

程智,高辉,朱月佳,等,2020. BCC 第二代气候系统模式对东亚夏季气候预测能力的评估[J]. 气象,46(11):1508-1519. Cheng Z, Gao H, Zhu Y J, et al, 2020. Evaluation on the performance of BCC second-generation climate system model for East Asian summer climate prediction[J]. Meteor Mon, 46(11):1508-1519(in Chinese).

BCC 第二代气候系统模式对东亚夏季 气候预测能力的评估*

程 智¹ 高 辉² 朱月佳³ 史跃玲⁴ 刘俊杰¹ 汪栩加¹

1 安徽省气候中心,合肥 230031

2 国家气候中心,北京 100081

3 安徽省气象台,合肥 230031

4 安徽省宣城市气象局,宣城 242000

提 要: 基于国家气候中心第二代气候系统模式的回报和实时预测数据,利用同期和滞后相关、偏相关分析以及联合 EOF 分解等方法,评估了其对于夏季东亚环流和降水的预测能力。结果表明,模式对高低层环流和降水气候态的空间分布形势,特别是强降水中心和季风系统成员位置的预测较为合理,但存在一定的系统性偏差。模式对于东亚特别是中国大陆地区夏季降水年际变化的预测能力较弱,但对于东亚 500 hPa 高度场年际变化的预测效果较好,并且随着起报月的临近,技巧有所改进,此外模式对于东亚夏季气候变率主要模态的时空分布特征具有较高的预测技巧。模式较好地反映出了东亚夏季气候对 El Niño 发展和衰减响应的主要特征,其技巧主要来源于对于东部型 El Niño 影响的准确把握。总体来看,该模式对东亚夏季气候的预测能力较好,对短期气候预测具有一定参考价值。

关键词: 气候预测,模式评估,BCC 二代气候系统模式,东亚气候

中图分类号: P468

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.011

Evaluation on the Performance of BCC Second-Generation Climate System Model for East Asian Summer Climate Prediction

CHENG Zhi¹ GAO Hui² ZHU Yuejia³ SHI Yueling⁴ LIU Junjie¹ WANG Xujia¹

1 Anhui Climate Centre, Hefei 230031

2 National Climate Centre, Beijing 100081

3 Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031

4 Xuancheng Meteorological Office of Anhui Province, Xuancheng 242000

Abstract: Based on circulation and precipitation hindcast and real-time forecast data of BCC Second-Generation Climate System Model developed by National Climate Centre, the evaluation of the ability of the model for East Asian summer climate prediction is carried by using the synchronized and lag correlation, partial correlation and combined EOF decomposition analysis. The results show that the main spatial distribution of high- and low-level circulation and precipitation climatological fields can be well predicted, particularly the location of the heavy rainfall center and members of the monsoon system, but with some systematic biases.

* 国家自然科学基金项目(41605068)、淮河流域气象开放研究基金项目(HRM201707)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-053)、中国气象局关键技术发展专项(YBGJXM20206A-02)及安徽省气象局研究型业务科技攻关项目(YJG202002)共同资助

2019 年 3 月 24 日收稿; 2020 年 3 月 3 日收修定稿

第一作者:程智,主要从事气候预测与模式应用研究. E-mail:alexclimate@163.com

通讯作者:高辉,主要从事气候诊断与气候预测研究. E-mail:gaohui@cma.gov.cn

The model has poor performance in predicting the precipitation interannual variability in East Asia, especially in China, but has decent prediction ability for the interannual variability of 500 hPa geopotential height, and its skill improves with the approaching to the starting month. In addition, the model can predict the temporal and spatial distribution of the main modes of interannual variations of the East Asian climate with high skills. It can also catch the main characteristics of the response of East Asian climate variability to the developing El Niño and decaying El Niño period. This skill mainly comes from the accurate grasp of the east pattern El Niño events. Overall, the BCC Second-Generation Climate System Model can predict the East Asian summer climate with decent skill, which can benefit the short-term climate prediction.

Key words: climate prediction, model evaluation, BCC Second-Generation Climate System Model, East Asian climate

引 言

东亚位于世界上最大的大陆东部,面临世界上最大的大洋,巨大的海陆热力差异使得东亚成为典型的季风气候区,季风性气候特征明显(陆日宇和富元海,2009)。由于东亚地理跨度大,地形复杂多样,在众多因子的共同调制下,东亚夏季气候的变化规律极为复杂,气象灾害也非常频繁,给社会经济发展造成重大损失,甚至危及人民生命和财产的安全。对于东亚气候变率的研究一直是大气科学领域的学者们共同关注的前沿课题,不断提高对东亚气候的机理研究和模式预测水平,有助于提高我国汛期降水的预测能力,对防灾减灾具有重要意义(朱艳峰等,2007;Ding and Chan,2005;高辉等,2017)。

近年来,随着观测仪器、资料同化方案和模式物理框架等方面的不断完善,气候模式得到了快速发展,已成为短期气候预测的重要手段,目前世界上许多国家和机构都发展了气候预测业务模式并实时发布预测产品。自 2005 年起,中国气象局国家气候中心在第一代短期气候预测模式系统基础上,引入了国外模式发展的一些先进经验,并不断对其进行了改进和创新,建立了一个包含海陆冰气系统、植被和碳循环的耦合气候系统模式——第二代短期气候预测模式系统(Wu et al,2013;吴统文等,2014;郭渠等,2017),于 2014 年投入业务试运行,对其预测能力的评估检验也在不断进行中。吴捷等(2017)评估了该模式在全球范围的预测能力,回报与实况的相关场显示其对降水预报的高技巧区主要位于热带的部分地区,对 500 hPa 高度场的预测高技巧区除了

热带,也包含了西太平洋副热带高压所在的区域。张芳等(2014)的评估结果表明,该模式能模拟出 ENSO 现象的一些主要特征,但是存在 ENSO 周期偏短问题。郭渠等(2017)检验了模式对我国东部夏季降水的预测能力,认为其能够合理预测大尺度环流和海表温度的年际变化特征,但是对中国东部夏季降水的总体预测技巧有限,误差主要来源于模式对西太平洋副热带高压、大陆高压、中高纬阻塞高压等环流系统以及热带太平洋、印度洋 SST 变率等的不足。汪栩加等(2016)评估了该模式对长江中下游水汽输送的预测能力,结果表明,模式对夏季长江中下游水汽输送的水平分布和垂直分布特征预测效果总体较好,但相对于实况存在一个气旋性偏差,导致模式预测的低纬度地区的水汽输送偏强、降水偏多,中纬度偏弱、降水偏少。此外,一些针对夏季关键区海温(汪栩加等,2015)、亚洲-太平洋涛动(单机坤等,2018)、极端高温事件(张羽充和况雪源,2018)等预测能力评估的工作,也为了解该模式的预测性能提供了依据。但考虑到汛期气候预测业务的需要,仍需综合东亚夏季环流和降水对该模式进行更深入的评估,此外由于目前气候模式仍普遍存在较多的不确定性,需要加强在东亚地区的可预报性分析,以利于预报员发挥该模式的优势,提高预测能力。为此,本文综合多种评估方法,从气候态、年际变率的角度,详细评估了该模式对东亚夏季风和降水的预测能力,并从东亚夏季气候年际变率主要模态的时空分布以及这些模态与 ENSO 的关系方面,开展一系列模式评估和可预报性来源的分析,为业务应用提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

BCC 第二代季节气候预测模式系统为一个包含海陆冰气系统、植被和碳循环的全耦合气候系统模式,其中大气环流模式为 BCC_AGCM2.2,水平分辨率为 T106,垂直方向有 26 层,海洋模式为 MOM4_L40 的改进版本,水平分辨率为 $\frac{1}{3}^{\circ}\sim 1^{\circ}$,陆面模式为 BCC_AVIM1.0,包含了中国发展的动态植被和土壤碳循环模型,海冰模式引入了美国地球物理流体实验室发展的海冰模式 SIS(Wu et al, 2013, 吴统文等, 2014)。本文所用的是 1991—2018 年模式输出的 850 hPa 风场、500 hPa 位势高度和降水率场,其中 1991—2014 年为模式回报数据,2015 年开始为实时预报数据,均为每月运行一次,每次通过滞后平均预报和奇异向量扰动法共产生 24 个集合样本,生成未来 13 个月的预测数据。本文对 1—5 月各月的样本进行集合平均,用以比较不同起报月预测东亚夏季降水和环流效果的差异,并通过双线性插值法将其插值到 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 的分辨率,以保持和再分析资料一致。

环流再分析资料为 NCEP 再分析资料(Kalnay et al, 1996),降水再分析资料为 CMAP 再分析资料(Xie and Arkin, 1997),分辨率均为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 。海温指数有 3 种,其中 Niño 区综合指数为美国气候预测中心(CPC)利用 ERSST V5(Huang et al, 2017)海温资料计算的滑动 3 个月平均 Niño 3.4 区海温指数(oceanic niño index, ONI; http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php),东部型和中部型海温指数为利用 ERSST V5 海温资料计算的 Niño E 和 El Niño Modoki(EMI)海温指数,具体定义见 Ashok et al (2007)。

1.2 主要方法

采用相关分析法,以评估模式在不同起报月对东亚夏季环流年际变化的预测技巧。此外,为了评估模式对东亚夏季气候年际变化主要模态的预测能力,参考 Wang et al(2008)的方法,对 850 hPa 风速场和降水率场进行联合 EOF 分解,比较实况、模式主要模态空间分布和时间演变的异同。采用时滞相关分析,考察主要模态时间系数与 ONI 海温指数的

滞后相关关系。参考 Yuan et al(2012)的方法,综合 Niño E 和 EMI 海温指数,计算两者与东亚夏季 850 hPa 风速场的偏相关系数,分别反映东部型和中部型 El Niño 事件的影响。

2 模式对东亚夏季气候态的预测评估

能够合理地模拟出观测气候态的特征是衡量模式性能的重要条件之一,为此评估了模式对夏季平均降水率(以下简称降水)场、850 hPa 风场(图 1a, 1c, 1e)和 500 hPa 位势高度场(图 1b, 1d, 1f)气候态的预测效果。在降水实况场(图 1a)上,多雨中心主要位于热带区,东亚大陆上降水总体呈西南—东北向分布,其大值区包含了我国南方大部分地区。模式场(图 1c)反映出了这些主要的特征,包括亚洲季风区主要降水中心位置、东亚大陆西南—东北向雨带分布特征,但也存在一定的系统性误差(图 1e),降水高估的区域主要位于印度南部,中南半岛北部,菲律宾,中国西北、西南和华北地区,以及东西伯利亚附近,其余基本均为负偏差,负偏差的范围包含了东亚大部分地区和海区,特别是中国东北、黄淮至南海、中国东部沿海、日本和朝鲜半岛附近存在大范围的降水负偏差,此外值得注意的是,模式的预测在中国大陆西北部为正偏差、东南部为负偏差,其范围与中国非季风区和东部季风区的范围接近(姜江等, 2015),即模式对于中国东部季风区降水的预测较实况偏弱。从 850 hPa 风场来看,模式反映出了东亚环流的基本特征,图 1a 和 1c 都显示出印度季风及其穿过孟加拉湾后,一部分形成西南季风进入中国,一部分进入南海加入东亚夏季风,所不同的是模式中这支西风气流在东亚更强,其主体继续向东可到达菲律宾以东的西太平洋,并且模式的夏季风向北的分量较弱,从其差值场(图 1e)上可以看出,在东亚—西太平洋低纬度存在一个气旋式风场差异,中国南方为东北至西南向的分量,表明模拟的东亚夏季风比实况偏弱。在 500 hPa 位势高度场上,模式能够反映出位势高度南高北低的形势、东亚和西亚两处副热带高压的分布,但在 50°N 以北主要为负偏差,以南基本为正偏差,特别是西太平洋副热带高压范围更大、位置更偏西。总体来看,模式能够反映出中国东部夏季气候态的主要空间分布,主要的不足是模式的东亚 500 hPa 位势高度北部偏低、南部偏高,东亚夏季风向北的分量偏弱,导致东亚大部区域夏季降水存在负偏差。

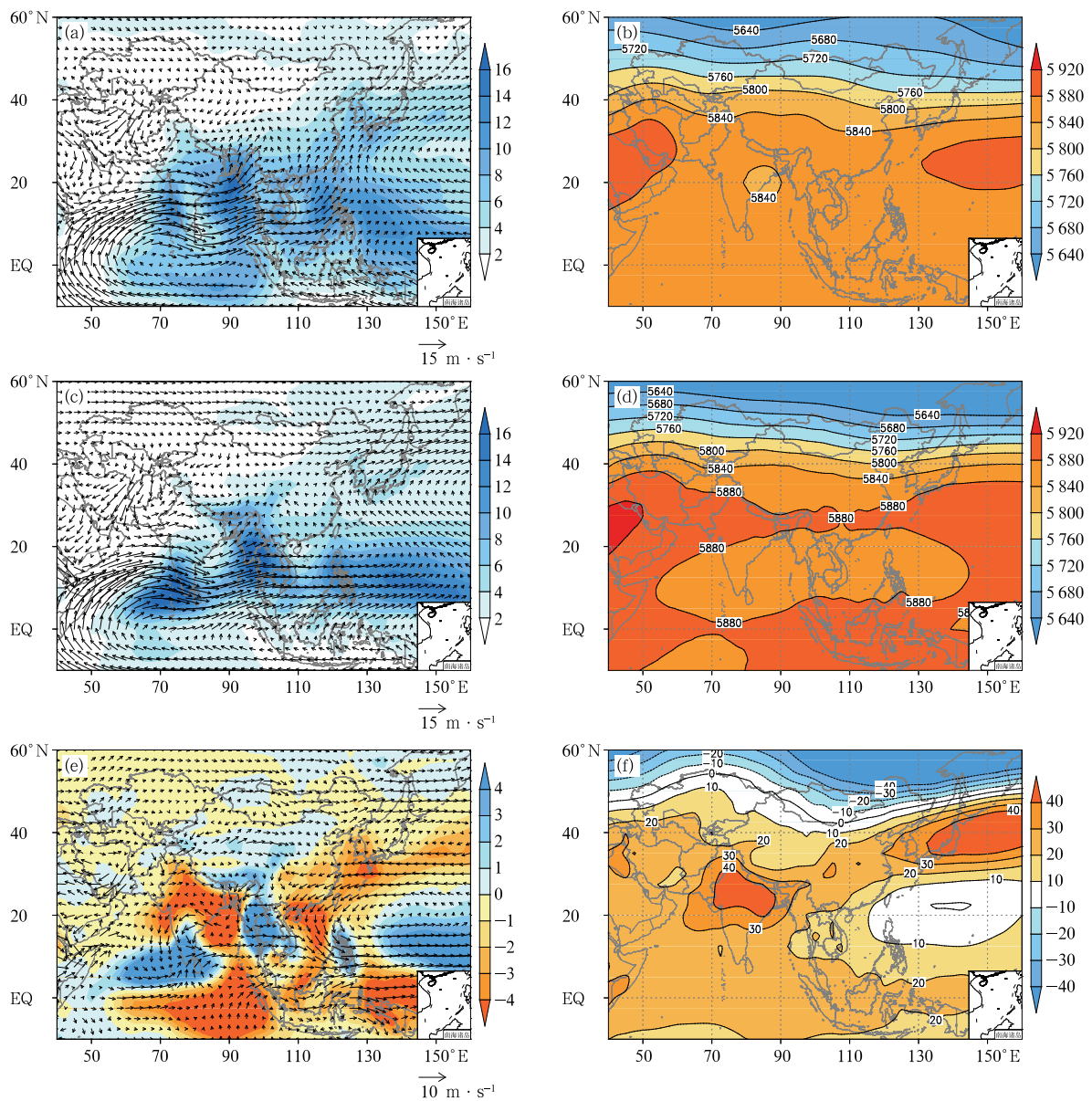


图 1 1991—2018 年平均的夏季(a,c,e)降水率(填色,单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)、850 hPa 风速场(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和(b,d,f)500 hPa 位势高度场(单位: gpm)
(a,b)实况,(c,d)模式,(e,f)模式减去实况

Fig. 1 Multi-year averaging (a, c, e) precipitation rate (colored, unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) and 850 hPa wind speed field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and (b, d, f) 500 hPa height field (unit: gpm) in summer during 1991–2018
(a, b) observation, (c, d) model, (e, f) model minus observation

3 模式对东亚夏季气候变率的预测评估

在以上分析的基础上,计算了模式在 1—5 月预测的夏季 500 hPa 位势高度与实况的单点时间相关系数,一方面研究模式对气候变率的预测能力,另一

方面比较不同起报月预测效果差异,考虑到影响东亚夏季气候主要环流系统的位置,将评估范围扩大至 $0^{\circ} \sim 80^{\circ}\text{N}$ 、 $40^{\circ} \sim 160^{\circ}\text{E}$ 。由图 2 可以看出,相关系数总体呈南高北低的分布特征,在 30°N 以南的绝大部分地区,相关系数都能通过 0.05 显著性水平的检验(以下简称通过检验),其中赤道附近相关最高,除 1 月起报结果稍低外,其余基本都在

0.7 以上,在亚洲 30°N 以北的区域,相关系数自西向东主要呈“低—高一低”的分布特征,其中 30°~50°N、70°~130°E 区域内大部地区的相关系数都可以通过检验,在这一区域以东的日本附近、以西的中亚地区以及 50°N 以北的高纬地区相关较弱。此外,从各起报月预测效果的差异来看,随着起报时间的临近,大部地区的相关逐渐增强,特别是 5 月起报

的结果,不仅在 50°N 以南的大部分地区都能通过检验,在 50°N 以北、80°~120°E 区域也有大片高相关分布。上述分析表明,该模式对于夏季 500 hPa 位势高度场的年际变化预测效果总体较好,除了低纬度地区,对中高纬地区也有一定预测能力,随着起报月的临近,预测技巧有所提升。

图3反映了模式在1—5月预测的夏季降水与

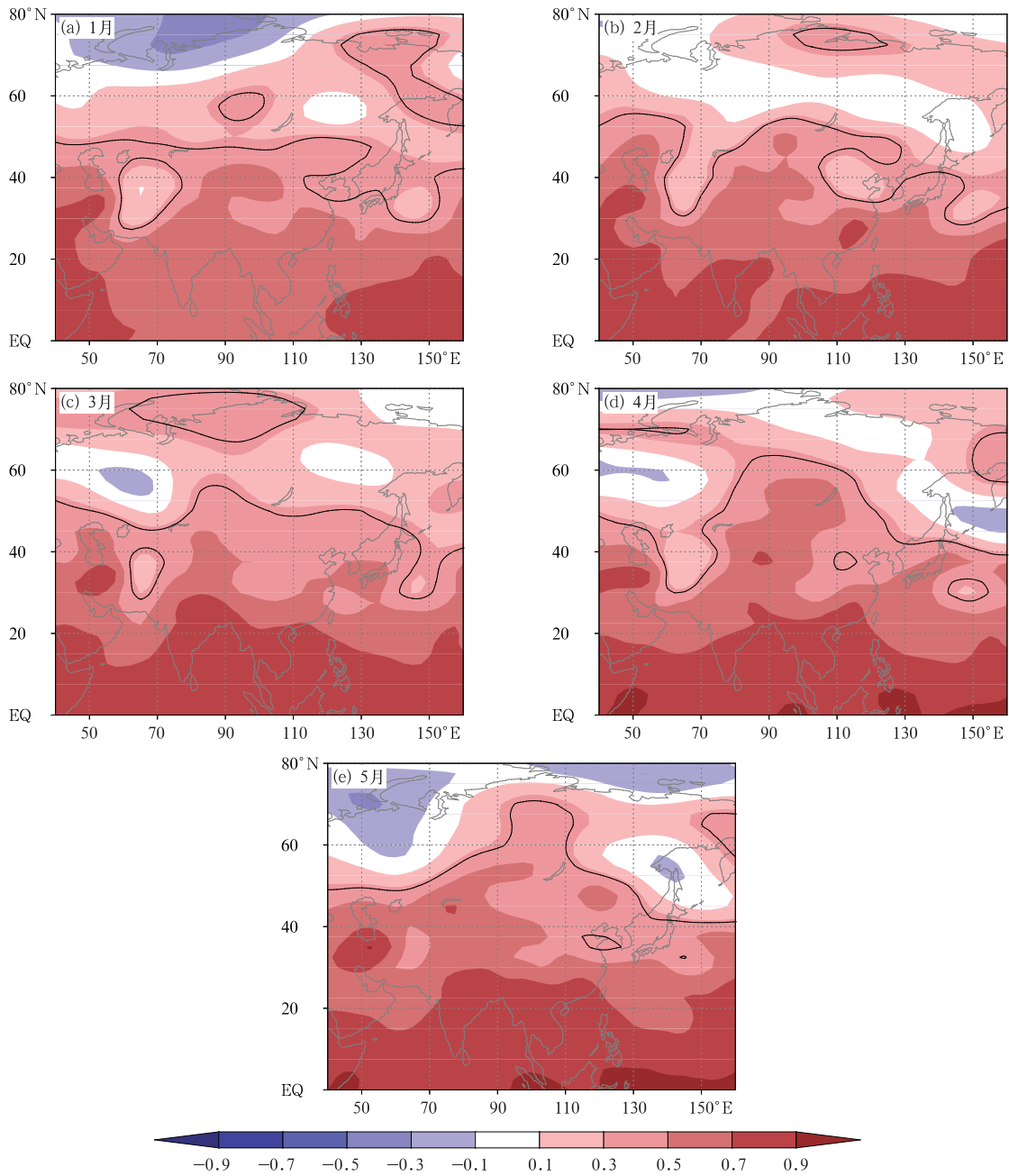


图 2 1—5 月起报的模式预测与实况 500 hPa 高度场的时间相关系数
(等值线表示 0.05 显著性水平检验阈值)

Fig. 2 Time correlation between model issued from January to May and observation at 500 hPa height fields
(Contours denote the threshold for significance test at 0.05 level)

实况的相关系数分布,可以看出相关总体较弱,高相关区主要集中在热带和西北太平洋,在东亚大陆的中高纬有零散区域通过检验,反映出模式在东亚大陆上的降水预测技巧较低,包括中国地区的降水,预测与实况的相关基本都通不过检验。此外,比较来看,5月起报模式预测与实况降水高相关区的范围最大,表明随着起报时间的临近,模式的预测效果有所改善,但对于中国东部地区的预测效果提升不明

显。可以看出,相对于环流,模式对于热带以外地区降水预测效果仍存在较多不足,这也是目前模式普遍存在的问题(王会军,1997;段春锋等,2017;程智等,2017)。因此,对于短期气候预测业务来说,不能仅关注模式对降水的预测,需要更多关注影响东亚夏季气候变率的主要环流系统及其影响模态,了解其主要可预报性来源,以利于在业务应用时发挥优势,这也是下文分析的内容。

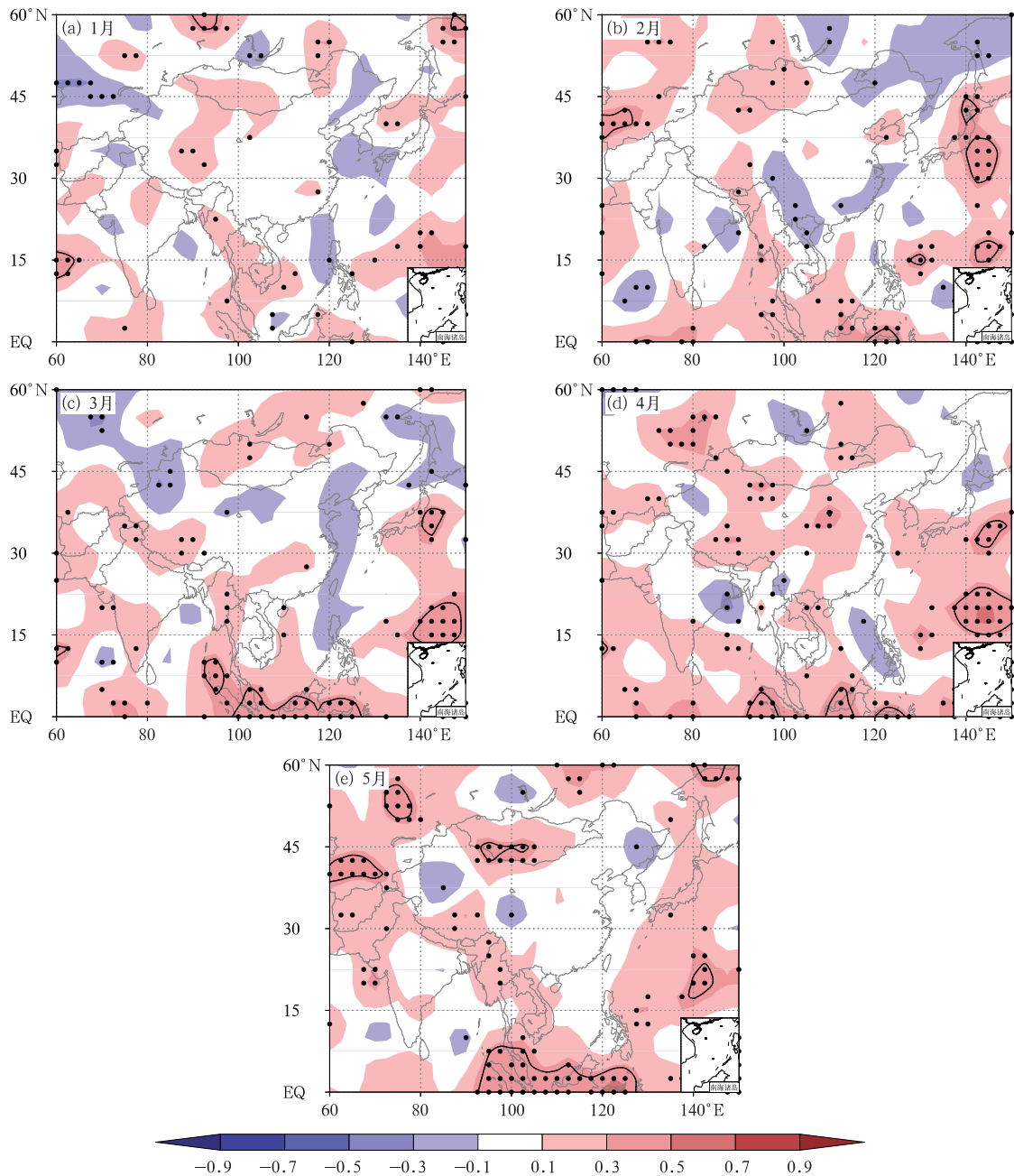


图 3 1—5月起报的模式预测与实况夏季降水的时间相关系数(填色)以及通过 0.05 显著性水平的区域(黑点)

Fig. 3 Time correlation between model prediction issued from January to May and observation of summer precipitation (colored) (Black dots denote the correlation having passed the significance test at 0.05 level)

东亚地区深受季风气候影响,季风的年际变化在很大程度上影响着东亚夏季雨型,因此模式对季风环流与降水关系的把握能力是判断模式性能的重要因素,此外对于汛期气候预测工作来说,对东亚夏季季风系统年际异常的判断必不可少,因此模式对其的预测能力也非常值得关注。本文参考 Wang et al

(2008)方案,在研究夏季风系统年际变率时,对降水和 850 hPa 风场进行联合 EOF 分解,提取出其年际变化的主要模态,研究模式对东亚夏季气候变率主要模态的预测能力,综合上文分析,选用预测效果最好的 5 月起报结果。图 4a 为实况第一模态空间场,可以看出,850 hPa 风速分量场上最明显的异常中心

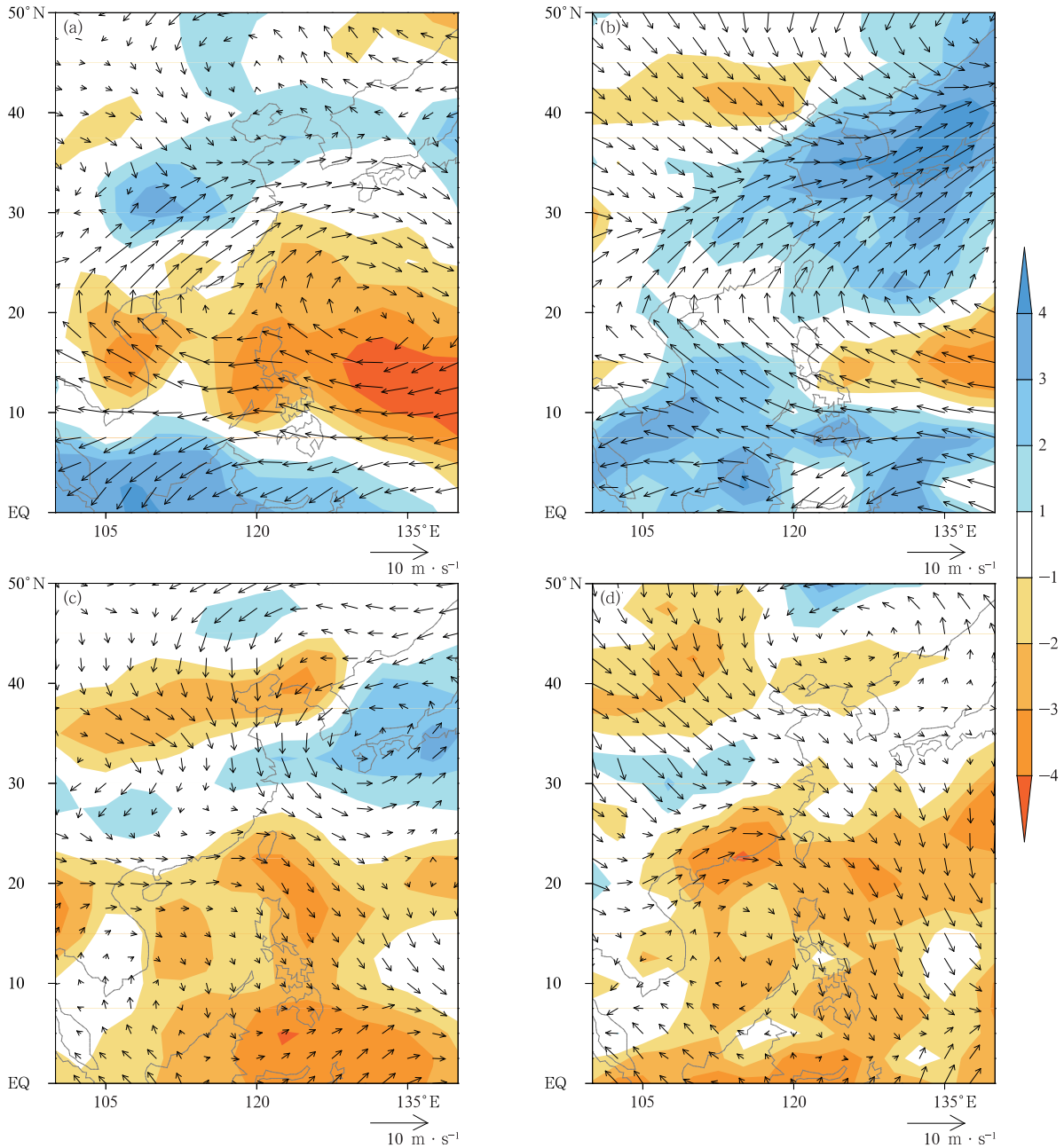


图 4 (a,c)实况和(b,d)模式降水率(填色,单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)和 850 hPa 风场(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的联合 EOF 分析(a,b)第一模态和(c,d)第二模态的空间场
Fig. 4 The (a, b) first and (c, d) second mode spatial fields of EOF analysis on precipitation rate (colored, unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) and 850 hPa wind speed field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of (a, c) observation and (b, d) model

有 2 个, 一个是在东亚沿海 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 的反气旋式异常, 伴随着从中国西南部至黄淮的西南风异常以及低纬大范围的东风异常, 另一个是东北南部—朝鲜—日本北部的气旋式异常; 降水分量场上显示中南半岛、南海、菲律宾和西太平洋暖池附近为负异常, 我国黄淮至长江一带、朝鲜半岛至日本为正异常。这些风场和降水异常的配置体现了 PJ/EAP 遥相关 (Nitta, 1987; Huang and Wu, 1989) 负位相的影响, 即暖池对流减弱, 有利于西太平洋副热带高压偏强偏西, 其西侧的西南暖湿气流加强, 进而引起东亚夏季降水异常。图 4b 为模式第一模态空间场, 可以看出, 模式能够较好地模拟出低纬副热带反气旋式异常、中国南方强盛的西南风异常和东亚低纬度的东风异常, 降水分量场上东亚沿海 45°N 以南地区同样呈“一十一”的异常分布, 表明模式对于东亚气候变率主要模态空间分布的把握能力较好, 实况和模式空间向量的相关系数可达 0.61。所不足的是模式里反气旋式异常中心的位置更偏东, 并且其西北侧西南气流异常的范围较实况明显偏大, 包含了中国东部、朝鲜半岛、日本南部和副热带西太平洋的大范围地区, 导致在降水分量场上这些地区主要为降水偏多区, 较实况范围更大, 与此同时低纬降水偏少区的范围较实况减小, 仅包含了菲律宾东部的局部地区。

图 4c 为实况第二模态空间场, 可以看出, 在 850 hPa 实况分量场上, 东亚中纬度副热带在 130°E 以西基本都为北风异常控制, 反映出东亚夏季风偏弱的形势, $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 为偏西风异常, 中国南方—日本形成一个较大范围的气旋式异常, 南海—菲律宾为反气旋式异常控制, 在与之对应的降水分量场上,

东亚 45°N 以南地区在经向上呈“一十一”的异常分布特征, 中国北方存在大范围的降水偏少区, 韩国、日本附近和我国长江中下游降水偏多, 东亚 25°N 以南大部区域降水偏少。模式与实况场的空间相关系数可达 0.57, 如图 4d 所示, 模式较好地体现出了上述异常特征, 能够反映出中国东部偏北风异常, 东亚中纬度至副热带大范围的气旋式异常、南海—菲律宾的反气旋式异常也非常明显, 降水分量场经向上也为“一十一”的异常分布, 不足之处主要是实况场上日本附近的气旋式异常在模式中不明显, 导致实况中韩国—日本—长江中下游降水明显偏多的特征在模式中未能较好地体现出来。

进一步比较模式与实况前两个模态的时间变化特征, 图 5a 和 5b 分别为第一和第二模态的标准化时间系数序列。可以看出, 模式较好地反映了实况第一模态的年际变化特征, 两条序列的时间相关系数为 0.63, 通过了 0.01 的显著性水平检验, 此外, 对于年际分量序列的一些异常年份 (异常值达到 1 倍标准差), 如 1995、1996、1998、2008、2010 年这些异常高值年, 1994、1997、2001、2002、2004、2012、2018 年这些异常低值年, 模式和实况距平符号不一致的仅有 1996 年和 2008 年, 准确率达 83%。实况和模式第二模态时间序列的相关系数为 0.4, 通过了 0.05 的显著性水平检验, 并且模式对其中一些异常年份的模拟效果也很好, 符号一致率达 75%。从以上分析不难看出, 该模式不仅能够反映出东亚气候变率主要模态的空间分布特征, 对其年际变化的模拟也具有相当的技巧, 这对于汛期气候预测具有积极的意义。

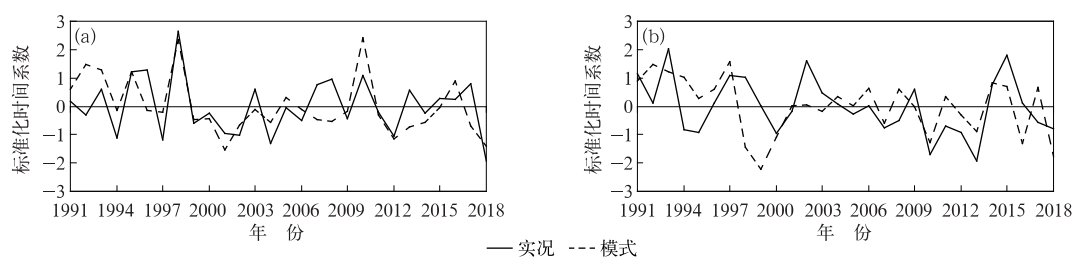


图 5 实况和模式的降水率场和 850 hPa 风场的联合 EOF 分析时间系数

(a) 第一模态, (b) 第二模态

Fig. 5 Time series of EOF analysis on precipitation rate and 850 hPa wind speed field of observation and model

(a) the first mode, (b) the second mode

4 El Niño 对东亚夏季气候影响的预测评估

ENSO 作为热带太平洋海气耦合系统中最强的年际变化信号(Wang, 1995), 往往导致全球气候异常, 研究表明, ENSO 循环会对东亚夏季风活动和降水产生明显影响, 但其发展的不同阶段造成的影响有所不同, 在 El Niño 发展位相的夏季, 华北降水偏少易发生干旱, 江淮流域降水偏多, 而在衰减期, 我国江南北部地区降水偏多, 这些不同主要由大气环流对与 El Niño 演变相关的热带海温异常的不同响应所致(Zhang et al, 1996; Wang et al, 2008; Xie and Arkin, 1997; 张人禾等, 2017)。因此, 有必要分析上述东亚夏季气候变率的主要模态与 ENSO 演变的关系, 并从这一角度来开展模式评估, 分析模式对东亚夏季气候预测技巧的来源。

为此计算了上述联合 EOF 前两个模态时间系数与 ONI 海温指数(Niño 区海温综合指数)的滞后相关系数, ONI 指数从前一年夏季一直计算到当年夏季, 图 6a 为实况相关, 可以看出实况第一模态时间系数与 ONI 指数的正相关非常显著, 从前一年秋季至前期冬季都通过了 0.05 显著性水平检验, 之后逐渐下降, 在春季维持弱相关, 至当年夏季转变为负相关。这种相关随季节的转变显示出 El Niño 衰减的影响。Wang et al(2000)认为, 虽然许多 El Niño 事件在春夏季衰减, 但其给东亚气候带来的影响仍能持续到次年夏季, 这主要是通过“风—蒸发—SST 反馈”的方式, 导致在 El Niño 消亡期维持, 东亚副热带出现明显的反气旋式异常, 其形势与图 4a 非常

相似。实况第二模态与 ONI 指数的相关系数在春季之前不显著, 从春季开始正相关通过了 0.05 显著性水平检验, 并可一直持续到夏季, 根据 Wang et al (2000)的分析, 当夏、秋季 El Niño 发展时, 整个亚洲季风系统都会产生一定的影响, 使得印度洋—中南半岛出现大范围脊, 其北侧的西风异常在北印度洋—中南半岛—南海—低纬西太平洋都较为明显, 引起印度季风增强, 并且在西北太平洋出现气旋式异常, 这与图 4c 的空间模态是一致的, 体现了东亚气候对 El Niño 发展的响应。

图 6b 是模式前两个模态时间系数与 ONI 海温指数的滞后相关, 可以看出, 第一模态同样在前一年秋、冬季呈显著的正相关, 只是前期的正相关较实况更强, 至春季前期仍非常显著, 之后逐渐下降, 并同样在夏季减弱至负相关。第二模态的变化趋势也基本与实况相同, 即从前期秋、冬季至当年夏季, 相关逐渐增强, 并在夏季呈显著的正相关, 略有差异的是模式在秋、冬季为弱的负相关, 实况为弱的正相关, 模式在春季的正相关略弱一些。总体来看, 该模式能够较好地反映出 El Niño 在不同发展阶段对东亚夏季气候的影响。

除了不同发展阶段, 不同类型的 ENSO 事件的影响也有所差异。Yuan et al(2012)综合 Niño E 和 EMI 海温指数(分别代表东部型和中部型 ENSO 事件), 计算了其在全球气候的偏相关, 结果表明, 东部型 El Niño 使得沃克环流的异常上升支位于赤道中东太平洋, 异常下沉支位于赤道东印度洋至海洋性大陆附近, 往往伴随着南海—菲律宾出现异常反气旋; 而中部型 El Niño 年, 赤道太平洋上空的上升支主要位于日界线附近, 下沉支位于暖池附近, 中国南

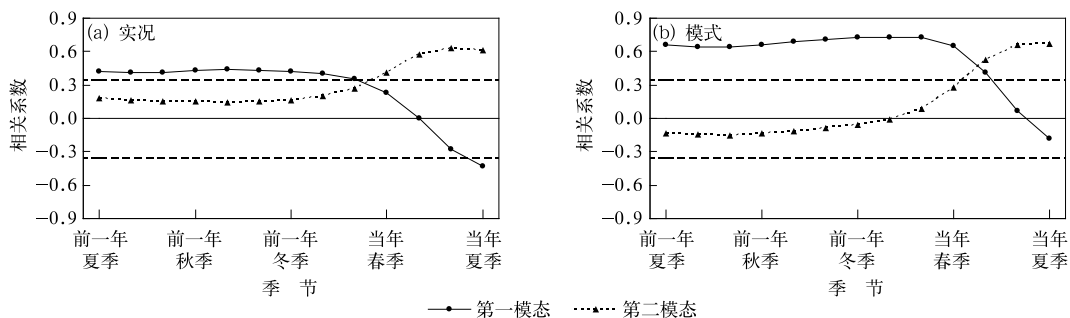


图 6 前两个模态时间系数与 ONI 指数的滞后相关系数

(a) 实况, (b) 模式

(长虚线表示相关系数 0.05 显著性水平检验值)

Fig. 6 Lag correlation coefficients between time series of the first two modes and ONI index

(a) observation, (b) model

(Long dashed lines denote 0.05 significance level values for correlation test)

方—西北太平洋多为异常反气旋控制。对典型异常年分析的结果与之基本相同,但对东亚大陆夏季降水的影响,基于不同资料、不同指数定义、不同年份的分析存在一定差异(袁媛等,2012;李智玉等,2015,吴萍等,2017)。那么,该模式对上述模态的预测能力如何,也是值得关注的信息。为此本文参考 Yuan et al(2012)的方法,利用实况和模式资料,计算夏季 850 hPa 风场与冬季 Niño E、EMI 海温指数的偏相关系数,评估模式对不同分布型 ENSO 事件影响的预测效果,其中夏季风场与后期冬季(前期冬季)海温的偏相关反映了 El Niño 发展(衰减)的影响(图 7)。

如图 7a 所示,东部型 El Niño 发展对实况低层风场的影响主要体现在东亚副热带中纬度大范围的反异常气旋和中国南海—菲律宾反气旋异常,而东部

型 El Niño 衰减对实况低层风场的影响主要体现在热带的偏东风异常、副热带大范围的反气旋式异常和中纬度的气旋式异常(图 7b)。模式较好地反映出了这些影响,图 7e 中同样显示出自南向北反气旋、气旋的异常分布,只是后者位置略微偏东,图 7f 显示副热带存在大范围的反气旋异常,只是北方气旋式异常的范围较实况更偏东北。图 7c 反映了中部型 El Niño 发展的影响,南海—菲律宾及以东存在显著的气旋式异常,我国南方大部分地区为反气旋异常控制,模式(图 7g)对这一气旋式异常的模拟能力较好,但未能反映出实况的中国大陆上的反气旋式异常。图 7d 反映了中部型 El Niño 衰减的影响,可以看出在低纬存在与图 7c 较为类似的气旋式异常,只是位置更偏东、强度更弱,对比模式(图 7h)可以看出,模式对这一模态的模拟能力较弱,东亚低

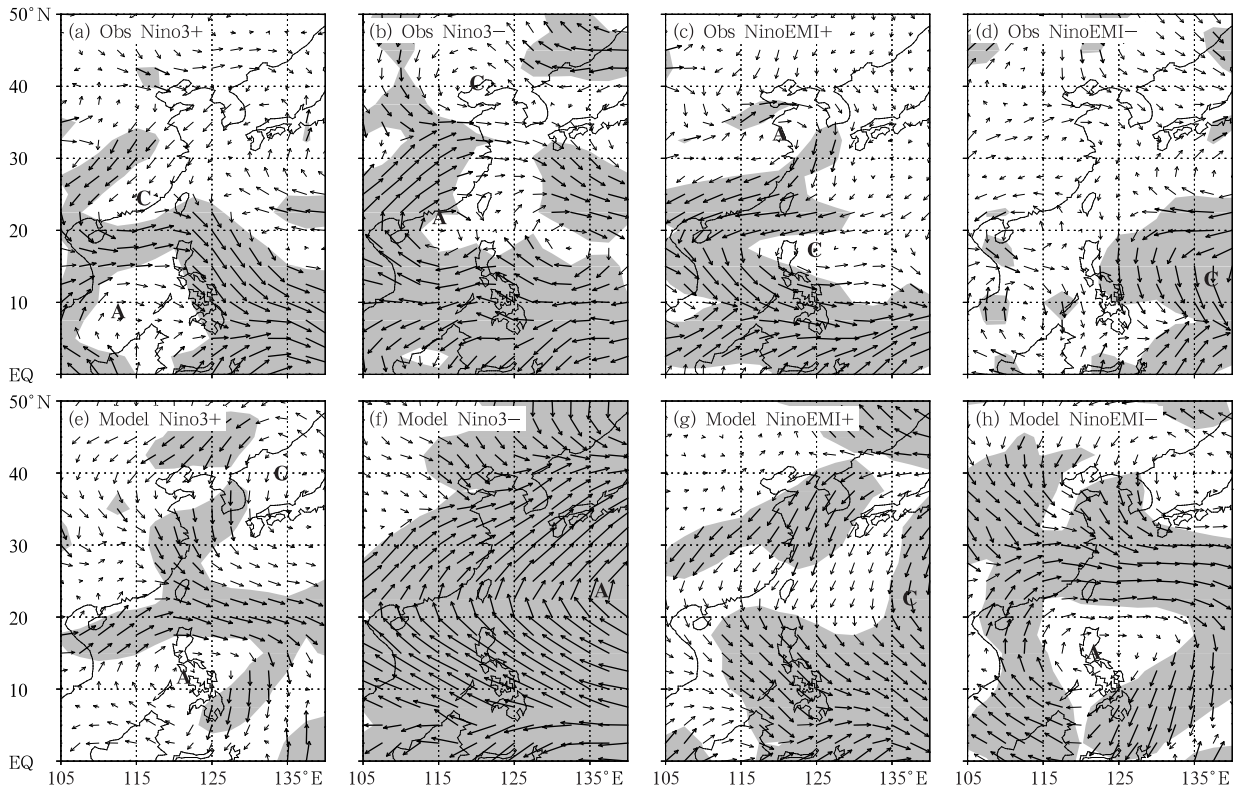


图 7 (a,c,e,g)后期冬季、(b,d,f,h)前期冬季的(a,b,c,d)实况与(e,f,g,h)模式预测的夏季 850 hPa 风速场与海温指数的偏相关系数 (a,b,e,f)Niño 3,(c,d,g,h)EMI (阴影为通过 0.05 显著性水平相关检验区域)

Fig. 7 Partial correlation coefficients between the summer 850 hPa wind speed and SST index, in the (a, c, e, g) later winter and (b, d, f, h) preceding winter of (a, b, c, d) observation results, (e, f, g, h) model results (a, b, e, f) Niño 3, (c, d, g, h) EMI (Shaded denotes the correlation area having passed the significance test 0.05 level)

纬为反气旋式异常控制,与实况近乎相反。因此总体来看,在发展阶段和衰减阶段,模式均较好地反映出了东部型 El Niño 对东亚夏季环流的影响,具有较好参考价值,但对于中部型 El Niño 的影响,模式的模拟效果较弱,需要进一步加以改进,在预测业务中应把握这一不足之处。

5 结论与讨论

本文利用国家气候中心第二代气候系统模式的 850 hPa 风场、500 hPa 位势高度和降水率输出数据,评估了其对东亚夏季气候态、气候变率及其对 ENSO 信号响应的预测能力,结果表明:

(1)从气候态的评估来看,该模式对高低层环流和降水场的空间分布形势,特别是强降水中心和季风系统成员位置的预测较为合理,主要的不足是模式中东亚 850 hPa 风场上向北的分量偏弱,500 hPa 位势高度场上高纬偏弱、中低纬偏强,副热带高压过于强大,东亚大陆特别是中国东部季风区的降水总体偏弱。

(2)从相关分析来看,模式对于东亚特别是中国大陆地区夏季降水年际变化的预测能力较弱,但对于东亚 500 hPa 高度场年际变化的预测效果较好,并且随着起报月的临近,技巧有所改进。联合 EOF 分析的结果显示其对于东亚夏季气候变率主要模态的时空分布特征具有较高的预测技巧。

(3)模式较好地反映出了东亚夏季气候对 El Niño 发展和衰减响应的主要特征,其技巧主要来源于模式对于东部型 El Niño 影响的准确把握,不论在发展阶段还是衰减阶段,东部型 El Niño 的主要影响在模式中都得到了较好体现,但模式对中部型 El Niño 影响的预测能力较弱。

因此,综合气候态、年际变率和和主要影响模态的评估分析来看,该模式对东亚夏季风系统的预测能力较好,对短期气候预测具有一定参考价值。本文侧重于从应用角度评估模式的预测性能,了解模式的优势和不足之处,为短期气候预测提供参考。目前,国家气候中心正在开展中国多模式集合(CMME)预测系统的建设工作,对这些模式在东亚的预测技巧进行评估、比较,并开展多模式集合预测,是未来一个较有意义的工作。

参考文献

程智,杨玮,徐敏,等,2017. JMA/MRI-CPS2 模式对东亚夏季风系统

预测能力的评估[J]. 气象,43(4):434-442. Cheng Z, Yang W, Xu M, et al, 2017. Evaluation on East Asia summer monsoon system prediction by JMA/MRI-CPS2 model[J]. Meteor Mon, 43(4):434-442(in Chinese).

段春锋,徐敏,程智,等,2017. DERF2.0 模式对月尺度西太平洋副热带高压预测能力评估[J]. 气象,43(10):1267-1277. Duan C F, Xu M, Cheng Z, et al, 2017. Evaluation on monthly prediction of Western Pacific subtropical high by DERF2.0 model[J]. Meteor Mon, 43(10):1267-1277(in Chinese).

高辉,袁媛,洪洁莉,等,2017. 2016 年汛期气候预测效果评述及主要先兆信号与应用[J]. 气象,43(4):486-494. Gao H, Yuan Y, Hong J L, et al, 2017. Overview of climate prediction of the summer 2016 and the precursory signals[J]. Meteor Mon, 43(4):486-494(in Chinese).

郭渠,刘向文,吴统文,等,2017. 基于 BCC_CSM 模式的中国东部夏季降水预测检验及订正[J]. 大气科学,41(1):71-90. Guo Q, Liu X W, Wu T W, et al, 2017. Verification and correction of East China summer rainfall prediction based on BCC_CSM model[J]. Chin J Atmos Sci, 41(1):71-90(in Chinese).

姜江,姜大膀,林一骅,2015. 1961—2009 年中国季风区范围和季风降水变化[J]. 大气科学,39(4):722-730. Jiang J, Jiang D B, Lin Y H, 2015. Monsoon area and precipitation over China for 1961—2009[J]. Chin J Atmos Sci, 39(4):722-730(in Chinese).

李智玉,张文君,徐海明,2015. 两类 ENSO 事件非对称性特征分析[J]. 气象学报,73(6):1019-1038. Li Z Y, Zhang W J, Xu H M, 2015. Analysis of the asymmetric features for the two types of ENSO[J]. Acta Meteor Sin, 73(6):1019-1038(in Chinese).

陆日宇,富元海,2009. 夏季东亚和西北太平洋地区的气候变异及其机理[J]. 地球科学进展,24(2):123-131. Lu R Y, Fu Y H, 2009. Summer climate variability in East Asia and the western North Pacific and its mechanisms[J]. Adv Earth Sci, 24(2):123-131(in Chinese).

单机坤,梁潇云,吴统文,等,2018. BCC_CSM1.1(m) 模式对于夏季亚洲—太平洋涛动的模拟[J]. 地球物理学报,61(1):106-118. Shan J K, Liang X Y, Wu T W, et al, 2018. Simulation of the Asian-Pacific oscillation using the BCC_CSM1.1(m) model[J]. Chin J Geophys, 61(1):106-118(in Chinese).

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. On the uncertainty of the short-term climate prediction[J]. Climatic Environ Res, 2(4):333-338(in Chinese).

汪栩加,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 X J, Zheng Z H, Feng G L, et al, 2015. Summer prediction of sea surface temperatures in key areas in BCC_CSM model[J]. Chin J Atmos Sci, 39(2):271-288(in Chinese).

汪栩加,郑志海,顾伯辉,等,2016. BCC_CSM 模式夏季长江中下游水汽输送评估[J]. 高原气象,35(5):1270-1279. Wang X J, Zheng Z H, Gu B H, et al, 2016. Summer prediction of moisture transport in the middle and lower reaches of the Yangtze River in BCC_CSM Mode[J]. Plateau Meteor, 35(5):1270-1279(in

- Chinese).
- 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 J, Ren H L, Zhang S, et al, 2017. Evaluation and predictability analysis of seasonal prediction by BCC second-generation climate system model[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6): 1300-1315(in Chinese).
- 吴萍,丁一汇,柳艳菊,2017. 厄尔尼诺事件对中国夏季水汽输送和降水分布影响的新研究[J]. 气象学报, 75(3): 371-383. Wu P, Ding Y H, Liu Y J, 2017. A new study of El Niño impacts on summer time water vapor transport and rainfall in China[J]. Acta Meteor Sin, 75(3): 371-383(in Chinese).
- 吴统文,宋连春,李伟平,等,2014. 北京气候中心气候系统模式研发进展——在气候变化研究中的应用[J]. 气象学报, 72(1): 12-29. Wu T W, Song L C, Li W P, et al, 2014. An overview on progress in Beijing Climate Center Climate System Model—its development and application to climate change studies[J]. Acta Meteor Sin, 72(1): 12-29(in Chinese).
- 袁媛,杨辉,李崇银,2012. 不同分布型厄尔尼诺事件及对中国次年夏季降水的可能影响[J]. 气象学报, 70(3): 467-478. Yuan Y, Yang H, Li C Y, 2012. Study of El Niño events of different types and their potential impact on the following summer precipitation in China[J]. Acta Meteor Sin, 70(3): 467-478(in Chinese).
- 张芳,董敏,吴统文,2014. CMIP5 模式对 ENSO 现象的模拟能力评估[J]. 气象学报, 72(1): 30-48. Zhang F, Dong M, Wu T W, 2014. Evaluation of the ENSO features simulations as done by the CMIP5 models[J]. Acta Meteor Sin, 72(1): 30-48(in Chinese).
- 张人禾,闵庆焯,苏京志,2017. 厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响: 西北太平洋异常反气旋的作用[J]. 中国科学: 地球科学, 47(5): 544-553. Zhang R H, Min Q Y, Su J Z, 2017. Impact of El Niño on atmospheric circulations over East Asia and rainfall in China: role of the anomalous western North Pacific anticyclone[J]. Sci China Earth Sci, 60(6): 1124-1132(in Chinese).
- 张羽充,况雪源,2018. 基于 BCC_CSM 模式的破纪录高温事件研究[J]. 气象科学, 38(4): 531-538. Zhang Y C, Kuang X Y, 2018. Study on the record-breaking event of high temperature based on BCC_CSM model[J]. J Meteor Sci, 38(4): 531-538(in Chinese).
- 朱艳峰,李威,王小玲,等,2007. 东亚夏季风监测诊断业务系统[J]. 气象, 33(9): 98-102. Zhu Y F, Li W, Wang X L, et al, 2007. An operational monitoring and diagnostic system for East Asian summer monsoon[J]. Meteor Mon, 33(9): 98-102(in Chinese).
- Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al, 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection[J]. J Geophys Res, 112(C11): C11007. DOI: 10. 1029/2006JC003798.
- Ding Y H, Chan J C L, 2005. The East Asian summer monsoon: an overview[J]. Meteor Atmos Phys, 89(1/2/3/4): 117-142.
- Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al, 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons[J]. J Climate, 30(20): 8179-8205.
- 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.
- 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.
- 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(3): 373-390.
- Wang B, 1995. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades[J]. J Climate, 8(2): 267-285.
- 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.
- Wang B, Wu Z W, Li J P, et al, 2008. How to measure the strength of the East Asian summer monsoon[J]. J Climate, 21(17): 4449-4463.
- Wu T W, Li W P, Ji J J, et al, 2013. Global carbon budgets simulated by the Beijing Climate Center Climate System Model for the last century[J]. J Geophys Res, 118(10): 4326-4347.
- Xie P P, Arkin P A, 1997. Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs[J]. Bull Amer Meteor Soc, 78(11): 2539-2558.
- Yuan Y, Yang S, Zhang Z, 2012. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between eastern and central Pacific El Niño: possible effect of Indian Ocean SST [J]. J Climate, 25(22): 7867-7883.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M, 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: a diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events[J]. J Meteor Soc Japan, 74(1): 49-62.