

顾伯辉, 郑志海, 封国林, 等. 2017. 季节预测模式对东亚夏季环流的预测能力及其对热带海洋的响应分析 [J]. 大气科学, 41 (1): 91–105. Gu Bohui, Zheng Zhihai, Feng Guolin, et al. 2017. The capacity of seasonal forecast models for the forecast of the East Asian summer circulation and its response to tropical SST anomaly [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (1): 91–105, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15154.

季节预测模式对东亚夏季环流的预测能力及其对热带海洋的响应分析

顾伯辉¹ 郑志海² 封国林² 王正¹

¹ 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

² 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘 要 东亚夏季环流变化对中国夏季降水的年际变化有重要影响, 因此需要进一步理解季节预测模式对东亚夏季环流的预测能力。利用 1991~2013 年美国国家环境预测中心 (NCEP)、中国气象局国家气候中心 (NCC) 和日本东京气候中心 (TCC) 的三个季节预测模式 (CFS V2、BCC_CSM V2 和 MRI-CGCM) 以及 NCEP/NCAR 再分析资料, 定量评估了模式对东亚夏季风 (EASM) 和夏季西太平洋副热带高压 (WPSH) 强度的预测能力。在此基础上, 分析了模式预测的 EASM 和 WPSH 对热带海温异常的响应能力, 以及 ENSO 事件对 EASM 和 WPSH 预测的影响, 阐述了预测误差产生的原因。结果表明: 整体而言, 三个模式对 EASM 和 WPSH 的预测技巧较高, 但 TCC 模式对 WPSH 的预测技巧相对较低。三个模式预测的 850 hPa 风场在西北太平洋存在一个异常气旋, 使得预测的 EASM 偏强和 WPSH 偏弱。同时, 二者的年际变率整体比观测小。三个模式预测的 EASM 和 WPSH 对热带海洋海温异常的响应随季节演变特征与观测比较接近, 但 NCEP 模式和 TCC 模式预测的 EASM 对前期热带太平洋和前期、同期热带印度洋的海温异常响应要强于观测, NCC 模式预测的 EASM 对前期和同期的热带太平洋的海温异常响应明显强于观测。此外, 三个模式预测的 WPSH 对前期和同期的热带太平洋、热带印度洋和热带大西洋的海温异常响应明显强于观测。三个模式预测的 EASM 和 WPSH 在 ENSO 年的平均绝对误差 (MAE) 整体而言要比正常年的小很多, NCEP 模式和 NCC 模式预测的 EASM 和 WPSH 的 MAE 在 La Niña 年和 El Niño 年差别不大, 而 TCC 模式预测的 EASM 和 WPSH 的 MAE 在 El Niño 年比在 La Niña 年大很多, 表明 ENSO 事件是东亚夏季环流重要的可预报源。

关键词 季节预测模式 东亚夏季环流 东亚夏季风 西太平洋副热带高压 预测误差

文章编号 1006-9895(2017)01-0091-15

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15154

The Capacity of Seasonal Forecast Models for the Forecast of the East Asian Summer Circulation and Its Response to Tropical SST Anomaly

GU Bohui¹, ZHENG Zhihai², FENG Guolin², and WANG Zheng¹

¹ College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

² National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

作者简介 顾伯辉, 男, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事数值模式和汛期预测研究。E-mail: gubohui@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者 郑志海, E-mail: zhengzh@cma.gov.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2013CB430204, 国家自然科学基金项目 41475096、41530531, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201306021、GYHY201306024

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program)(Grant 2013CB430204), National Natural Science Foundation of China (Grants 41475096, 41530531), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grants GYHY201306021, GYHY201306024)

Abstract Changes in the East Asian summer circulation have great impacts on summer rainfall in China. It is necessary to better understand the forecasting capacity of seasonal forecast models. In this study, we evaluated the capacity of seasonal forecast models for the forecast of the intensity of East Asian Summer Monsoon (EASM) and Western Pacific Subtropical High (WPSH) in the summer based on the NCEP/NCAR reanalysis and simulations for 1991–2013 from three seasonal forecast models, i.e. CFS V2, BCC_CSM V2 and MRI-CGCM. These models are from National Centers for Environmental Prediction (NCEP), National Climate Center (NCC) and Tokyo Climate Center (TCC) respectively. To illustrate the origin of forecast errors, we analyzed responses of the EASM and WPSH to tropical sea surface temperature (SST) anomaly in these models and impacts of ENSO events on the forecast of the EASM and WPSH. Analysis results indicated that the forecast skills for the EASM and WPSH were high in all models, while those of the TCC model are relatively low. An anomalous cyclone was simulated over western North Pacific, resulting in stronger EASM and weaker WPSH compared to that of observations in all models. Meanwhile, the annual variability of the EASM and WPSH was weaker than that of observations. Characteristic responses of the EASM and WPSH to tropical SST anomaly and its seasonal evolution were close to those of observations in all models. The response of the EASM to the preceding tropical Pacific Ocean SST anomaly and the preceding and simultaneous tropical Indian Ocean SST anomaly in NCEP model and TCC model were stronger than those in observations, and the responses of the EASM to the preceding and simultaneous tropical Pacific Ocean SST anomaly in NCC model were obviously stronger than those in observations. Besides, the responses of the WPSH to the preceding and simultaneous SST anomalies over tropical Pacific Ocean, tropical Indian Ocean and tropical Atlantic Ocean were obviously stronger in all the models than those in observations. The mean absolute errors (MAE) of the EASM and WPSH forecasted by the three models in ENSO events overall were much smaller than those in normal years. The MAEs of the EASM and WPSH forecast by NCEP model and NCC model in La Niña events were close to that in El Niño events, while The MAEs of EASM and WPSH forecasted by TCC in El Niño events were much higher than that in La Niña events. This result also indicated that ENSO event was an important source of forecast for the East Asian summer circulation.

Keywords Seasonal forecast model, East Asian summer circulation, East Asian summer monsoon, Western Pacific subtropical high, Model error

1 引言

东亚夏季环流异常引起的旱涝灾害给我国造成重大的经济损失,因此东亚夏季风降水年际变化的预测对防灾减灾有重要意义。然而,最新的动力模式对东亚夏季降水的预测能力仍然有限。东亚夏季环流对中国夏季降水的年际变化有重要的影响,且东亚夏季环流的可预测性明显高于东亚夏季降水,模式对东亚夏季环流的预测技巧也更高(施洪波等, 2008; 邹立维等, 2009; 郑志海等, 2009; Kim et al., 2012)。东亚夏季风(East Asian Summer Monsoon, 简称 EASM)和西太平洋副热带高压(Western Pacific Subtropical High, 简称 WPSH)是东亚夏季环流的重要成员,夏季风成员间的相互作用及它们的强度变化对中国的气候变化有着重要的影响(张庆云和陶诗言, 1998)。因此,认识季节预测模式对东亚夏季环流,尤其是 EASM 和 WPSH 的预测能力具有重要意义。

影响东亚夏季环流的因子众多,海温、陆面过程和土壤湿度对东亚夏季环流都有重要的影响,尤其是热带太平洋和热带印度洋的海温异常(Huang et al., 2007; Li et al., 2010)。WPSH 是连接热带海温异常与东亚夏季环流变化的桥梁,从 El Niño 成熟期冬季一直维持到衰减年夏季的西北太平洋异常反气旋(anomalous anticyclone over the western North Pacific, 简称 WNPAC)在 El Niño–EASM 遥相关中起着至关重要的作用(Wang et al., 2000; Xie et al., 2009; Wu et al., 2009)。前人已有研究(Huang and Wu, 1989; Lu, 2001; Zhou et al., 2009; 赵俊虎等, 2011; 汪栩加等, 2015)表明,热带印度洋和西太平洋的热力状态和菲律宾附近的对流活动显著影响着 WPSH 的北跳西伸。Wu et al. (2009)进一步研究发现,热带印度洋对 WPSH 的影响具有季节依赖性,对 WPSH 的影响主要体现在 El Niño 衰减年夏季,而在 El Niño 发展期的冬季以及随后的春季影响并不显著。Wu et al. (2010)随

后通过数值试验证明了西北太平洋冷海温异常和热带印度洋海盆模态分别在早夏和晚夏对 WNPAC 维持起主要作用。此外, Zhou et al. (2009) 还研究了热带海温异常对 WPSH 西伸的影响, 提出 1970s 后期热带印度洋—西太平洋的增暖通过改变热带海区热源分布和 Sverdrup (斯维尔德鲁普) 涡度守恒两种机制, 引起 WPSH 西伸, 从而间接地对东亚夏季降水产生重要的影响。

数值试验和诊断分析表明, 东亚夏季环流敏感地依赖于下边界物理过程的影响, 尤其是热带地区的海表温度。大气是一个非线性耗散的混沌系统, 初始条件或模式方程中的任何误差都会导致模式在积分一定的时间后误差非线性增长, 失去可预报性(封国林等, 2001; Li and Ding, 2011; 王阔等, 2012)。耦合模式的误差来源非常复杂, 除了不同分量模式的误差外, 耦合过程也存在着误差, 并且误差之间存在着复杂的非线性相互作用(黄建平和王绍武, 1991; Huang et al., 1993; 郑志海等, 2010, 2013)。为了避免误差非线性作用的影响, 很多研究通过给定下垫面条件(如海温、海冰、陆面等), 利用大气环流模式来考察下垫面条件对东亚夏季环流的影响(Wang et al., 2005)。Wang et al. (2005) 利用观测海平面温度作为边值条件分别强迫大气环流模式和海—气耦合模式, 发现海—气耦合过程对于亚洲—太平洋夏季季风的模拟有至关重要的作用。数值试验表明下垫面尤其是热带海洋以及耦合过程对东亚夏季环流有重要影响, 但这些试验都是在一定的假定条件下进行的。在实际应用的耦合季节预测模式中, 东亚夏季环流能否再现类似的响应过程, 其预测能力不高是否由于对热带海温异常的响应不足造成的等问题, 都需要进一步的认识, 这对诊断分析预测误差的来源和改进季节预测模式也具有指示意义。

多模式集合预测能有效地减少季节预测的误差, 并提高季节预测技巧, 目前已经广泛应用于气候预测中。单模式对热带海洋异常的响应能力具有不确定性, 因此, 本文利用 3 个长期预测产品中心提供的最新季节预测结果, 评估季节预测模式对东亚夏季环流的预测能力, 分析模式中东亚夏季环流对热带海洋尤其是 ENSO 信号的响应能力, 为更好的认识季节预测模式对东亚夏季环流的预测能力和误差来源, 为进一步改进多模式对东亚夏季环流的预测打下基础。

2 模式、资料和方法

本研究使用的再分析资料包括: (1) 美国国家环境预测中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的逐月位势高度场和风场再分析资料(Kalnay et al., 1996), 水平分辨率为 2.5° (经度) $\times 2.5^\circ$ (纬度); (2) 美国国家海洋大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, 简称 NOAA)发布的扩展重建的海表温度资料 ERSST V3b (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Dataset, Version 3b) (Smith et al., 2008), 水平分辨率为 2° (经度) $\times 2^\circ$ (纬度)。

所采用的模式资料来自于 NCEP 的 CFS V2 (Climate Forecast System Version 2)、中国国家气候中心(National Climate Center, 简称 NCC)的 BCC_CSM V2 (Beijing Climate Center Climate System Model Version 2) 和日本东京气候中心(Tokyo Climate Center, 简称 TCC)的 MRI-CGCM (Meteorological Research Institute-Coupled Ocean-Atmosphere General Circulation Model)。CFS V2 模式是由 NCEP 研发并在 2011 年 3 月投入季节气候预测业务(Saha et al., 2014), 它包括四个大气、海洋、陆地和海冰四个分量模式, 大气模式在水平分辨率为 T126, 垂直方向采用 σ - p 混合坐标, 分为 64 层。MRI-CGCM 是由日本气候研究所研发的, 包括大气和海洋两个分量模式, 大气模式水平分辨率为 TL95, 垂直方向也采用 σ - p 混合坐标, 分为 40 层。BCC_CSM V2 是由 NCC 基于国家气候中心 BCC_CSM1.1 (m) 模式研发的第 2 代季节气候预测模式系统, 同样也是包括四个大气、海洋、陆地和海冰四个分量模式, 其中大气分量模式水平分辨率为 T106, 垂直方向为 26 层(吴统文等, 2013)。CFS V2 和 BCC_CSM V2 都是通过各自的分量模式数据同化系统提供初边值驱动模式, 而 MRI-CGCM 的大气初值和海洋边值是经过数据同化系统得到, 海冰和陆地边值则是它们的气候态平均值。CFS V2 预测时间长度为 9 个月, 回报试验时段为 1982~2013 年, MRI-CGCM 预测时间长度为 6 个月, 回报试验时段为 1991~2013 年, BCC_CSM V2 预测时间长度为 11 个月, 回报试验时段为 1979~2013 年, 三个模式资料(NECP、NCC 和 TCC, 下同)预测起报时间均为每年 3 月。需要指出的是, MRI-CGCM 缺少了 200 hPa 位势高度场模式资料。

由于以上资料的水平分辨率和回报试验时段不尽相同,为了便于比较,本文利用双线性插值法将所有数据插值到 2.5° (经度) $\times 2.5^\circ$ (纬度) 格点上,并统一选取研究的时段为 1991~2013 年。为了定量评估模式对 EASM 和 WPSH 的预测能力,采用张庆云和陶诗言(2003)提出的将东亚热带季风槽区 ($10^\circ\sim 20^\circ\text{N}$, $100^\circ\sim 150^\circ\text{E}$) 与东亚副热带地区 ($25^\circ\sim 35^\circ\text{N}$, $100^\circ\sim 150^\circ\text{E}$) 6~8 月平均的 850 hPa 风场的纬向风距平差,定义为东亚夏季风指数 (East Asian Summer Monsoon Index, 简称 EASMI),用以表征 EASM 强度,该指数能很好地反映东亚风场和中国东部降水场的年际变化特征(张庆云和陶诗言,1998;张庆云等,2003)。夏季西太平洋副热带高压指数 (Western Pacific Subtropical High Index, 简称 WPSHI) 采用 Sui et al. (2007) 提出用夏季 500 hPa 位势高度场 ($15^\circ\sim 30^\circ\text{N}$, $120^\circ\sim 140^\circ\text{E}$) 区域平均值,来表征夏季 WPSH 强度。WPSH 的年际变率对我国夏季降水的影响很大,使用该指数的好处在于指数定义所在的关键区是 WPSH 的 5880 gpm 等高线西侧年际变化最大的区域,因此可以合理地反映 WPSH 西伸脊点的年际变化情况。

本文首先评估季节预测模式对低中高层大气的气候态以及年际变率的预测能力,然后通过分析比较模式预测的 EASMI 和 WPSHI 与观测值的相关系数、均方根误差、标准差比和线性趋势系数,定量化评估季节预测模式对 EASM 和 WPSH 强度的预测能力,诊断季节预测模式对热带海洋海温异常的响应能力,分析预测误差产生的原因。

3 东亚夏季环流的预测能力

3.1 气候态和年际变率

气候预测模式的性能主要表现在两方面,气候态和气候变率。对气候态的模拟能力在一定程度上表征了模式在一定时间尺度下对气候背景的刻画能力,而合理地模拟出年际变率才能对未来的气候进行有效的预测。因此,对气候态和年际变率的模拟能力,是衡量模式对东亚夏季环流预测能力的两个重要指标。

因此,首先分析了季节预测模式在低层 (850 hPa)、中层 (500 hPa) 和高层 (200 hPa) 大气的气候偏差和年际变率。在低层大气上 (图 1),三个

模式预测的 850 hPa 纬向风差值场整体而言呈带状分布,相关系数在热带以外地区基本不显著,而在热带地区通过显著性检验的区域呈西北—东南向的分布。三个模式预测的 850 hPa 纬向风场方差比在整个区域基本都小于 1,说明预测的 EASM 年际变率都比观测值小。在东亚夏季风指数定义所在的两个区域, NCEP 和 TCC 模式预测的夏季 850 hPa 气候态风场的风向与大小与观测值比较一致,而 NCC 模式中的风向与大小均与观测值的差别较大 (图略)。进一步分析三个模式的 850 hPa 风场差值场 (图 1j-l),发现在西北太平洋地区都存在一个明显的气旋式异常环流,尤其是 NCC 模式,使得 WPSH 强度偏弱, EASM 强度偏强,是导致预测的长江流域的降水偏少的直接原因 (施能等,1996;张庆云和陶诗言,2003);在中层大气上 (图 2),三个模式预测的 500 hPa 位势高度场整体而言比观测低 (图 2a-c),对热带地区的 500 hPa 位势高度场预测技巧较高,特别是 NCC 模式,而对热带以外地区的 500 hPa 位势高度场预测技巧较低 (图 2d-f),这与李建平和丁瑞强 (2008)、施洪波等 (2008) 研究得到的结论一致。NCEP 模式预测的热带地区 500 hPa 位势高度场年际变率比观测大,其它地区比观测小,而 NCC 模式和 TCC 模式则大部分地区都比观测小 (图 2g-i)。因此,三个模式预测的 WPSH 强度偏弱, NCC 模式和 TCC 模式预测的 WPSH 年际变率偏小,而 NCEP 模式则偏大;在高层大气上 (图略), NCEP 模式和 NCC 模式模拟的 200 hPa 位势高度场整体偏低, NCEP 模式预测的 200 hPa 位势高度场与观测值的相关系数只在非洲地区和东南亚地区通过 0.05 显著性水平的统计检验,而 NCC 模式在低纬地区的相关系数通过 0.05 显著性水平的统计检验,在中纬地区则基本不显著。NCEP 模式在低纬地区年际变率偏大,在中纬地区偏小,而 NCC 模式则是一致偏小。

模式预测的中高层大气上东亚夏季环流气候态偏弱可能与预测的热带海温偏低有关,分析模式预测的春、夏季海表温度与观测的气候态差值场,发现三个模式预测的在赤道太平洋、西太暖池和北半球热带印度洋地区的前期和同期海表温度基本都偏低 (图 3a、c、e),一方面这在一定程度上会抑制模式中 Hadley 环流和 Walker 环流的上升运动,另一方面预测的前期海温比观测低,模式中海一气

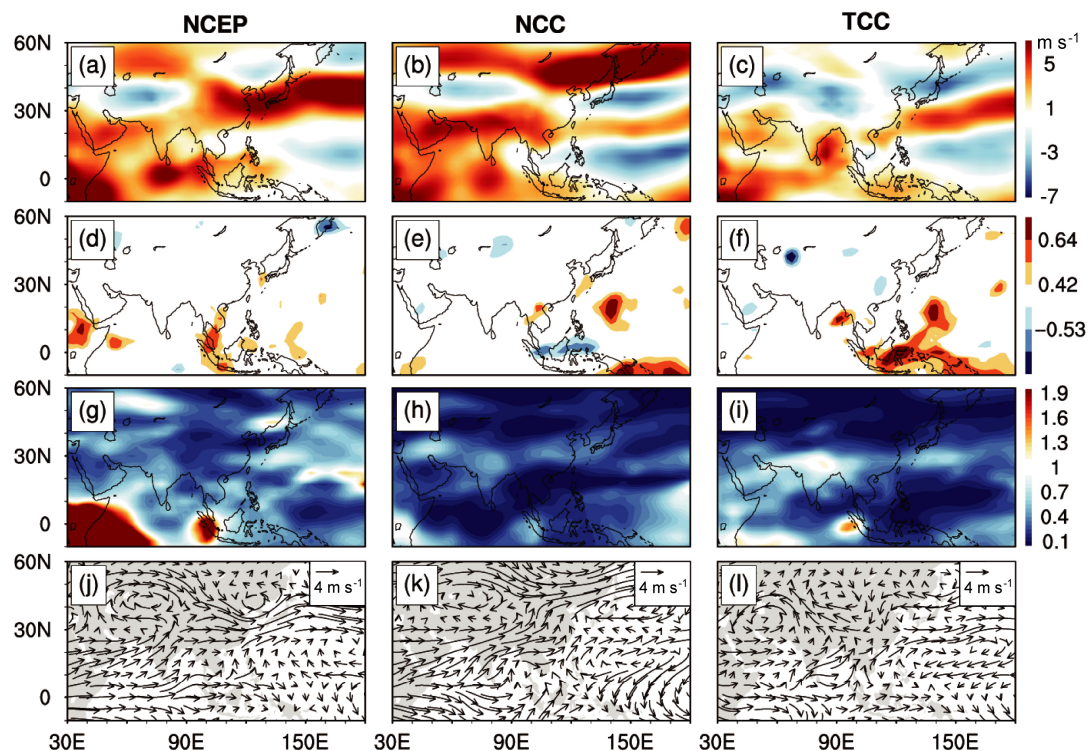


图1 三个模式(NCEP、NCC和TCC)预测的夏季850 hPa纬向风与观测值的(a-c)气候态差值(单位: m s^{-1})、(d-f)相关系数和(g-i)方差比。(j-l)三个模式预测的夏季850 hPa风场与观测的气候态差值的空间分布。差值场由模式结果减去观测值;方差比是模式格点方差与观测值之比,方差比大(小)于1代表模式预测的该区域夏季环流场的年际变率比观测大(小);相关分布阴影部分通过0.05显著性水平的统计检验;下同

Fig. 1 (a-c) Climate-mean difference fields (units: m s^{-1}), (d-f) correlation coefficient fields, and (g-i) ratio of variance fields between the 850-hPa zonal wind fields forecasted by three models (NECP, NCC, and TCC) and that from observations. (j-l) Climate-mean difference fields between 850-hPa wind forecasted by models and that from observations. The difference fields are calculated by model data minus observational data; the ratios of variance fields are results of model data divided by observational data, and the values that exceeding 1 represent the annual variation of the circulation forecasted by models are larger than that from observations and vice versa; the shaded areas represent values passing significance test at the 0.05 level; the same below

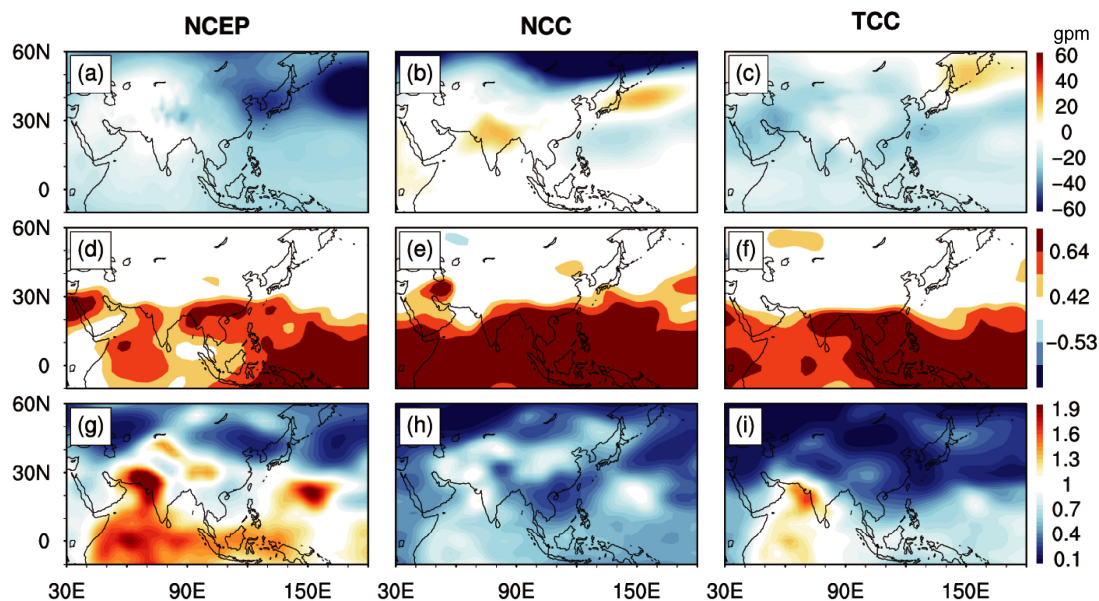


图2 三个模式预测的夏季500 hPa位势高度场与观测值的(a-c)气候态差值(单位: gpm)、(d-f)相关系数以及(g-i)方差比

Fig. 2 (a-c) Climate-mean difference fields (units: gpm), (d-f) correlation coefficient fields, and (g-i) ratio of variance fields between the 500-hPa geopotential height fields forecasted by three models and that from observations

相互作用剧烈程度比观测低,这可能是导致预测的东亚夏季环流气候态偏弱的重要原因。

3.2 EASM 和 WPSH 的预测能力

为了量化评估模式对 EASM 和 WPSH 强度的

预测能力,图 4 给出了模式预测的环流指数与观测指数的标准化偏差,可以看出,三个模式对 EASM 和 WPSH 的预测偏差有明显的年际变化,且变化特征整体上比较一致,但在部分年份偏差差异较大(如

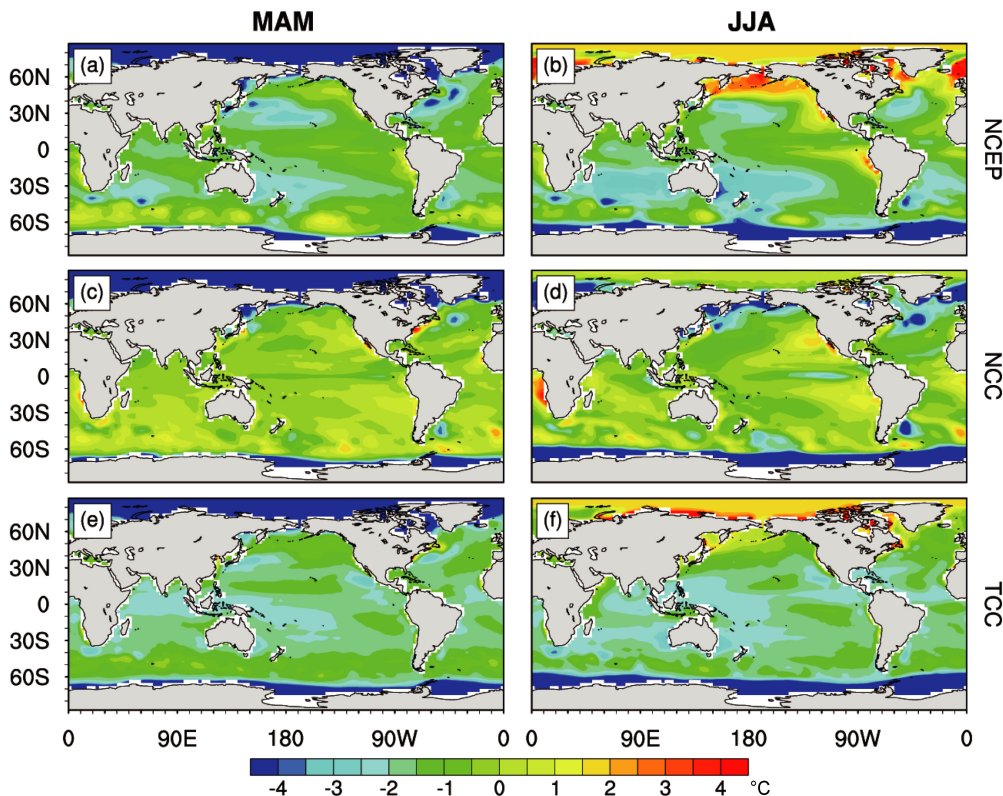


图 3 三个模式预测的 (a、c、e) 春季 (March–April–May, 简称 MAM)、(b、d、f) 夏季 (June–July–August, 简称 JJA) 海表温度与观测的气候态差值 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3 Climate-mean difference fields (units: $^{\circ}\text{C}$) between the sea surface temperature forecasted by three models and that from observations in the (a, c, e) spring (March–April–May, MAM) and (b, d, f) summer (June–July–August, JJA)

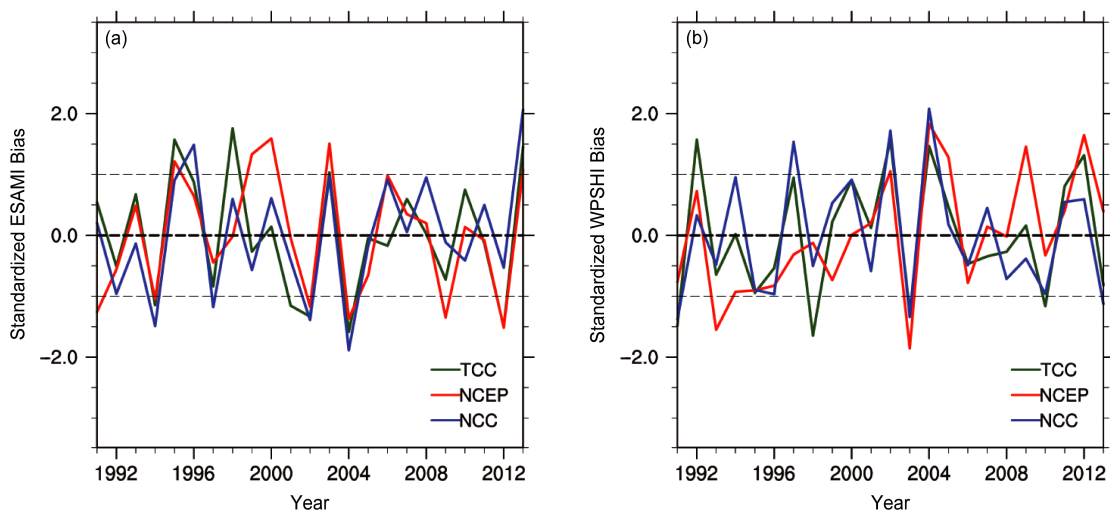


图 4 三个模式预测的 (a) 东亚夏季风指数 (EASMI)、(b) 西太平洋副高指数 (WPSHI) 与观测指数的标准化偏差。细虚线代表绝对值为 1 个单位的标准差,绝对值大于 1 定义为偏差显著

Fig. 4 Standardized differences between the (a) EASMI, (b) WPSHI forecasted by models and that from observations. The thin dashed lines represent 1 unit standardized difference and the values larger than 1 are defined as significant differences

1999 和 2000 年)。观测的 EASM 和 WPSH 具有明显的反相关关系(相关系数为 -0.8),而模式预测的 EASM 和 WPSH 的关系基本反映了该特征(NCEP 模式的相关系数为 -0.84 , NCC 模式的为 -0.77 , TCC 模式的为 -0.57)。此外,不同模式对同一环流系统强度的预测偏差显著的年份不尽相同,三个模式对 EASM 强度的预测偏差显著的共同年份有 1994、2002、2003、2004 和 2013 年,而对 WPSH 强度的预测偏差显著的共同年份则有 1994、2002、2003 和 2004。1994、2002、2004 和 2013 年的前一年秋季或冬季均未发生 ENSO 事件,因此模式对环流系统强度的预测偏差与 ENSO 事件有着密切的关系。

表 1 进一步分析比较了模式预测的环流指数与观测值的相关系数、均方根误差、标准差比和线性趋势系数。结果表明,对 EASM 而言, NCEP 模式、NCC 模式和 TCC 模式预测的 EASMI 与观测值的相关系数分别是 0.56、0.62 和 0.63, 相关系数都通过 0.05 显著性水平的统计检验。NCC 模式和 TCC 模式对 EASM 的预测技巧相当,而 NCEP 模式预测技巧相对较低,其原因可能与在菲律宾海东侧区域的 850 hPa 纬向风预测能力较差有关(图 1 d)。三个模式预测的指数均方根误差大小比较接近, NCC 模式的最小。三个模式预测的 EASM 年际变率都比观测小,其中 TCC 模式的显著偏小,指数标准差比只有 0.28。三个模式预测的 EASM 与观测都是线性增强,但 NCC 模式预测的指数趋势系数达到 0.077,并通过 0.05 显著性水平的统计检验,远大于观测指数的线性趋势系数(0.026),而 TCC 模式预测的指数线性趋势几乎不存在。此外, NCEP 模式预测的指数线性趋势与观测最接近。

对 WPSH 而言, NCEP、NCC 和 TCC 模式预测的 WPSHI 与观测值的相关系数分别是 0.7、0.73 和 0.48, 相关系数也都通过 0.05 显著性水平的统计检验。NCEP 和 NCC 模式对 WPSH 的预测技巧相当, TCC 模式对 WPSH 预测技巧相对较低,可能与 TCC 模式对热带地区以外的 WPSH 区域的 500 hPa 位势高度场预测能力较低(图 2 f)有关。三个模式预测的指数均方根误差大小比较接近, NCC 模式的最小。NCC 模式和 TCC 模式预测的 WPSH 年际变率都比观测小,而 NCEP 模式的则基本与观测一致。三个模式预测的 WPSH 与观测都线性增强,但 NCEP 模式预测的 WPSH 线性趋势系数明显比观测大,线性

趋势系数达到 0.51,通过 0.05 显著性水平的统计检验, NCC 模式预测的 WPSH 增强趋势与观测一致。

上面的分析表明,三个模式对 EASM 和 WPSH 的预测能力都比较高,而 NCC 模式相对更好。除了 NCEP 预测的 WPSH 的年际变率比观测大,三个模式预测的 EASM, NCC 和 TCC 模式预测的 WPSH 的年际变率都偏小,这与上面得到的结论是一致的。各个模式预测的环流指数均方根误差大小与相关系数大小类似, NCC 模式对 EASM 和 WPSH 预测最好。此外,三个模式预测的 EASM 和 WPSH 和观测都呈线性增强趋势。虽然三个模式预测 EASM 和 WPSH 在很多方面都比较一致,但是不同模式预测的同一环流系统的年际变率和线性变化趋势差异相对较大,因此有必要选取对环流系统在这些方面预测能力较好的模式进行集合预测。

表 1 模式预测与观测的东亚夏季风指数(EASMI)、西太平洋副高指数(WPSHI)的相关系数(CC)、均方根误差(RMSE)、标准差比(STDR)和线性趋势系数 LTC

Table 1 Correlation coefficient (CC), root-mean-square error (RMSE), ratio of standard deviation (STDR), and linear trend coefficient (LTC) between the circulation index forecasted by models and that from observations

	EASMI				WPSHI			
	CC	RMSE	STDR	LTC	CC	RMSE	STDR	LTC
NCEP	0.56*	1.6	0.83	0.022	0.7*	5.86	1.03	0.51*
NCC	0.62*	1.49	0.7	0.077*	0.73*	4.67	0.67	0.08
TCC	0.63*	1.58	0.28	0.003	0.48*	6	0.5	0.18
观测	1*	0	1	0.026	1*	0	1	0.08

注:加粗并带有“*”的数字表示通过 0.05 显著性水平的统计检验

4 EASM 和 WPSH 对热带海温异常的响应能力

短期气候预测的可预报性来源于地球系统的缓变信号,尤其是热带太平洋和热带印度洋的海温异常(丁一汇, 2011)。动力模式对东亚夏季环流的预测能否反映出东亚夏季环流与下垫面异常信号的联系,是检验动力模式可预测性的一个重要方面。因此需要进一步评估气候模式中 EASM 和 WPSH 对前期和同期海温外强迫的响应能力,这对进一步改进气候模式具有十分重要的作用。

4.1 东亚夏季风

热带海洋对东亚夏季环流有重要的影响,而 ENSO 对全球气候系统的年际变率的影响最为重要,一般在前一年秋季或冬季发展起来的 ENSO 事

件显著地影响着次年 EASM 的强度变化 (Webster et al., 1998; Wang et al., 2000)。

通过对比模式预测的 EASMI 和观测指数与实况海温的相关分布场随季节的演变 (图 5), 发现在观测中, EASMI 与前冬的赤道中东太平洋为负相关, 呈现类似于 ENSO 型的空间分布, 而在春季该负相关区不再显著, 到了夏季, 在西太暖池和赤道中太平洋分别出现了负相关区和正相关区, 但通过显著性检验的范围较小。相对于观测, 三个模式预测的 EASMI 与前冬的赤道中东太平洋的相关分布与其类似, 但负相关关系明显偏强, 且与热带西太平洋的正相关关系也更显著。在春季, 三个模式中上述的正相关区和负相关区依然存在, 但相关性减弱, 到了夏季, 三个模式在西太暖池有偏弱的负相关区, 而在赤道太平洋地区的相关区基本消失。总体而言, 模式预测的 EASM 与热带西太平洋和赤道中东太平洋的前期海温异常的相关性比观测强。

由于三个模式预测的 EASMI 和实况海温的相关关系与观测有较大的偏差, 因此需要进一步分析造成相关偏差的模式误差。耦合模式的误差来源非常复杂, 除了不同分量模式的误差外, 耦合过程也存在着误差, 并且误差之间存在着复杂的非线性相互作用。气候模式中的海洋分量模式和各分量模式耦合模块并不完美, 但如果动力模式中海洋和大气的关系与观测类似, 则表明误差主要源自于海洋分量模式的不准确。如果模式内部的海—气相互作用存在明显的偏差, 除了需要改进海洋分量模式外, 模式内部与海气相互作用相关的物理过程也需要继续改进, 因此需要进一步分析季节预测模式的误差来源。模式预测的 EASMI 指数与模式预测的海温的相关分布 (图 6) 表明, 三个模式不仅在春季的热带太平洋存在与观测中类似的相关区, 而且 NCEP 模式和 TCC 模式在热带印度洋均有负相关区。在夏季热带印度洋负相关区增强, NCC 模式在赤道太平洋出现正相关区, 而 NCEP 模式和 TCC 模式在赤道太平洋的相关区基本消失。采用 Niño3.4 指数表征 ENSO 事件强度, 进一步量化研究模式中 EASM 对 ENSO 外强迫的响应能力 (表 2), 发现 TCC 模式预测的 EASM 和前期 Niño3.4 指数的相关系数与观测的最为接近, 表明 TCC 模式较为真实地反映了 EASM 对 ENSO 事件的响应。因此, NCEP 模式和 TCC 模式预测的 EASM 对热带印度洋的前期和同期海温异常的响应偏强, 而对赤道中东太平

洋的前期海温异常的响应偏强。相对于另外两个模式, NCC 模式预测的 EASM 对热带太平洋前期和同期海温异常的响应都显著偏强。由于三个季节预测模式预测的 EASMI 和预测春季、夏季海温的相关分布与观测有明显的偏差, 因此模式的海洋分量模块与模式内部与 EASM 有关的海—气相互物理过程都存在较大缺陷, 尤其是 NCC 模式。

春季可预报性障碍是 ENSO 预测的一个显著特点, 主要是指模式和持续性预报对 ENSO 的预报技巧在 4、5 月快速下降, 导致 ENSO 预报结果产生较大不确定性的现象 (Webster and Yang, 1992; Webster, 1995)。三个模式预测的 EASMI 无论与实况春季海温还是与预测的春季海温算相关, 在赤道中东太平洋都有负相关区, NCC 模式负相关区的偏强尤其明显, 而模式对 ENSO 预测的春季可预报性障碍会增加 EASM 预测结果的不确定性, 从而使得 EASM 的预测误差增大。

表 2 模式预测和观测的 EASMI 分别与 Niño3.4 指数的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the EASM index forecasted by models, the EASM index from observations and the Niño3.4 index

	观测 Niño3.4 指数			模式预测 Niño3.4 指数	
	DJF(-1)	MAM(0)	JJA(0)	MAM(0)	JJA(0)
NCEP 预测 EASMI	-0.74*	-0.688*	0.022	-0.612*	0.261
NCC 预测 EASMI	-0.83*	-0.672*	0.37	-0.642*	0.713*
TCC 预测 EASMI	-0.56*	-0.46*	0.402	-0.376	0.264
观测 EASMI	-0.48*	-0.229	0.56*	/	/

注: -1 为前一年, 0 为当前年; 加粗并有 “*” 数字表示通过 0.05 显著性水平的统计检验

4.2 西太平洋副热带高压

前一年秋季或冬季发展起来的 ENSO 暖 (冷) 事件会在冬季达到极值, 此时 ENSO 对 WPSH 影响最大, 赤道东太平洋暖 (冷) 海温异常通过类 Walker 环流增强 (减弱) WPSH。前冬热带印度洋暖 (冷) 海温异常通过形成上升下沉的环流圈, 也可以增强 (减弱) WPSH (Chung et al., 2011)。在春季, 当 ENSO 暖 (冷) 事件处于衰减期时, 在 ENSO 发展期由于电容器效应不断增温 (降温) 的热带印度洋会在成为增强 (减弱) WPSH 的主要外强迫因子 (Xie et al., 2009)。在夏季, 由于气流的上升支会从前一年秋季海温正异常的热带印度洋移到当前年夏季的海洋大陆上空, 西太暖池是增强 WPSH 的主要海温外强迫源 (Sui et al., 2007; Chung et al., 2011)。

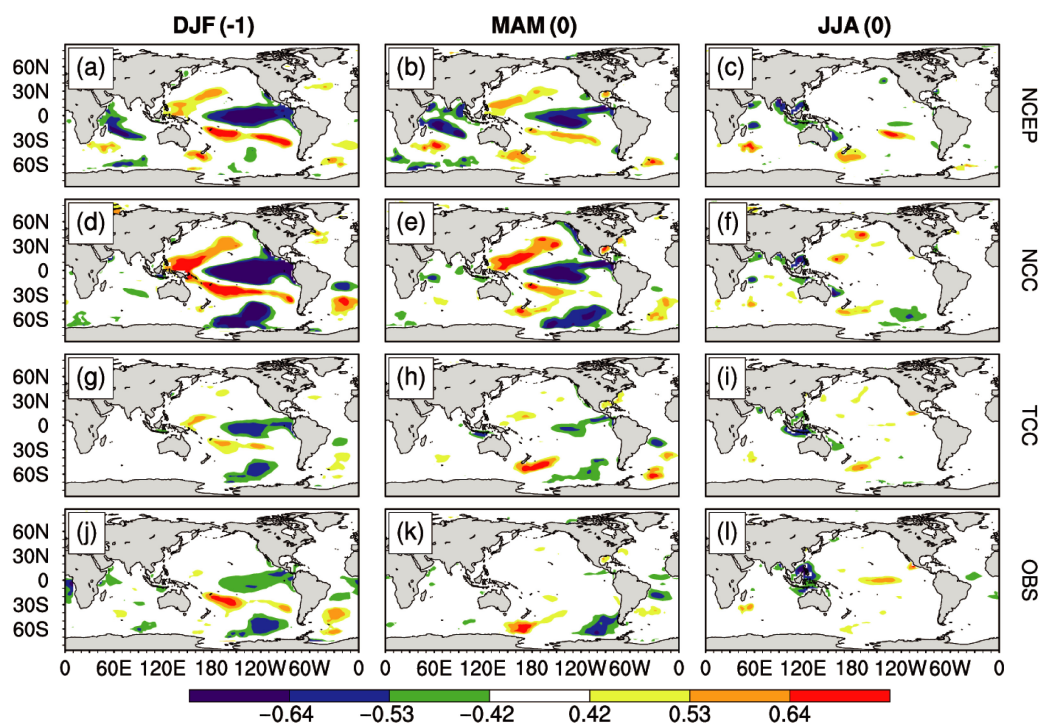


图5 三个模式预测的EASMI和观测(OBS)指数分别与实况前冬(December–January–February, 简称DJF)、春季(MAM)和夏季(JJA)海温的相关系数分布场。阴影部分表示通过0.05显著性水平的统计检验。-1为前一年, 0为当前年, 下同

Fig. 5 Correlation coefficient fields of the EASM index forecasted by models and the EASM index from observations with the observed sea surface temperature in preceding boreal winter (December–January–February, DJF), spring (MAM), and summer (JJA). Shaded areas indicate the correlations pass significance test at the 0.05 level. -1 represents the preceding year and 0 represents the current year, the same below

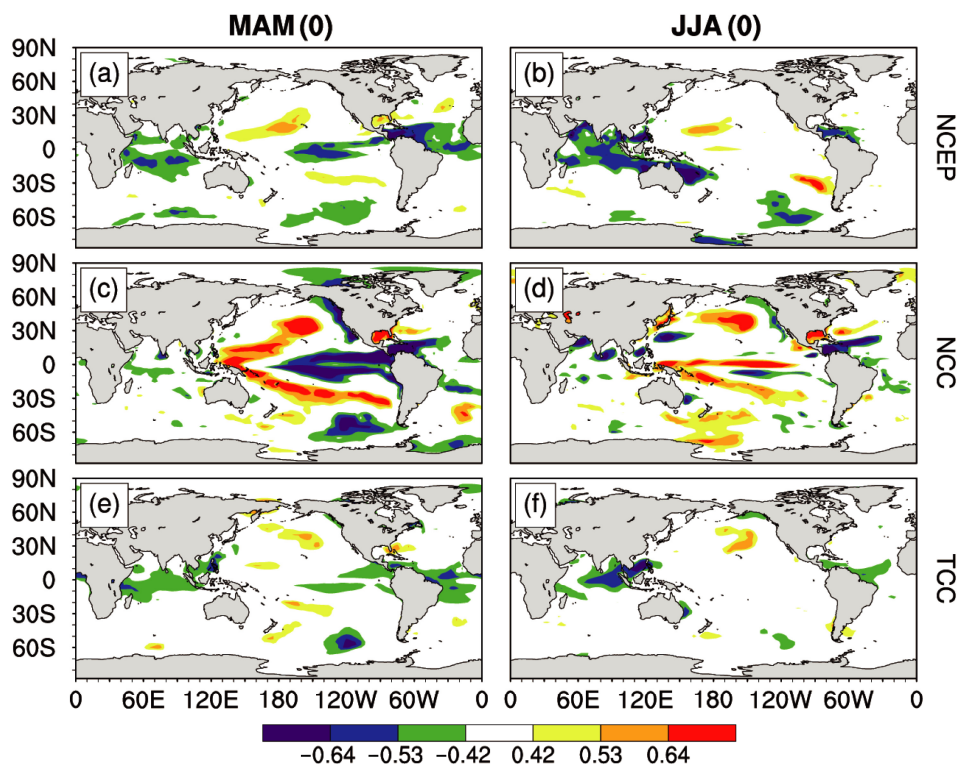


图6 三个模式预测的EASMI分别与预测的春季、夏季海温的相关分布场。阴影部分通过0.05显著性水平的统计检验

Fig. 6 Correlation coefficient fields between the EASM index and the sea surface temperature forecasted by models in the spring (MAM) and summer (JJA). Shaded areas indicate the correlation passes significance test at the 0.05 level

相应地分析模式预测的 WPSH 对海温外强迫的响应能力, 计算了模式预测的夏季 WPSHI 与实况海温的相关分布随季节演变 (图 7), 结果表明, 在观测中, 前冬的赤道中东太平洋以及热带印度洋有正相关区, 呈现类似于 ENSO 型的空间分布, 体现了夏季 WPSH 对 ENSO 事件的响应 (Chung et al., 2011)。在春季赤道中东太平洋上的正相关区消失, 而热带印度洋的正相关区则扩大增强, 反映了春季的印度洋海温对夏季 WPSH 有显著的影响 (Xie et al., 2009)。到了夏季热带印度洋的正相关区缩小减弱, 而在西太暖池出现一个正相关区, 说明了影响 WPSH 的热带海洋从前期的赤道中东太平洋和热带印度洋变为同期的西太暖池 (Sui et al., 2007; Chung et al., 2011)。模式中这种正相关区的分布及季节演变基本与观测一致, 主要的不同点在于 NCEP 模式和 TCC 模式在冬季的赤道中东太平洋上的正相关区偏弱, 而 NCC 模式则偏强且持续到春季。

图 8 是模式预测的 WPSHI 和模式海温的相关分布场, 发现三个模式在春季的赤道太平洋和热带印度洋有显著偏强的正相关区, 而在夏季, 赤道中东太平洋的正相关区基本消失, 热带印度洋的正相关区依然显著偏强, 而西太暖池的正相关区则扩大增强。相对于观测, 三个模式预测的 WPSH 对春季的赤道太平洋和夏季的热带印度洋与热带西太平洋的海温异常响应强度显著偏强, 相关分布与观测有明显差异, 这说明三个季节预测模式内部与 WPSH 有关的海—气相互物理过程也存在缺陷。

三个模式预测的 WPSH 与预测的春季海温相关在赤道中东太平洋存在显著偏强的正相关区, 因此 ENSO 预测的春季可预报性障碍有可能增加了 WPSH 的预测误差。此外, 通过量化研究模式预测的 WPSH 对 ENSO 事件的响应能力 (表 3), 还发现模式预测的 WPSH 对春季 Niño3.4 海区海温外强迫作用响应显著偏强, NCC 模式预测的 WPSH 对 ENSO 事件的响应能力整体而言与观测最接近。

综上, 三个模式预测的 EASM 和 WPSH 对热带海洋海温异常的响应随季节演变特征与观测比较一致, 但 NCEP 模式和 TCC 模式预测的 EASM 对前期热带太平洋和前期、同期热带印度洋的海温异常响应比观测强, NCC 模式预测的 EASM 对前期和同期的热带太平洋的海温异常响应明显比观测强。同时, 三个模式预测的 WPSH 对前期和同期的热带太平洋、热带印度洋和热带大西洋的海温异常响应明

显强于观测。三个季节预测模式的海洋分量模块与模式内部与 EASM 和 WPSH 有关的海—气相互物理过程都存在较大缺陷, 需要进一步的改进。

表 3 模式预测和观测的 WPSHI 分别与 Niño3.4 指数的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between the WPSH index forecasted by models, the WPSH index from observations and the Niño3.4 index

	观测 Niño3.4 指数			模式预测 Niño3.4 指数	
	DJF(-1)	MAM(0)	JJA(0)	MAM(0)	JJA(0)
NCEP 预测 WPSHI	0.75*	0.681*	-0.063	0.737*	-0.08
NCC 预测 WPSHI	0.77*	0.614*	-0.147	0.707*	-0.413*
TCC 预测 WPSHI	0.74*	0.752*	0.024	0.857*	0.191
OBS 观测 WPSHI	0.66*	0.439*	-0.322	/	/

注: -1 为前一年, 0 为当前年; 加粗并有 “*” 数字表示通过 0.05 显著性水平的统计检验

5 ENSO 对东亚夏季环流预测的影响

ENSO 事件对全球气候变化有非常重要的影响, Wang et al. (2000) 研究表明, 前一年秋季或冬季发展的 ENSO 暖 (冷) 事件会加强 (减弱) EASM 强度。考虑前冬 Niño3.4 海区海温异常对夏季东亚环流系统有显著的外强迫作用, 如果前一年秋季或者冬季有 El Niño 事件发生, 则定义当前年为 El Niño 年, 类似地定义了 La Niña 年, 如果前一年的秋季或者冬季没有 ENSO 事件发生, 定义当前年为正常 (Normal) 年。参考 NCEP/NOAA 季节冷暖事件的海洋 Niño3.4 指数, 选取 1991~2013 年的 El Niño 年 (1992、1995、1998、2003、2005、2007、2010 年)、La Niña 年 (1996、1999、2000、2001、2006、2008、2009、2011、2012 年) 以及正常 (Normal) 年 (1993、1994、1997、2002、2004、2013 年)。

对三个模式而言, 同一模式预测的 850 hPa 纬向风在三种年份的 EASM 副热带区域 (25°~35°N, 100°~150°E) (简称副热带区域) 和热带区域 (10°~20°N, 100°~150°E) (简称热带区域) 平均绝对误差 (mean absolute error, 简称 MAE) 分布特征都比较一致 (图 9)。对于 NCEP 模式, 在正常年的热带区域的 MAE 比另外两种年份的小; 对于 NCC 模式, 在 La Niña 年的副热带区域的 MAE 比另外两种年份的小; 对于 TCC 模式, 在 La Niña 年的副热带区域和热带区域的 MAE 都比另外两种年份的小。在 WPSH 区域 (15°~30°N, 120°~140°E), 对三个模式而言, 同一模式预测的 500 hPa 位势高度分别在

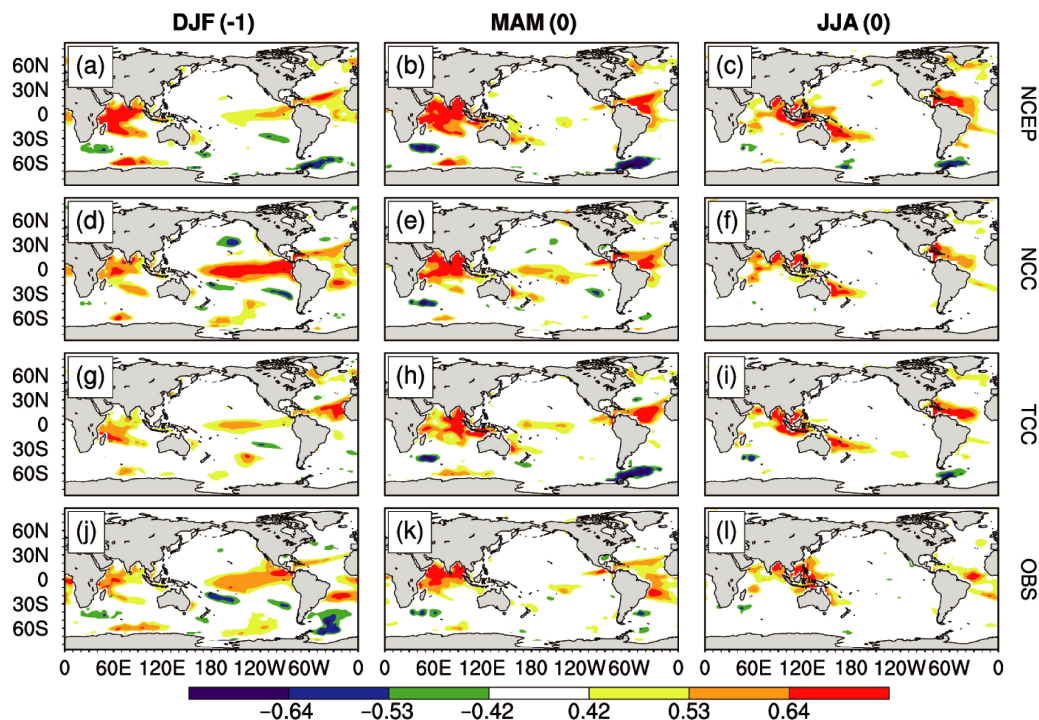


图7 同图5, 但为 WPSH

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for the WPSH index

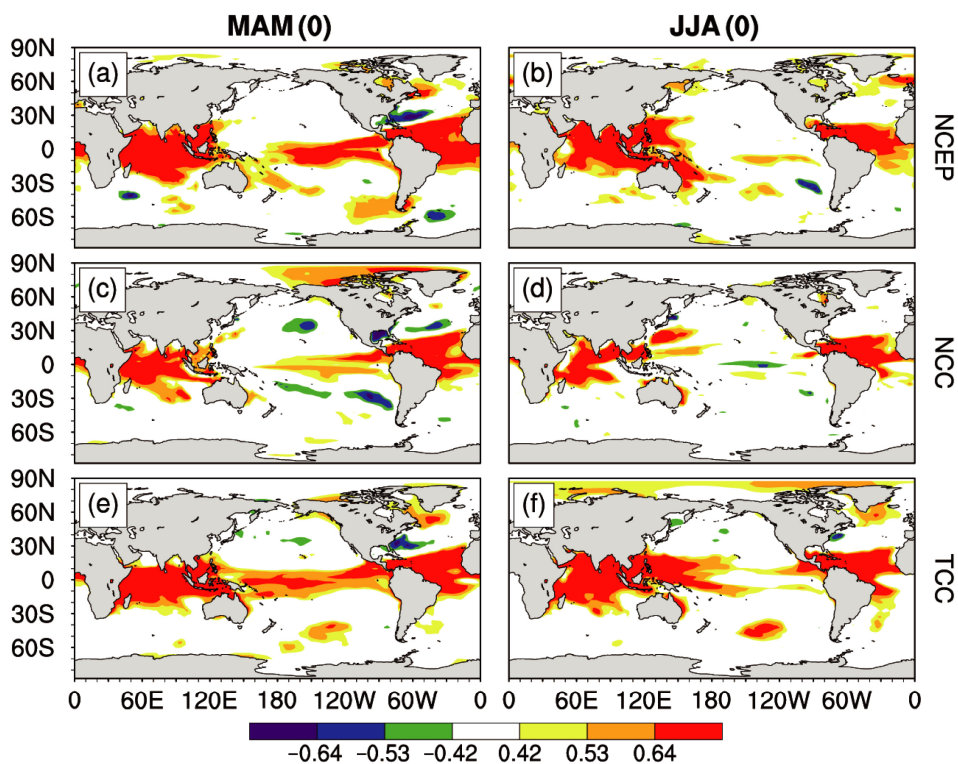


图8 同图6, 但为 WPSH

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for the WPSH index

El Niño 年和 La Niña 年的 MAE 分布特征都比较类似, 且正常年的 MAE 要比 ENSO 年的大。此外, 三个模式在同一种年份的 MAE 分布特征也比较一致 (图 10)。为了量化分析 ENSO 对环流系统预测误差的影响, 计算了模式预测的环流指数 MAE

(图 11), 发现三个模式预测的 EASM 和 WPSH 在 ENSO 年的 MAE 整体而言要比正常年的小很多, NCEP 模式和 NCC 模式预测的 EASM 和 WPSH 强度的 MAE 在 La Niña 年和 El Niño 年差别不大, 而 TCC 模式预测的两个环流系统的 MAE 在 El Niño 年

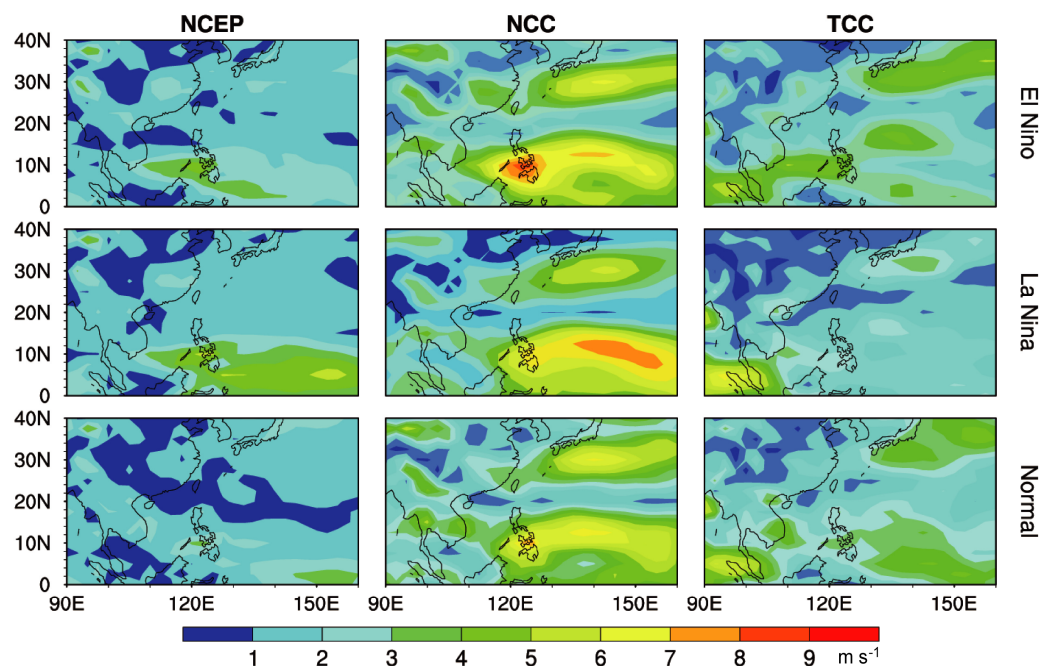


图 9 模式预测的 850 hPa 纬向风在三种年份 (El Niño 年、La Niña 年和 Normal 年) 的格点 MAE (平均绝对误差; 单位: m s^{-1}) 分布

Fig. 9 MAEs (Mean Absolute Errors) fields of 850-hPa zonal winds (units: m s^{-1}) forecasted by models in three types (El Niño, La Niña, and Normal) of years (units: m s^{-1})

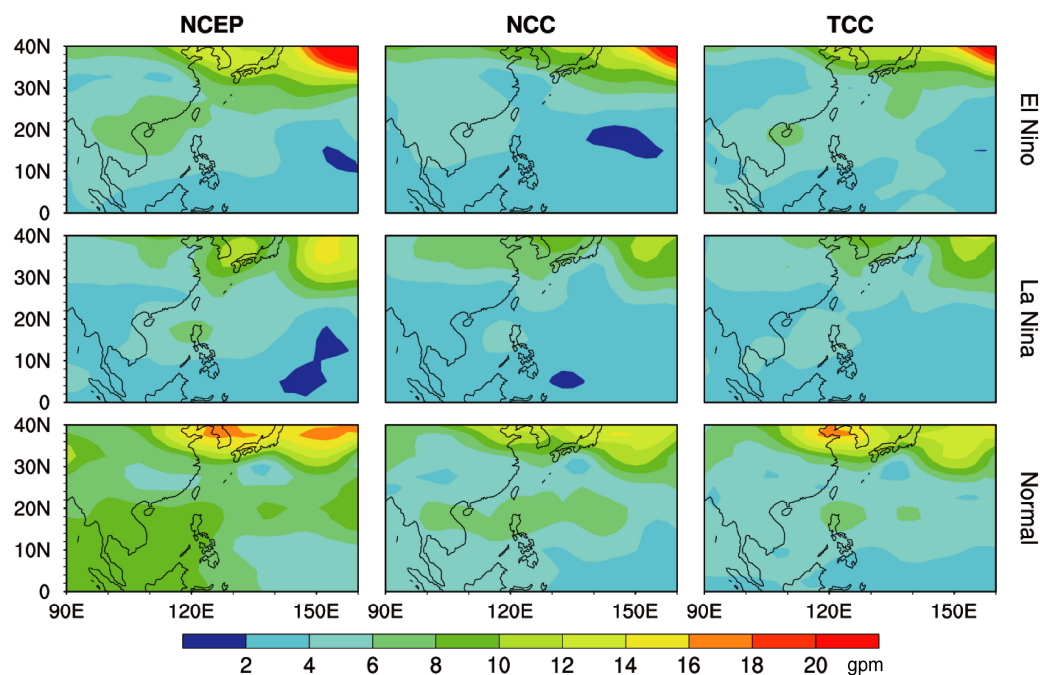


图 10 同图 9, 但为 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm)

Fig. 10 Same as Fig. 9 but for 500-hPa geopotential height fields (units: gpm)

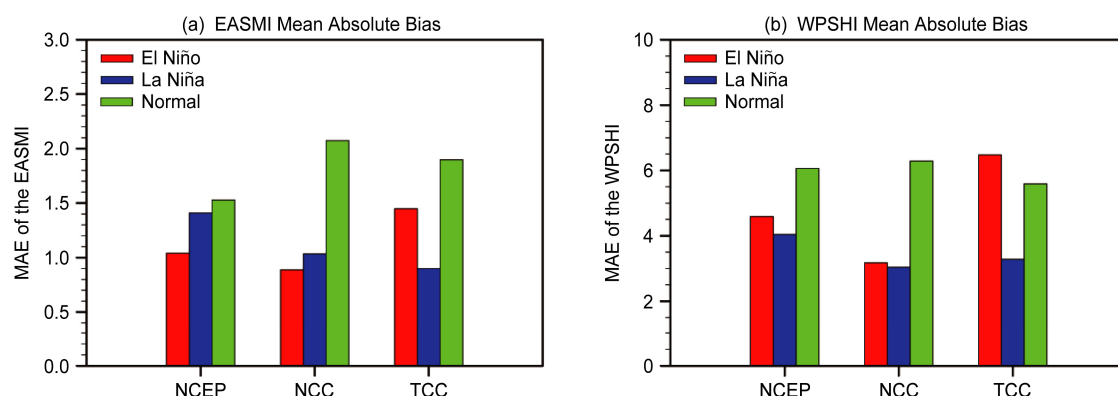


图 11 模式预测的两个环流指数 MAE: (a) 东亚夏季风指数 (单位: m s^{-1}); (b) 西太平洋副高指数 (单位: gpm)

Fig. 11 MAEs of the (a) EASM index (units: m s^{-1}) and (b) WPSH index (units: gpm) forecasted by models

比在 La Niña 年大很多。因此, 相比另外两个模式, TCC 模式对 EASM 和 WPSH 的预测能力在 El Niño 年较差。

本文前面的研究已经指出, TCC 模式对夏季 WPSH 的预测技巧低于另外两个模式, 预测的 WPSH 指数与观测值的相关系数仅为 0.48。此外, TCC 模式预测的 WPSH 的 MAE 在 El Niño 年比在 La Niña 大很多, 甚至比在正常年的大 (图 11)。图 5b 显示, TCC 模式对 WPSH 的预测偏差在 1992 年和 1998 年这两个 El Niño 年显著, 另外两个模式对 WPSH 的预测偏差则不显著。1992 年前秋或前冬有发展起来的 El Niño 事件, 但当前年的秋季或者冬季没有 ENSO 事件发生, 而 1997/1998 年是前所未有强的 ENSO 暖事件, 它对全球气候产生了重要的影响 (McPhaden, 1999)。TCC 模式对 WPSH 在这两个异常的 El Niño 年预测技巧偏低可能是 TCC 模式对 WPSH 的预测技巧远低于另外两个模式的重要原因之一。同时, 这也说明 ENSO 事件对东亚夏季环流的预测有重要的影响, 是其重要的可预报源。

6 总结与讨论

东亚夏季环流对中国夏季降水有重要的影响, 因此本文利用最新的三个季节预测模式, 进一步认识了季节预测模式对东亚夏季环流的预测能力。首先评估了三个季节预测模式对东亚大气环流的气候背景和年际变率的预测能力, 在此基础上, 定量评估了季节预测模式对东亚夏季风 (EASM) 和夏季西太平洋副热带高压 (WPSH) 强度的预测能力。通过分析了 EASM 和 WPSH 对热带海温异常的响应能力, 诊断了预测误差的可能原因, 并评估了 ENSO

事件对 EASM 和 WPSH 预测的影响, 主要结论如下:

(1) 三个模式对 EASM 和 WPSH 都具有较高的预报技巧, 但 TCC 模式对 WPSH 的预报技巧相对较低。NCC 模式对 EASM 和 WPSH 强度预测最好。三个模式预测赤道太平洋、西太暖池和北半球热带印度洋海表温度低于观测值, 且预测的 EASM 和 WPSH 的年际变率都比观测小。三个模式预测的 EASM 和 WPSH 和观测都呈线性增强趋势, NCEP 模式预测的 EASM 和 NCC 模式预测的 WPSH 线性增强趋势与观测基本一致, 但 NCC 模式预测的 EASM 和 NCEP 模式预测的 WPSH 线性增加趋势明显比观测高。

(2) 进一步分析了季节预测模式预测的 EASM 和 WPSH 对热带海温异常的响应能力, 结果表明, NCEP 模式和 TCC 模式预测的 EASM 对热带印度洋的前期和同期海温异常的响应过强, 对赤道中东太平洋的前期海温异常的响应也偏强。相对于另外两个模式, NCC 模式预测的 EASM 对热带太平洋前期和同期海温异常的响应都显著偏强。此外, 三个模式预测的 WPSH 对热带太平洋、西大西洋和印度洋的前期和同期海温的响应显著偏强。

(3) ENSO 事件的强度对季节预测模式对 EASM 和 WPSH 强度的预测能力有着重要的影响。三个模式预测的 EASM 和 WPSH 在 ENSO 年的 MAE 整体而言要比正常年的小很多, NCEP 模式和 NCC 模式预测的 EASM 和 WPSH 的 MAE 在 La Niña 年和 El Niño 年差别不大, 而 TCC 模式预测的两个环流系统的 MAE 在 El Niño 年比在 La Niña 年大很多。

热带海洋的缓变信号是东亚夏季环流季节预测最重要的可预报源, 海—气耦合过程对东亚夏季环

流的模拟也至关重要, 基于此, 本文分析季节预测模式预测的东亚夏季环流对热带海洋海温异常的响应偏差相关的模式误差。表明季节预测模式中除了海洋分量模式和大气分量模式本身的误差之外, 海—气耦合过程的误差也是不可忽视的。三个模式预测的热带海温整体偏低, 以及模式中东亚夏季环流对热带海温异常的响应偏差, 都说明季节预测模式对海洋动力过程以及海—气耦合过程的刻画能力不足。究其原因, 一方面是因为目前对海洋动力学过程和外强迫影响东亚夏季环流的物理机制的认识依然不够, 另一方面可能是模式对这些过程的刻画不尽合理, 因此进一步确定东亚夏季环流对热带海温异常错误响应的根本来源(动力框架和参数化方案), 并减少东亚夏季环流预测的不确定性是一个非常值得深入研究的问题。

参考文献 (References)

- Chung P H, Sui C H, Li T. 2011. Interannual relationships between the tropical sea surface temperature and summertime subtropical anticyclone over the western North Pacific [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.* (1984–2012), 116 (D13), doi:10.1029/2010JD015554.
- 丁一汇. 2011. 季节气候预测的进展和前景 [J]. *气象科技进展*, 1(3): 14–27. Ding Yihui. 2011. Progress and prospects of seasonal climate prediction [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 1 (3): 14–27.
- 封国林, 戴新刚, 王爱慧, 等. 2001. 混沌系统中可预报性的研究 [J]. *物理学报*, 50 (4): 606–611. Feng Guolin, Dai Xin'gang, Wang Aihui, et al. 2001. On numerical predictability in the chaos system [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 50 (4): 606–611, doi:10.3321/j.issn:1000-3290.2001.04.005.
- 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 analogy–dynamical model [J]. *Science in China (Series B)* (in Chinese), 35 (2): 207–216, doi:10.1360/yb1992-35-2-207.
- 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 (511): 547–565, doi:10.1002/qj.49711951111.
- Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 6 (1): 21–32, doi:10.1007/BF02656915.
- Huang R H, Chen J L, Huang G. 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24 (6): 993–1023, doi:10.1007/s00376-007-0993-x.
- 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 Dyn.*, 39 (12): 2975–2991, doi:10.1007/s00382-012-1470-5.
- Li H M, Dai A G, Zhou T J, et al. 2010. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950–2000 [J]. *Climate Dyn.*, 34 (4): 501–514, doi:10.1007/s00382-008-0482-7.
- 李建平, 丁瑞强. 2008. 短期气候可预报期限的时空分布 [J]. *大气科学*, 32 (4): 975–986. Li Jianping, Ding Ruiqiang. 2008. Temporal–spatial distributions of predictability limit of short-term climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (4): 975–986, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.22.
- Li J P, Ding R Q. 2011. Temporal–spatial distribution of atmospheric predictability limit by local dynamical analogs [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139 (10): 3265–3283, doi:10.1175/MWR-D-10-05020.1.
- Lu R Y. 2001. Interannual variability of the summertime North Pacific subtropical high and its relation to atmospheric convection over the warm pool [J]. *J. Meteor. Soc. Japan Ser. II*, 79 (3): 771–783, doi:10.2151/jmsj.79.771.
- McPhaden M J. 1999. Genesis and evolution of the 1997–1998 El Niño [J]. *Science*, 283 (5404): 950–954, doi:10.1126/science.283.5404.950.
- Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al. 2014. The NCEP climate forecast system version 2 [J]. *J. Climate*, 27 (6): 2185–2208, doi:10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
- 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.
- 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常 [J]. *大气科学*, 20 (5): 575–583. Shi Neng, Zhu Qian'gen, Wu Bin'gui. 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather–climate anomaly in China for last 40 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 20 (5): 575–583, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.05.08..
- Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land–ocean surface temperature analysis (1880–2006) [J]. *J. Climate*, 21 (10): 2283–2296, doi:10.1175/2007JCLI2100.1.
- Sui C H, Chung P H, Li T. 2007. Interannual and interdecadal variability of the summertime western North Pacific subtropical high [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (11), doi:10.1029/2006GL029204.
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J. Climate*, 13 (9): 1517–1536, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2.
- Wang B, Ding Q H, Fu X H, et al. 2005. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (15), doi:10.1029/2005GL022734.
- 王阔, 封国林, 孙树鹏, 等. 2012. 基于 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻事件 10~30 天延伸期稳定分量的研究 [J]. *物理学报*, 61 (10): 109201. Wang Kuo, Feng Guolin, Sun Shupeng, et al. 2012. Study of the stable components in extended-range forecasting for the coming 10–30 days during the snow storm event in January 2008 [J]. *Acta Physica Sinica*

- (in Chinese), 61 (10): 109201, doi:10.7498/aps.61.109201.
- 汪翔加, 郑志海, 封国林, 等. 2015. BCC_CSM 模式夏季关键区海温回报评估 [J]. 大气科学, 39 (2): 271–288. Wang Xujia, Zheng Zhihai, Feng Guolin, et al. 2015. Summer prediction of sea surface temperatures in key areas in BCC_CSM model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (2): 271–288, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.13329.
- Webster P J. 1995. The annual cycle and the predictability of the tropical coupled ocean–atmosphere system [J]. Meteor. Atmos. Phys., 56 (1–2): 33–55, doi:10.1007/BF01022520.
- Webster P J, Yang S. 1992. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 118 (50): 877–926, doi:10.1002/qj.49711850705.
- Webster P J, Magaña V O, Palmer T N, et al. 1998. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction [J]. J. Geophys. Res.: Oceans (1978–2012), 103 (C7): 14451–14510, doi:10.1029/97JC02719.
- 吴统文, 宋连春, 刘向文, 等. 2013. 国家气候中心短期气候预测模式系统业务化进展 [J]. 应用气象学报, 24 (5): 533–543. Wu Tongwen, Song Lianchun, Liu Xiangwen, et al. 2013. Progress in developing the short-range operational climate prediction system of China National Climate Center [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24 (5): 533–543, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.05.003.
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2009. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate [J]. J. Climate, 22 (11): 2992–3005, doi:10.1175/2008JCLI2710.1.
- Wu B, Li T, Zhou T J. 2010. Relative contributions of the Indian Ocean and local SST anomalies to the Maintenance of the Western North Pacific anomalous anticyclone during the El Niño decaying summer [J]. J. Climate, 23 (11): 2974–2986, doi:10.1175/2010JCLI3300.1.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. J. Climate, 22 (3): 730–747, doi:10.1175/2008JCLI2544.1.
- 张庆云, 陶诗言. 1998. 夏季东亚热带和副热带季风与中国东部汛期降水 [J]. 应用气象学报, 9 (增刊): 17–23. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1998. Tropical and subtropical monsoon over East Asia and its influence on the rainfall over eastern China in summer [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9 (S): 17–23.
- 张庆云, 陶诗言. 2003. 夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大气环流特征 [J]. 大气科学, 27 (3): 369–380. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2003. The anomalous subtropical anticyclone in western Pacific and their association with circulation over East Asia during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (3): 369–380, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.03.07.
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. 气象学报, 61 (5): 559–569. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. 2003. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (5): 559–569, doi:10.11676/qxxb2003.056.
- 赵俊虎, 封国林, 王启光, 等. 2011. 2010 年我国夏季降水异常气候成因分析及预测 [J]. 大气科学, 35 (6): 1069–1078. Zhao Junhu, Feng Guolin, Wang Qiguang, et al. 2011. Cause and prediction of summer rainfall anomaly distribution in China in 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (6): 1069–1078, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.07.
- 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, doi:10.3321/j.issn:1000-3290.2009.10.114.
- 郑志海, 封国林, 丑纪范, 等. 2010. 数值预报中自由度的压缩及误差相似性规律 [J]. 应用气象学报, 21 (2): 139–148. Zheng Zhihai, Feng Guolin, Chou Jifan, et al. 2010. Compression for freedom degree in numerical weather prediction and the error analogy [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21 (2): 139–148, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.02.002.
- 郑志海, 黄建平, 封国林, 等. 2013. 延伸期可预报分量的预报方案和策略 [J]. 中国科学: 地球科学, 43 (4): 594–605. Zheng Zhihai, Huang Jianping, Feng Guolin, et al. 2013. Forecast scheme and strategy for extended-range predictable components [J]. Science China Earth Sciences, 56 (5): 878–889, doi:10.1007/s11430-012-4513-1.
- Zhou T J, Yu R Q, Zhang J, et al. 2009. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s [J]. J. Climate, 22 (8): 2199–2215, doi:10.1175/2008JCLI2527.1.
- 邹立维, 周天军, 吴波, 等. 2009. GAMIL CliPAS 试验对夏季西太平洋副高的预测 [J]. 大气科学, 33 (5): 959–970. Zhou Liwei, Zhou Tianjun, Wu Bo, et al. 2009. The interannual variability of summertime western Pacific subtropical high hindcasted by GAMIL CliPAS experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 959–970, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.07.