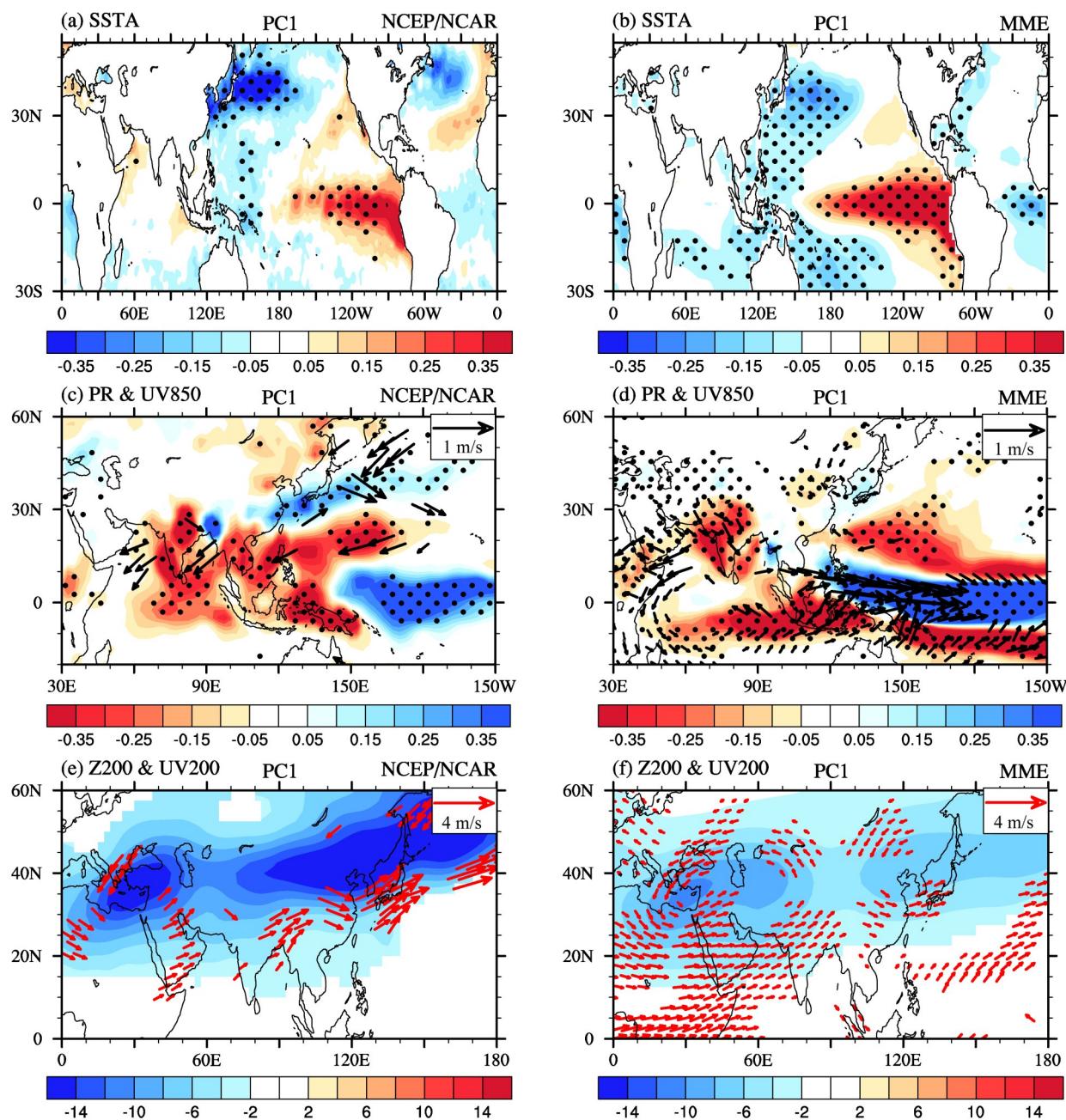


图4 1960~2005年NCEP/NCAR再分析资料的PC1（左列）及MME预测的PC1（右列）与各自夏季环流的回归系数分布：(a、b) SST异常（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）；(c、d) 降水量异常（阴影，单位： mm d^{-1} ）、850 hPa风场异常（矢量，单位： m s^{-1} ）；(e、f) 200 hPa位势高度异常（阴影，单位： m ）、200 hPa风场异常（矢量，单位： m s^{-1} ）。图a-d中打点区域表示阴影代表的变量通过了90%信度水平，图c-f中只显示通过90%信度水平的风场异常，图e、f中只显示通过90%信度水平的200 hPa位势高度异常

Fig. 4 Regression coefficients of (a, b) SST anomaly (units: $^{\circ}\text{C}$), (c, d) precipitation anomaly (units: mm d^{-1}) and 850-hPa wind anomaly (vectors, units: m s^{-1}), (e, f) 200-hPa geopotential height (Z_{200}) anomaly (shadings, units: m) and 200-hPa wind anomaly (vectors, units: m s^{-1}) in summer onto the PC1 in (a, c, e) NCEP/NCAR reanalysis data and (b, d, f) MME predictions during 1960–2005. Dots indicate the regions where the anomalies exceed the 90% confidence level in Figs. a–d, only the wind anomalies exceeding the 90% confidence level are shown in Figs. c–f, the Z_{200} anomalies exceeding the 90% confidence level are shown in Figs. e, f

重要预报因子。那么模式对常用的东亚夏季风指数的预测能力如何？对流层温度EOF前两个模态所表征的海陆热力对比具有何优势？基于前人定义的

东亚夏季风指数和基于对流层温度主导模态建立的中国东部降水的动力—统计降尺度结果是否存在差异？

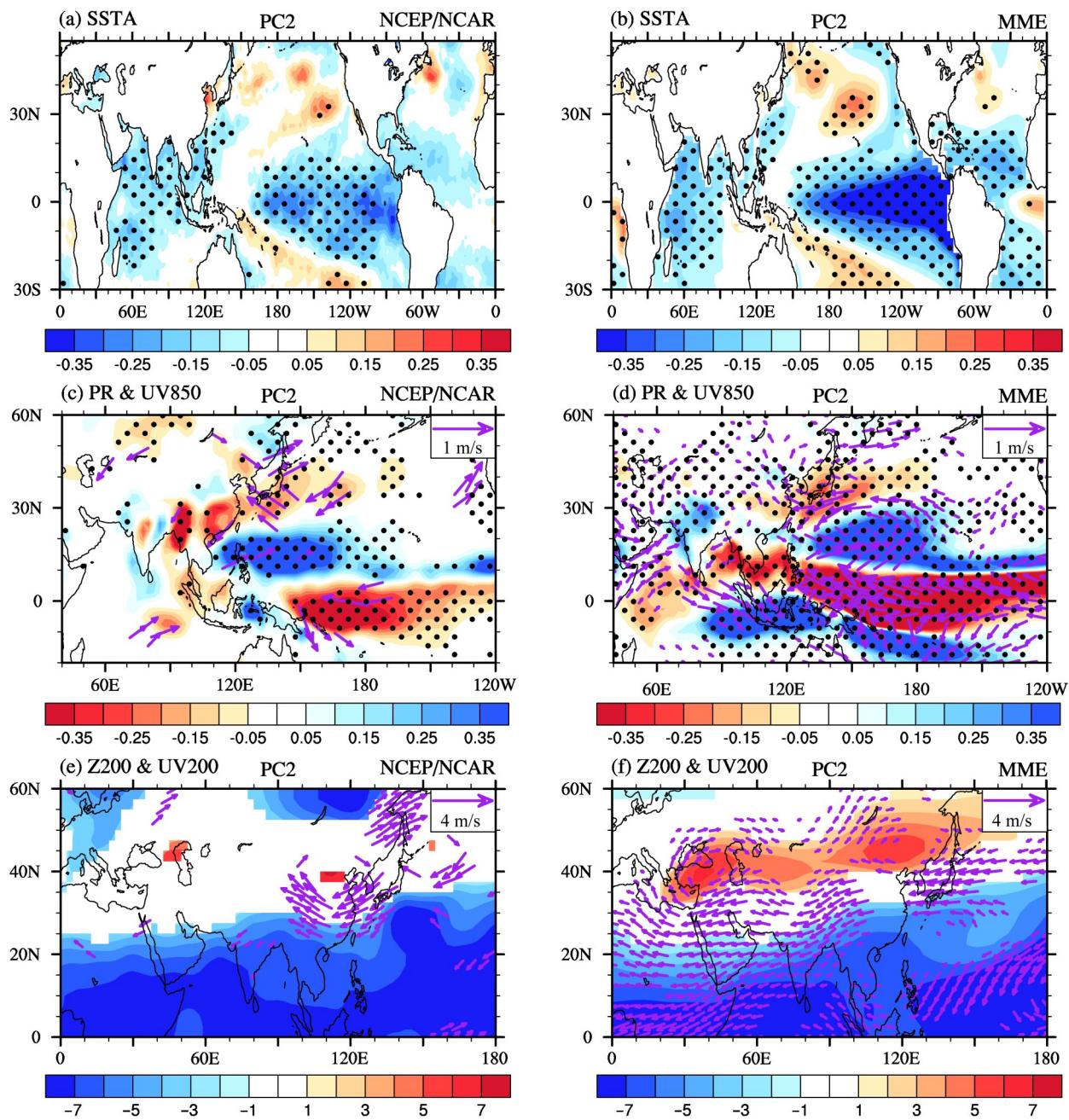


图5 同图4, 但为与PC2回归的结果

Fig.5 As in Fig. 4, but for that with PC2

4 与前人定义的东亚夏季风指数预报水平的比较及动力—统计预测模型

Wang et al. (2008) 将已有的25个东亚夏季风指数分为5类, 第一类是“东西向热力对比指数”, 多表征东亚大陆与西北太平洋地区的海平面气压之差, 第二类为“南北向热力对比指数”, 该类指数多由纬向风来定义, 根据热成风原理, 该指数代

表了亚洲大陆与南海之间的南北向热力对比。Wang et al. (2008) 进一步对东亚夏季降水进行EOF分析, 发现与东亚夏季降水年际变率前两个主导模态相关最好的两个指数, 分别是Wang-Fan指数(Wang and Fan, 1999)和副热带夏季风指数(以下简称ZZ指数, 赵平和周自江, 2005)。其中, Wang-Fan指数定义为($22.5^{\circ}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)与($5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$)区域平均的850

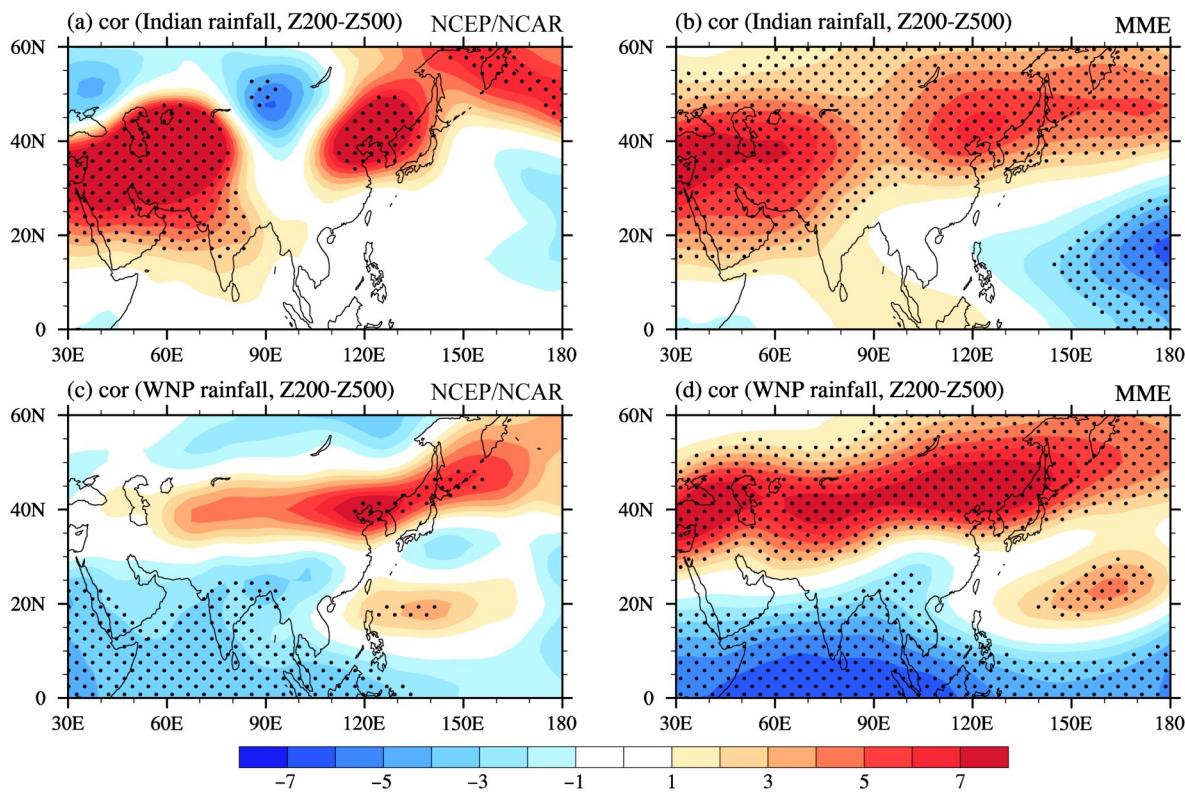


图6 1960~2005年(a、c) NCEP/NCAR再分析资料、(b、d) MME预测的夏季 $Z_{200}-Z_{500}$ 距平(单位:m)与(a、b)印度季风区($9^{\circ}\sim32^{\circ}\text{N}, 70^{\circ}\sim90^{\circ}\text{E}$)和(c、d)西北太平洋($8^{\circ}\sim25^{\circ}\text{N}, 130^{\circ}\text{E}\sim180^{\circ}$)夏季区域平均降水标准化序列的回归系数分布。打点区域通过了90%信度水平检验

Fig. 6 Regression coefficients of JJA $Z_{200}-Z_{500}$ anomalies (units: m) from (a, c) NCEP/NCAR reanalysis data and (b, d) MME predictions onto the normalized summer precipitation anomalies averaged over (a, b) Indian monsoon region ($9^{\circ}\sim32^{\circ}\text{N}, 70^{\circ}\sim90^{\circ}\text{E}$) and (c, d) northwestern Pacific Ocean ($8^{\circ}\sim25^{\circ}\text{N}, 130^{\circ}\text{E}\sim180^{\circ}$) during 1960–2005. Dots indicate the regions where the anomaly exceeded the 90% confidence level

hPa纬向风之差, ZZ指数定义为($30^{\circ}\sim40^{\circ}\text{N}, 160^{\circ}\text{E}$)与($40^{\circ}\sim50^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E}$)区域平均的海平面气压之差, 分别代表了经向(南北向)热力对比和纬向(东西向)热力对比指数。因此, 为了与对流层温度年际变率前两个EOF模态表征的海陆热力对比指数进行对比, 本文进一步分析了Wang-Fan指数与ZZ指数的预报技巧。为了与对流层温度前两个EOF模态保持一致, Wang-Fan指数与ZZ指数均乘以了-1。

图7为观测与MME提前一个月预测的东亚夏季风指数变化。可以看出, 模式可以很好地预测Wang-Fan指数(即经向热力对比指数)的演变, 与观测的相关系数高达0.63, 通过了1%的显著性检验水平。然而, 模式却无法预测前人定义的纬向热力指数(即ZZ指数)的变化, 与观测之间的相关系数只有0.13。注意到观测的ZZ指数存在明显的年代际变化, 在1970年代末由负位相转为正位

相(黑色实线)。为了去除年代际变化的影响, 本文同时计算了去除长期趋势及年代际变率之后的两个东亚夏季风指数, 发现经向热力对比指数变化的相关系数提升至0.73, 纬向热力对比指数与观测的相关系数提升至0.17, 后者仍未通过10%显著性检验水平。该分析说明, ENSEMBLES模式可以非常好地预测前人定义的经向热力对比指数的变化, 但对前人定义的纬向热力对比指数的预测能力不佳, 这与Zhou and Zou (2010)基于大气环流模式比较计划(AMIP)的分析结果一致。1960~2005年Wang-Fan指数和ZZ指数与本文夏季对流层温度PC1、PC2的年际变化序列的相关系数分别为0.31和0.32, 均通过了90%信度水平。

图8~9进一步给出了两个前人定义的东亚夏季风指数及对流层温度前两个EOF模态与降水的相关系数分布。就纬向热力对比指数而言(图8), 再分析资料对流层温度PC1与观测降水的相关说明

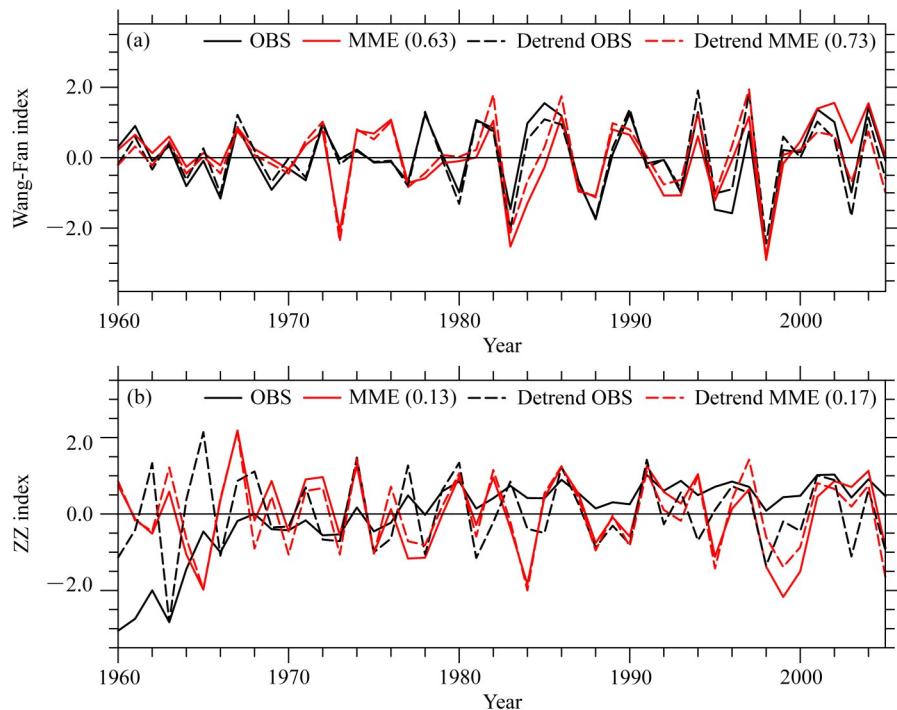


图7 1960~2005年观测的和MME提前1个月预测的东亚夏季风指数标准化时间序列: (a) Wang-Fan指数; (b) ZZ指数。黑(红)线为观测(MME)结果, 实(虚)线代表原始(去除长期趋势之后)时间序列, 括号内数字为MME与观测之间的相关系数

Fig. 7 Normalized time series of East Asian summer monsoon index from observations and one-month-lead predictions by MME during 1960–2005: (a) Wang-Fan index; (b) ZZ index. Red and black lines indicate observations and MME predictions, respectively. Solid and dashed lines denote the original and detrended time series, respectively. Numbers in brackets show the correlation coefficients between prediction and observations

(图8a), 当中纬度对流层温度变冷, 纬向热力对比减弱时, 中国东部35°N以北降水偏少, 华南降水偏多, 其中华北至东北地区的相关系数通过了5%显著性检验水平。当ZZ指数(图8b)表征的纬向热力对比减弱, 相应的降水异常分布与图8a相似, 但相关系数强度和范围均大于基于PC1得到的结果。MME结果(图8c-d)表明, MME预测的PC1对应的降水空间分布(图8c)与观测(图8a)相似, 只是华北地区的相关系数范围更偏南, 这与模式回报的EOF1对流层温度冷距平中心偏南一致, 部分再现了东北北部的负相关。模式预测夏季降水与预测的ZZ指数的相关却仅再现了华北中部的正相关(图8d), 无法回报出对应的华南及东北北部的负相关, 结合图7b, 说明模式既不能合理预测ZZ指数变化, 也不能预测其对应的降水异常, 模式对由ZZ指数表征的纬向热力对比异常及相应的降水预测能力不足。比较而言, 对流层温度EOF1与中国东部夏季降水, 特别是中国北方夏季降水和南方沿海地区, 存在显著相关, 模式对由对流层温度EOF1表征的纬向热力对比指数及相应的

降水分布的回报技巧高于ZZ指数。

图9给出了对流层温度年际变率EOF2及Wang-Fan指数表征的经向热力对比异常与降水之间的相关系数。对应对流层温度EOF2, 即经向热力对比减弱时, 观测的中国长江流域中上游地区降水偏少, 黄河中上游地区降水增加, 东北地区西北部降水减少, 但通过显著性检验的地区主要出现于110°E以西地区和东北地区(图9a)。MME回报的与PC2相关的降水虽也呈现与观测类似南北向三极型分布, 但华北和长江流域的相关系数强度明显偏强(图9c)。对应由Wang-Fan指数表征的经向热力对比偏弱时, 相应的观测降水异常与图9a相似, 但相关系数明显偏强, 中国夏季降水存在华南降水多, 长江流域及东北西北部降水少的特征, 其中与经向热力对比指数相关最显著的区域位于长江流域, 东北地区仅在其西北处存在一处显著正相关区域。MME(图9d)可以合理再现长江流域夏季降水与Wang-Fan指数的显著正相关, 其与Wang-Fan指数的相关系数高达0.6以上, 同样较之观测存在明显高估。结合图7a和图8b、d可以看出, 模式对

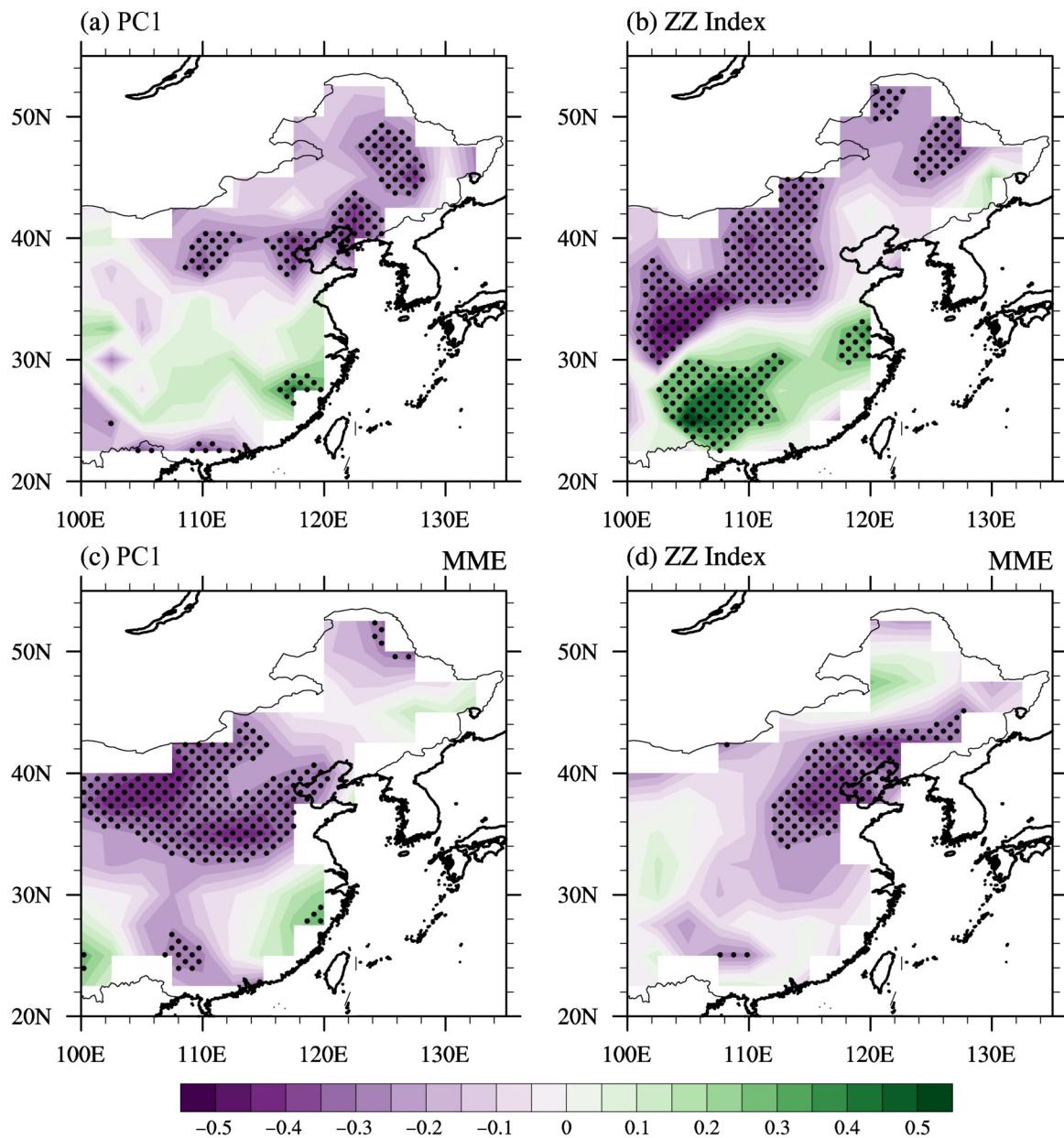


图8 1960~2005年夏季 $Z_{200}-Z_{500}$ 年际变率的PC1(左列)、ZZ指数(右列)与夏季降水之间的相关系数分布:(a、b) NCEP/NCAR再分析资料的序列与观测降水之间的相关系数;

Fig. 8 Correlation coefficients between JJA precipitation and PC1 (left column), ZZ index (right column) for the interannual variability of $Z_{200}-Z_{500}$ during 1960–2005: (a, b) Correlation coefficients between PC1, ZZ index from NCEP/NCAR reanalysis data and observed precipitation; (c, d) correlation coefficients between PC1, ZZ index from MME predictions and precipitation from MME predictions. Dots indicate the region where the correlation coefficient exceeded the 95% confidence level

Wang-Fan 指数及其对应的长江流域降水的预测能力较高, 可以将该指数及模式预测结果作为长江流域降水预测的重要指标。比较而言, 无论是对 Wang-Fan 指数还是其对应的降水型而言, 模式的预测效果均高于由对流层温度 EOF2 表征的经向热力对比指数。

上述分析表明, 模式可以合理预测出前人定义

的经向热力对比指数及其相应的长江流域降水分布, 但对前人定义的纬向热力对比指数及相应的降水分布的预报效果不佳, 且无论哪种指数, 模式都无法预测出与夏季风指数相关的高纬度地区降水, 如东北地区的相关分布。

为了与前人定义的东亚夏季风指数比较, 本文分别选取对流层温度前两个 EOF 模态对应的 PC 和

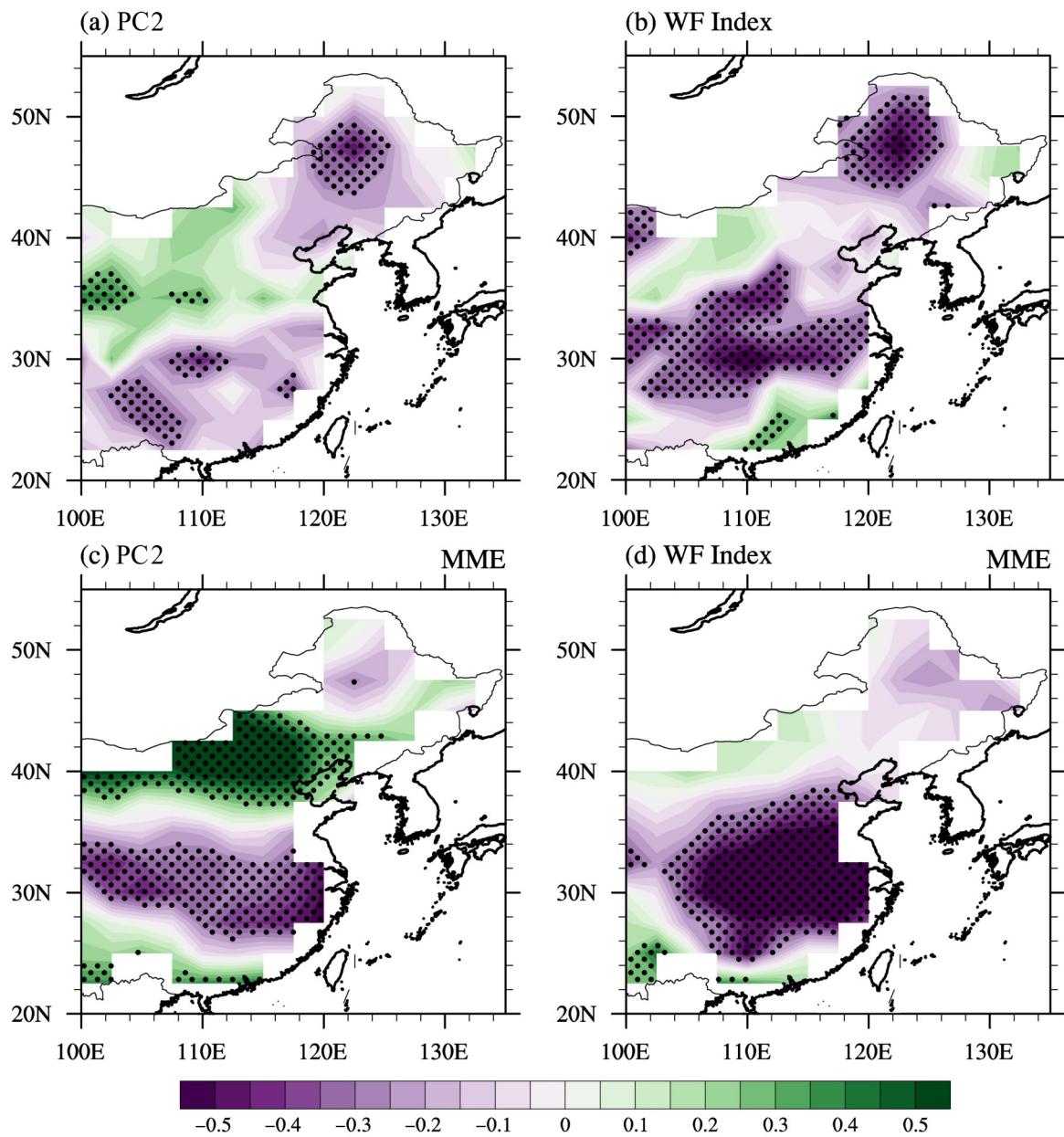


图9 同图8, 但为PC2和Wang-Fan指数与夏季降水之间的相关系数

Fig. 9 As in Fig. 8, but for the correlation coefficients between JJA precipitation and PC2, Wang-Fan index

两个前人定义的东亚夏季风指数作为预报因子, 采用多元回归和交叉验证的方法, 建立了中国东部夏季降水的动力—统计降尺度预报模型, 并与模式直接预测的降水结果作比较, 得到的降水与观测之间的距平相关系数如图10所示。模式直接预测的夏季降水与观测显著相关区域位于华北地区($32^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$) (图10a)。采用对流层温度EOF前两个EOF模态PC作为预报因子, 较之模式直接预测结果, 显著提高了东北地区($42^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$)夏季降水的预测技巧, 从模式

预测的负相关(-0.20)提升至0.50(图10b), 却降低了长江流域中上游地区($26^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$)降水的预报技巧, 其可能原因是PC2与降水相关系数不够显著。而采用前人定义的东亚夏季风指数作为预报因子(图10c), 显著正相关出现在黄河流域至长江流域上游地区, 原来华北地区的显著正相关消失, 可能是ENSEMBLES对由ZZ指数预测水平较低造成的。由于ENSEMBLES对由对流层温度EOF1对应的PC1所表征的纬向热力对比较之ZZ指数均具备较高的预报技巧, 且Wang-

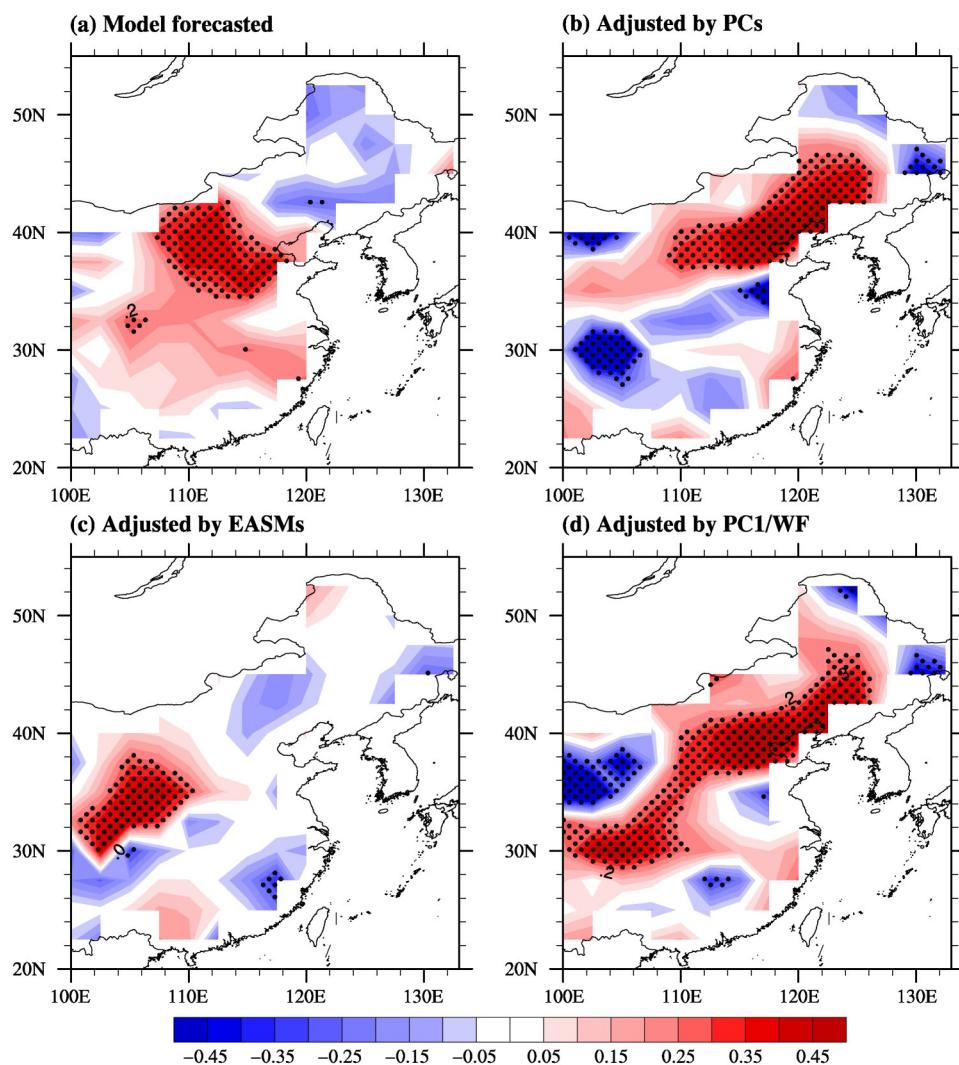


图10 1961~2005年模式直接预测及动力—统计降尺度预测的夏季降水与观测之间的距平相关系数: (a) MME 直接预测夏季降水; (b) 采用 $Z_{200}-Z_{500}$ 年际变率的PC1与PC2建立的动力—统计降尺度模型预测的降水; (c) 采用Wang-Fan指数和ZZ指数建立的动力—统计降尺度模型预测的降水; (d) 采用 $Z_{200}-Z_{500}$ 年际变率的PC1与Wang-Fan指数建立的动力—统计降尺度模型预测的降水。打点区域通过95%信度水平

Fig. 10 Anomaly correlation coefficients between observed summer precipitation and (a) MME predicted precipitation, (b) precipitation adjusted by PC1 and PC2 for the interannual variability of $Z_{200}-Z_{500}$, (c) precipitation adjusted by Wang-Fan index and ZZ index, (d) precipitation adjusted by PC1 for the interannual variability of $Z_{200}-Z_{500}$ and Wang-Fan index. Dots indicate the region where the correlation coefficient exceeded the 95% confidence level

Fan 指数所表征的经向热力指数与降水相关较之 PC2 更高, 因此, 本文进一步采用 PC1 和 Wang-Fan 指数作为预报因子, 分别代表纬向热力对比和经向热力对比的变化, 采用同样的方法, 建立了中国东部夏季降水预报方程, 其预报的降水与观测之间的距平相关系数如图 10d 所示。结果表明, 该预报模型既保留了模式直接预测的华北地区的高相关, 同时显著提高了东北和长江流域上游夏季降水的预报技巧, 体现了 PC1 在提升我国东部中高纬度

降水预报技巧中的作用。

5 结论和讨论

本文针对夏季亚洲对流层温度, 基于欧盟 ENSEMBLES 计划的季节预测试验耦合模式每年 5 月 1 日开始的回报试验, 分析了 1960~2005 年东亚夏季对流层温度年际变率的预报技巧, 探讨了预报技巧的可能来源, 建立了基于其前两个 EOF 模态的降水动力—统计预测模型, 并与前人定义的东亚

夏季风指数的预报技巧，探讨了其对中国东部夏季降水的可能作用，主要结论如下：

(1) MME 能提前一个月合理回报 NCEP/NCAR 再分析资料中东亚夏季对流层温度年际变率的大值区，但预测的年际变率强度偏弱。模式预测的对流层温度与再分析资料之间的距平相关系数显示，模式对亚洲对流层温度逐年演变具有一定的预报技巧，除了长江流域上空对流层温度之外，其他地区的距平相关系数均通过了 5% 显著性检验水平，对低纬度地区的预报技巧高于中高纬度。

(2) 夏季亚洲对流层温度年际变率的前两个 EOF 模态，分别代表了欧亚大陆与周围海洋之间的纬向和经向热力对比异常，解释的方差贡献分别为 39.5% 和 18.3%。模式可以提前一个月合理回报这两个 EOF 模态及对应的 PC 演变，解释的方差贡献分别为 23.7% 和 56.4%，与再分析资料 EOF1 和 EOF2 的空间相关系数分别为 0.75 和 0.72，模式预测的 PC1 与 PC2 与再分析资料的时间相关系数达到 0.63 和 0.77，通过了 1% 显著性检验水平。MME 回报的主要偏差表现在模式预测的冷暖异常中心较之再分析资料均偏强，其冷暖分界线比再分析资料略偏北，北侧的暖温度异常中心位于 50°N 左右，未能回报出再分析资料 EOF2 中 50°N 以北的冷异常。再分析资料中 EOF1 和 EOF2 分别由 ENSO 发展年夏季印度降水异常所激发的丝绸之路遥相关波列和 ENSO 衰减年夏季西北太平洋降水异常对应的太平洋—日本遥相关波列导致。ENSEMBLES 可以合理预测出相应的海温异常及遥相关波列，进而合理预测出其前两个 EOF 模态及相应的 PC。

(3) 对流层温度异常的 EOF1 和 EOF2 均与中国夏季降水存在显著相关。与两个前人定义的东亚夏季风指数对比发现，模式对由 PC1 表征的纬向热力对比指数预报技巧的远高于前人定义的东亚夏季风指数，对前人定义的经向热力对比指数的预测技巧与 PC2 相当，但前人定义的经向热力对比指数与中国东部夏季降水的相关远高于 PC2，因此本文将 PC1 和前人定义的经向热力对比指数作为两个预报因子，采用多元回归和交叉验证的方法，建立了的降水动力—统计预测模型，交叉检验的结果表明该预报模型既保留了模式直接预测的华北地区的高相关，同时显著提高了东北和长江流域上游夏季降水的预报技巧，由对流层温度 PC1 作为中国东部夏季降水预测因子，有助于提升对东北地区降水预报

技巧。

本文不仅定量分析了模式对亚洲对流层温度的预报技巧，并通过统计将尺度的方法，充分利用模式对对流层温度的预测信息，对中国夏季降水进行了定量预测。本文提出的对流层温度年际变率 PC1，可以较好表征纬向热力对比，且模式具有较高可预报性，可以作为我国中高纬度地区，特别是东北地区的重要预测因子之一，对该地区汛期短期气候预测业务具有实际应用价值。值得注意的是，为了去除再分析资料年代际变化和长期区域的不确定性，本文仅仅关注了对流层温度年际变率及其对夏季降水年际变率的贡献，并不包含年代际变化信息，因此如何包含年代际变化，开展年代际一年际预测的相互结合，有待进一步研究。

参考文献 (References)

- Chattopadhyay R, Phani R, Sabeer Ali C T, et al. 2015. Influence of extratropical sea-surface temperature on the Indian summer monsoon: An unexplored source of seasonal predictability [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141(692): 2760–2775. doi:10.1002/qj.2562
- Chen H M, Zhou T J, Neale R B, et al. 2010. Performance of the new NCAR CAM3.5 in East Asian summer monsoon simulations: Sensitivity to modifications of the convection scheme [J]. J. Climate, 23: 3657–3675. doi:10.1175/2010jcli3022.1
- 陈丽娟, 李维京, 张培群, 等. 2003. 降尺度技术在月降水预报中的应用 [J]. 应用气象学报, 14(6): 648–655. Chen Lijuan, Li Weijing, Zhang Peiqun, et al. 2003. Application of a new downscaling model to monthly precipitation forecast [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 14(6): 648–655. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2003.06.002
- Chen M Y, Xie P P, Janowiak J E, et al. 2002. Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations [J]. J. Hydrometeorol., 3(3): 249–266. doi: 10.1175/1525-7541(2002)003<0249:glpaym>2.0.co;2
- Dai A G, Li H M, Sun Y, et al. 2013. The relative roles of upper and lower tropospheric thermal contrasts and tropical influences in driving Asian summer monsoons [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 118 (13): 7024–7045. doi:10.1002/jgrd.50565
- Ding Q H, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer [J]. J. Climate, 18(17): 3483–3505. doi: 10.1175/JCLI3473.1
- Ding Q H, Wang B, Wallace J M, et al. 2011. Tropical–extratropical teleconnections in boreal summer: Observed interannual variability [J]. J. Climate, 24: 1878–1896. doi:10.1175/2011JCLI3621.1
- 冯蕾, 魏凤英, 朱艳峰. 2011. 基于前春对流层温度和北大西洋涛动的中国夏季降水统计预测模型 [J]. 大气科学, 35(5): 963–976.
- Feng Lei, Wei Fengying, Zhu Yanfeng. 2011. A predictive model for summer precipitation over China based on upper tropospheric temperature and North Atlantic Oscillation in the preceding spring

- [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(5): 963–976. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.05.15
- Gao Y, Wang H J, Chen D. 2015. The capability of ENSEMBLES models in predicting the principal modes of Pan-Asian monsoon precipitation [J]. *J. Climate*, 28: 8486–8510. doi:10.1175/jcli-d-15-0010.1
- Goswami B N, Xavier P K. 2005. ENSO control on the south Asian monsoon through the length of the rainy season [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L18717. doi:10.1029/2005GL023216
- 何金海, 邱莉, 韦晋, 等. 2007. 关于东亚副热带季风和热带季风的再认识 [J]. 大气科学, 31(6): 1257–1265. He Jinhai, Qi Li, Wei Jin, et al. 2007. Reinvestigations on the East Asian subtropical monsoon and tropical monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(6): 1257–1265. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.20
- 何金海, 赵平, 祝从文, 等. 2008. 关于东亚副热带季风若干问题的讨论 [J]. 气象学报, 66(5): 683–696. He Jinhai, Zhao Ping, Zhu Congwen, et al. 2008. Discussions on the East Asian subtropical monsoon [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66(5): 683–696. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.05.003
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(3): 437–472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2
- Kim H M, Webster P J, Curry J A, et al. 2012. Asian summer monsoon prediction in ECMWF system 4 and NCEP CFSv2 retrospective seasonal forecasts [J]. *Climate Dynamics*, 39(12): 2975–2991. doi:10.1007/s00382-012-1470-5
- 范可, 王会军. 2006. 南极涛动的年际变化及其对东亚冬春季气候的影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 36(4): 385–391. Fan Ke, Wang Huijun. 2006. Interannual variability of Antarctic Oscillation and its influence on East Asian climate during boreal winter and spring [J]. *Science China: Earth Sciences* (in Chinese), 36(4): 385–391.
- Lee J Y, Wang B, Kang I S, et al. 2010. How are seasonal prediction skills related to models' performance on mean state and annual cycle? [J]. *Climate Dyn.*, 35: 267–283. doi:10.1007/s00382-010-0857-4
- Lee J Y, Wang B, Wang Q, et al. 2011. How predictable is the Northern Hemisphere summer upper-tropospheric circulation? [J]. *Climate Dyn.*, 37: 1189–1203. doi:10.1007/s00382-010-0909-9
- Li C, Lu R, Dong B. 2012. Predictability of the western North Pacific summer climate demonstrated by the coupled models of ENSEMBLES [J]. *Climate Dyn.*, 39: 329–346. doi:10.1007/s00382-011-1274-z
- Li C F, Lin Z D. 2015. Predictability of the summer East Asian upper-tropospheric westerly jet in ENSEMBLES multi-model forecasts [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32(12): 1669–1682. doi:10.1007/s00376-015-5057-z
- Li H, Dai A, Zhou T, et al. 2010. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950–2000 [J]. *Climate Dynamics*, 34: 501–514. doi:10.1007/s00382-008-0482-7
- Li J, Yu R, Zhou T. 2008. Teleconnection between NAO and climate downstream of the Tibetan Plateau [J]. *J. Climate*, 21(18): 4680–4690.
- Liu Y, Ren H L. 2015. A hybrid statistical downscaling model for prediction of winter precipitation in China [J]. *International Journal of Climatology*, 35(7): 1309–1321. doi:10.1002/joc.4058
- Liu Y, Ren H L, Scaife A A, 2018: Evaluation and statistical downscaling of East Asian summer monsoon forecasting in BCC and MOHC seasonal prediction systems [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(717): 2798–2811. doi:10.1002/qj.3405
- 刘颖, 任宏利, 张培群, 等. 2017. 利用高原积雪信号改进我国南方夏季降水预测的新方法及其在2014年降水预测中的应用试验 [J]. 大气科学, 41(2): 313–320. Liu Ying, Ren Hongli, Zhang Peiqun, et al. 2017. Improve the prediction of summer precipitation in South China by a new approach with the Tibetan Plateau snow and the applicable experiment in 2014 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(2): 313–320. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1605.16104
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 699–706.
- 彭京备, 陈烈庭, 张庆云. 2006. 多因子和多尺度合成中国夏季降水预测模型及预报试验 [J]. 大气科学, 30(4): 596–608. Peng Jingbei, Chen Lieting, Zhang Qingyun. 2006. The statistic prediction model and prediction experiments of the summer rain over China by multiple factors and multi-scale variations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(4): 596–608. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.04.06
- Rajeevan M, Unnikrishnan C K, Preethi B. 2011. Evaluation of the ENSEMBLES multi-model seasonal forecasts of Indian summer monsoon variability [J]. *Climate Dyn.*, 38(11–12): 2257–2274. doi:10.1007/s00382-011-1061-x
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. *J. Geophys. Res.*, 108(D14): 4407. doi:10.1029/2002JD002670
- Seager R, Harnik N, Kushnir Y, et al. 2003. Mechanisms of hemispherically symmetric climate variability [J]. *J. Climate*, 16: 2960–2978.
- 施洪波, 周天军, 万慧, 等. 2008. SMIP2试验对亚洲夏季风的模拟能力及其可预报性的分析 [J]. 大气科学, 32(1): 36–52. Shi Hongbo, Zhou Tianjun, Wan Hui, et al. 2008. SMIP2 experiment-based analysis on the simulation and potential predictability of Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(1): 36–52. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.01.04
- 孙倩, 吴波, 周天军. 2017. 基于可预测模态分析技术的亚澳夏季风统计—动力季节预测模型及其回报技巧评估 [J]. 地球科学进展, 32(4): 420–434. Sun Qian, Wu Bo, Zhou Tianjun. 2017. Construction of statistical–dynamic prediction model for the Asian–Australian summer monsoon based on the predictable mode analysis method and assessment of its predictive skills [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 32(4): 420–434. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.04.0420
- Wang B, Fan Z. 1999. Choice of South Asian summer monsoon indices

- [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80(4): 629–638. doi: 10.1175/1520-0477(1999)080<0629:COSASM>2.0.CO;2
- Wang B, Lee J Y, Kang I S, et al. 2007. Coupled predictability of seasonal tropical precipitation [J]. CLIVAR Exchanges, 12: 17–18.
- Wang B, Lee J Y, Kang I S, et al. 2009. Advance and prospectus of seasonal prediction: Assessment of the APCC/CliPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980–2004) [J]. Climate Dynamics, 33, 93–117. doi:10.1007/s00382-008-0460-0
- Wang B, Lee J Y, Kang I S, et al. 2008. How to measure the strength of the East Asian summer monsoon [J]. J. Climate, 21: 4449–4463. doi: 10.1175/2008JCLI2183.1
- 魏凤英, 黄嘉佑. 2010. 我国东部夏季降水量统计降尺度的可预测性研究 [J]. 热带气象学报, 26(4): 483–488. Wei Fengying, Huang Jiayou. 2010. A study of predictability for summer precipitation on East China using downscaling techniques [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 26(4): 483–488. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.04.013
- Weisheimer A, Doblas - Reyes F J, Palmer T N, et al. 2009. ENSEMBLES: A new multi-model ensemble for seasonal-to-annual predictions—Skill and progress beyond DEMETER in forecasting tropical Pacific SSTs [J]. Geophys. Res. Lett., 36(21), L21711. doi: 10.1029/2009GL040896
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. 地球物理学报, 56(4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56(4): 1102–1111.
- 吴捷, 任宏利, 张帅, 等. 2017. BCC二代气候系统模式的季节预测评估和可预报性分析 [J]. 大气科学, 41(6): 1300–1315. WU Jie, REN Hongli, ZHANG Shuai, et al. 2017. Evaluation and predictability analysis of seasonal prediction by BCC second-generation climate system model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(6): 1300–1315. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16256
- Wu R G, Kirtman B P. 2005. Roles of Indian and Pacific Ocean air-sea coupling in tropical atmospheric variability [J]. Climate Dyn., 25: 155–170. doi:10.1007/s00382-005-0003-x
- 熊开国, 封国林, 黄建平, 等. 2012. 最优多因子动态配置的东北汛期降水相似动力预报试验 [J]. 气象学报, 70(2): 213–221. Xiong Kaiguo, Feng Guolin, Huang Jianping, et al. 2012. Analogue-dynamical prediction of monsoon precipitation in Northeast China based on dynamic and optimal configuration of multiple predictors [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70(2): 213–221.
- Yang S, Lau K M, Kim K M. 2002. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies [J]. J. Climate, 15, 306–325.
- Yang S, Zhang Z Q, Vernon 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. doi: 10.1175/2008JCLI1961.1
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia [J]. Geophys. Res. Lett., 31, L22212. doi:10.1029/2004GL021270
- 宇如聪, 周天军, 李建, 等. 2008. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展 [J]. 大气科学, 32(4): 893–905. Yu Rucong, Zhou Tianjun, Li Jian, et al. 2008. Progress in the studies of three-dimensional structure of interdecadal climate change over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 893–905. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.16
- Zhang J, Zhou T, Bao Q, et al. 2010. The vertical structures of atmospheric temperature anomalies associated with El Niño simulated by the LASG/IAP AGCM: Sensitivity to convection schemes [J]. Adv. Atmos. Sci., 27(5), 1051–1063. doi: 10.1007/s00376-010-9167-3
- Zhang L X, Zhou T J. 2012. The interannual variability of summer upper-tropospheric temperature over East Asia [J]. J. Climate, 25 (19): 6539–6553. doi:10.1175/jcli-d-11-00583.1
- 赵平, 陈军明, 肖栋, 等. 2008. 夏季亚洲—太平洋涛动与大气环流和季风降水 [J]. 气象学报, 66(5): 716–729. Zhao Ping, Chen Junmin, Xiao Dong, et al. 2008. Summer Asian-Pacific Oscillation and its relationship with atmospheric circulation and monsoon rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66(5): 716–729. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.05.006
- 赵平, 周自江. 2005. 东亚副热带夏季风指数及其与降水的关系 [J]. 气象学报 . 63(6): 933–941. Zhao P, Zhou Z J, 2005. East Asian subtropical summer monsoon index and its relationships to rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63(6): 933–941.
- Zhao P, Zhu Y N, Zhang R H. 2007. An Asian-Pacific teleconnection in summer tropospheric temperature and associated Asian climate variability [J]. Climate Dyn., 29(2–3): 293–303. doi:10.1007/s00382-007-0236-y
- Zhou T J, Zhang J. 2011. The vertical structures of atmospheric temperature anomalies associated with two flavors of El Niño simulated by AMIP II models [J]. J. Climate, 24(4): 1053–1070. doi: 10.1175/2010JCLI3504.1
- Zhou T J, Zou L W. 2010. Understanding the predictability of East Asian summer monsoon from the reproduction of land-sea thermal contrast change in AMIP-type simulation [J]. J. Climate, 23(22): 6009–6026. doi:10.1175/2010JCLI3546.1
- 周秀骥, 赵平, 陈军明, 等. 2009. 青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 39(11): 1473–1486. Zhou X J, Zhao P, Chen J M, et al. 2009. Impacts of thermodynamic processes over the Plateau on the Northern Hemispheric climate [J]. Sci. China: Earth Sci. (in Chinese), 39(11): 1473–1486.
- 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. doi:10.1007/s00376-008-0867-x
- 朱艳峰, 张博, 陈隆勋. 2010. 夏季青藏高原与其东部平原的热力差异对中国降水的影响 [J]. 科学通报, 55(6): 483–489. Zhu Y F, Zhang B, Chen L X. Thermal difference between the Tibetan Plateau and the plain east of Plateau and its influence on rainfall over China in the summer [J]. Chinese Sci. Bull. (in Chinese), 55(6): 483–489.