

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, 10.3878/j.issn.1006-9895.1408.13329.  
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.

## BCC\_CSM 模式夏季关键区海温回报评估

汪栩加<sup>1</sup> 郑志海<sup>2</sup> 封国林<sup>2</sup> 王阔<sup>1</sup> 申茜<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

<sup>2</sup> 国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081

**摘 要** 利用国家气候中心气候系统模式 (Beijing Climate Center Climate System Model, BCC\_CSM) 的汛期回报试验数据集, 评估了夏季中低纬度海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 的预测能力。结果表明: 该模式对夏季中低纬海温具有一定的预测能力, 且在低纬地区的预测技巧尤为出色。对太平洋、热带印度洋和北大西洋这三个关键区进一步分析发现, 该模式对不同海区海温的预测能力有所不同。其中, 模式对夏季北太平洋海温及 Niño 3.4 指数表现出显著的预测技巧, 对热带印度洋、北大西洋海温及热带印度洋全区一致海温模态 (Indian Ocean Basin-wide Warming, IOBW) 也表现出一定的预测技巧, 而对北大西洋海温三极子模态 (North Atlantic Tripole, NAT) 的技巧相对较低。研究发现, 预测技巧与前冬的 ENSO 状态密切相关, 当前冬位于 ENSO 异常位相时, BCC\_CSM 模式对于三大海区夏季海温的预测技巧要高于前冬位于 ENSO 正常位相时, 且对 NAT 指数也具有更高的预测技巧。前冬 ENSO 所处的位相对于该模式对夏季 Niño 3.4 指数及 IOBW 指数的预测技巧影响不明显。此外, 该模式对夏季海温的预测技巧依赖于超前时间, 预测技巧在大部分情形下超前 1 个月的预测技巧相对更高。

**关键词** BCC\_CSM 模式 夏季海温 回报 评估

文章编号 1006-9895(2015)02-0271-18

中图分类号 P462

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.13329

## Summer Prediction of Sea Surface Temperatures in Key Areas in BCC\_CSM Model

WANG Xujia<sup>1</sup>, ZHENG Zhihai<sup>2</sup>, FENG Guolin<sup>2</sup>, WANG Kuo<sup>1</sup>, and SHEN Qian<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

<sup>2</sup> Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

**Abstract** In this paper, the authors assess the summer prediction skill of retrospective forecasts of global midlatitudes and low latitudes sea surface temperatures (SSTs) in the Beijing Climate Center Climate System Model (BCC\_CSM). Results indicate that the SST forecasts exhibit certain skills in middle and low latitude areas and the skills over much of the low latitude areas are better. Further analysis reveals that model forecasts in different areas of the sea have different skills. Specifically, the SST forecasts exhibit significant skills over much of the North Pacific and the Niño 3.4 index in summer, followed by the Indian Ocean, Atlantic Ocean, and the Indian Ocean Basin-wide Warming (IOBW), while the North Atlantic Tripole (NAT) shows a lower forecast skill. Recent investigations have revealed that prediction skill is closely related to the El Niño Southern Oscillation (ENSO) phases of the previous winter. When the previous winter phase is characterized by ENSO, SST forecasts exhibit higher skills than when preceded by a neutral phase, and the NAT

收稿日期 2013-12-11; 网络预出版日期 2014-09-10

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2013CB430204, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201306021, 国家自然科学基金青年科学基金项目 41105070、41005051

作者简介 汪栩加, 男, 1989 年出生, 硕士, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: wangxj2012@lzu.edu.cn

通讯作者 郑志海, E-mail: zhengzh@cma.gov.cn

index also has higher forecast skills. The ENSO phases of the previous winter have little effect on the skills of the Niño 3.4 and IOBW indexes. In most cases, as the lead time becomes longer, the model will show a drop in forecast skills for summer SSTs and these indexes.

**Keywords** BCC\_CSM model, Summer SST, Hindcast, Assess

## 1 引言

近几十年来,随着动力季节预报的迅速发展,国内外的气候预测部门都发展和建立了各自的季节预报模式系统(Vitart, 2004; Saha et al., 2010, 2014; 吴统文等, 2013),而且这些系统已逐渐在季节预报中发挥越来越重要的作用(Stockdale et al., 2010; 丁一汇, 2011)。围绕动力季节预报,研究人员对这些预报模式系统开展了大量的评估工作(Palmer and Hagedorn, 2006; Wang et al., 2005; Bader et al., 2008; NRC/NRS, 2010; Kumar and Krishnamuriti, 2012; 董敏等, 2013),在此基础上对当前的动力季节预报的水平和技巧有了更为深入的了解和认识。目前气候模式的季节预测技巧具有很大的空间分布差异:预测技巧主要集中在热带海洋区域,尤其是 ENSO 地区预测技巧最为显著,热带印度洋区域预测技巧次之,对于中高纬海洋的预测技巧普遍较低(Wang et al., 2009);对于我国所在的东亚夏季风区以及汛期降水的预测技巧普遍偏低(Sun and Ding, 2009; Krishnamuriti and Kumar, 2012),关键区海温预报不够准确以及东亚地区参数化方案不够完善是造成技巧偏低其中的重要原因(丁一汇, 2011)。

季节气候可预测的信息源主要来自于气候系统中的缓变分量的作用,海洋的记忆是全球季节气候预测最重要的信号,因此动力模式对关键区海温的预测能力备受关注。厄尔尼诺和南方涛动(ENSO)是已知的年际气候变率最重要的可预测源(Bjerkness, 1966, 1969),热带太平洋的海气耦合现象的尺度较大,对全球气候有着重要影响(Lau and Nath, 1994; Alexander et al., 2002)。对东亚地区而言,ENSO 也被认为是影响东亚夏季风年际异常的关键因子(Zhang et al., 1999; Chang et al., 2000; Zhou and Chan, 2007; Zhou et al., 2009),它通过大气环流以“遥相关”的形式来影响东亚季风系统。研究表明(Zhang et al., 1996; 龚道溢和王绍武, 1999; 金祖辉和陶诗言, 1999; Wu B et al., 2009; Zhou et al., 2009),东亚夏季风的强弱与

ENSO 的位相和强度密切相关,且不同类型的 ENSO 事件对东亚季风系统的影响也有明显差异。因此,动力模式对 ENSO 循环的预测能力决定着它对东亚夏季风预测的可信度。除热带太平洋外,其他海域的海温对东亚地区季节气候变率同样存在重要影响,如北太平洋、北大西洋和热带印度洋。北太平洋是北半球气候系统的一个重要组成部分,它包含了北太平洋涛动(North Pacific Oscillation, NPO)和太平洋年代际涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)等气候模态,北太平洋海气耦合系统是对亚洲和北美等区域气候变化影响较大的信号源之一。北大西洋海温异常被认为是联系春季北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)和东亚夏季风的重要桥梁(Palmer and Sun, 1985),是造成东亚夏季大气环流尤其是中高纬度环流异常的重要原因之一(Wu Z W et al., 2009; 左金清等, 2012),数值试验结果也揭示了北大西洋海温对东亚环流的重要影响(杨修群等, 1992; Lu and Dong, 2005)。印度洋是亚澳季风区下垫面的一个重要组成部分,其热力状况的改变会通过海气相互作用影响到亚澳季风及亚澳地区天气气候异常,是东亚等地区夏季环流异常的信号来源之一(晏红明和肖子牛, 2000; Guan and Yamagata, 2003)。

海温异常是季节预测的主要信息源,因此动力模式对海温的预测能力决定着它对东亚环流预测的能力,对模式预测海温的能力进行评估可以为模式对环流及降水的预测能力归因提供参考。目前,国家气候中心已建立了包括海—陆—冰—气多圈层相互作用的气候系统模式(BCC\_CSM),该模式在气候特征、年代际变化和季节内振荡等方面表现出较好的性能(Wu et al., 2010; 董敏等, 2009),以该模式为基础国家气候中心建立了第二代季节预测模式系统(吴统文等, 2013, 2014),本文利用该模式系统的历史回报资料,评估了对东亚夏季环流系统有显著影响的太平洋、热带印度洋、北大西洋等关键海区夏季海温的预测技巧,并进一步分析了前冬 ENSO 位相与夏季海温预测技巧的关系。

## 2 预测模式及数据

### 2.1 BCC\_CSM 模式简介

BCC\_CSM 是国家气候中心自 2004 年开始在 NCAR-CCSM 框架基础上, 建立包括海—陆—冰—气多圈层相互作用的气候系统模式 (Wu et al., 2013), 该模式能够对大气、陆面、海洋、海冰等多圈层进行月、季、年尺度的气候预测。BCC\_CSM 的大气模式和陆面模式水平分辨率为 T106 (106 波三角截断) 的中等分辨率耦合模式 (颀卫华和吴统文, 2010; 董敏和叶正青, 2005; 王璐等, 2009; Wu et al., 2008, 2010; Wu, 2012; Chen et al., 2012; 郭准等, 2011); 海洋分量模式为美国地球物理流体动力学实验室 (GFDL) 研发的模块化海洋模式 (MOM) 4.0 版本 MOM4-L40 (Murray, 1996), 三极网格, 近赤道地区水平分辨率约为  $1/3$  纬度 $\times$ 1 经度, 中高纬约 1 纬度 $\times$ 1 经度, 垂直方向 40 层。

### 2.2 数据

本文所使用数据为由国家气候中心提供的第二代季节预测模式系统的历史回报数据, 分析时间为 1981~2007 年, 大气初始场采用 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 再分析资料同化产品的多层次温度、风场及地面气压场, 海冰初始场采用 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 最优插值的海冰密集度资料, 海洋初值采用 NOAA GODAS (Global Ocean Data Assimilation System) 的多层次温度场; 为实现气候系统多变量的整体协调性, 使用松弛逼近方法完成初始化。初始场分别由每月最后 4 天日平均大气场及最后三天日平均海温场生成, 积分时间 6 个月。模式输出结果为月平均数据, 分辨率为  $160\times 320$ , 约  $1.125^\circ\times 1.125^\circ$ 。分析的目标季节为夏季 (6~8 月), 使用了分别从 2 月底 (超前 3 个月预测时间) 及 5 月初 (超前 1 个月预测时间) 起报的两组回报结果来进行对比。为了评估该模式的性能, 所用海温再分析资料为 ERRSST.v3b (Smith et al., 2008), 分辨率为  $2^\circ\times 2^\circ$ 。为了与再分析数据进行比较, 本文使用双线性插值将回报数据插值到再分析数据同样分辨率。

为了更好地反映该模式的预测性能, 对各个海区有代表性的海温指数进行评估, 所用的海温指数有: Niño 3.4 指数, 定义为赤道中东太平洋海区 ( $5^\circ\text{S}\sim 5^\circ\text{N}$ ,  $170^\circ\text{W}\sim 120^\circ\text{W}$ ) 的海表温度距平值

(Sea Surface Temperature Anomalies, SSTA); IOBW 指数, 定义为热带印度洋 ( $20^\circ\text{S}\sim 20^\circ\text{N}$ ,  $40^\circ\text{E}\sim 110^\circ\text{E}$ ) 区域平均的 SSTA (Klein et al., 1999; Lau and Nath, 2000; Meyers, 1996); NAT 指数, 定义为北大西洋中纬度 ( $34^\circ\text{N}\sim 44^\circ\text{N}$ ,  $72^\circ\text{W}\sim 62^\circ\text{W}$ ) 与高纬度 ( $44^\circ\text{N}\sim 56^\circ\text{N}$ ,  $44^\circ\text{W}\sim 24^\circ\text{W}$ ) 和低纬度 ( $0^\circ\sim 18^\circ\text{N}$ ,  $46^\circ\text{W}\sim 24^\circ\text{W}$ ) 的平均的 SSTA 之差 (Marshall et al., 2001; 李建等, 2007; Wu et al., 2009; 左金清等, 2012; Zuo et al., 2013)。

## 3 BCC\_CSM 模式海温预测技巧评估

图 1 给出了 1981~2007 年观测与模式回报的全球中低纬夏季气候海温及差值分布。由图 1a-c 可见, 观测与模式回报的夏季气候海温在总体上分布较一致, 能较好地反映海温从热带到中高纬递减的分布特征。赤道东太平洋冷舌区海温变化是衡量气候系统年际变化的重要指标, 从图中可以看到模式回报结果相对观测冷舌偏西偏强, 这也是动力模式预测这些地区海温时常见的问题, 如单独海洋模式 (Stockdale et al., 1993) 或是耦合模式 (Mechoso et al., 1995; Latif et al., 2001; Lin, 2007) 中模拟的冷舌海温都偏低且西伸幅度较大。与冷舌相对应, 模式回报的印度洋—太平洋暖池 (以下简称“印太暖池”) 范围偏小、强度偏弱。从超前 1 个月预测时间模式回报与观测的差值图 (图 1d, 阴影区域为 99% 信度) 可见, 海温差值从南到北纬向呈正负相间的分布特征, 低纬地区海温预测误差较小, 中纬度的海温误差相对较大, 南半球的误差分布较北半球更为显著。不同海区的误差分布有所不同, 印度洋的预测误差较小, 误差较大的区域主要分布在大西洋、黑潮区、亲潮区及其延伸体区 (Kuroshio-Oyashio extension, KOE, 以下将黑潮、亲潮延伸体区简称为 KOE) 以及东太平洋中纬度附近等地区。模式在不同超前时间预测误差分布较为相似, 但超前 3 个月时间预测的误差 (图 1e) 的较之超前 1 月时间预测更为显著, 这说明超前预测时间增长, 模式的误差增长明显。

图 2 给出了 1981~2007 年观测与模式回报的全球中低纬夏季海温年际方差及方差比值 (模式回报的海温年际方差与观测的海温年际方差比值) 分布。观测 (图 2a) 中海温方差大值区 (年际变率显著区) 主要集中在赤道太平洋、北太平洋以及北大西洋。模式的回报结果在一定程度上反映出了夏季

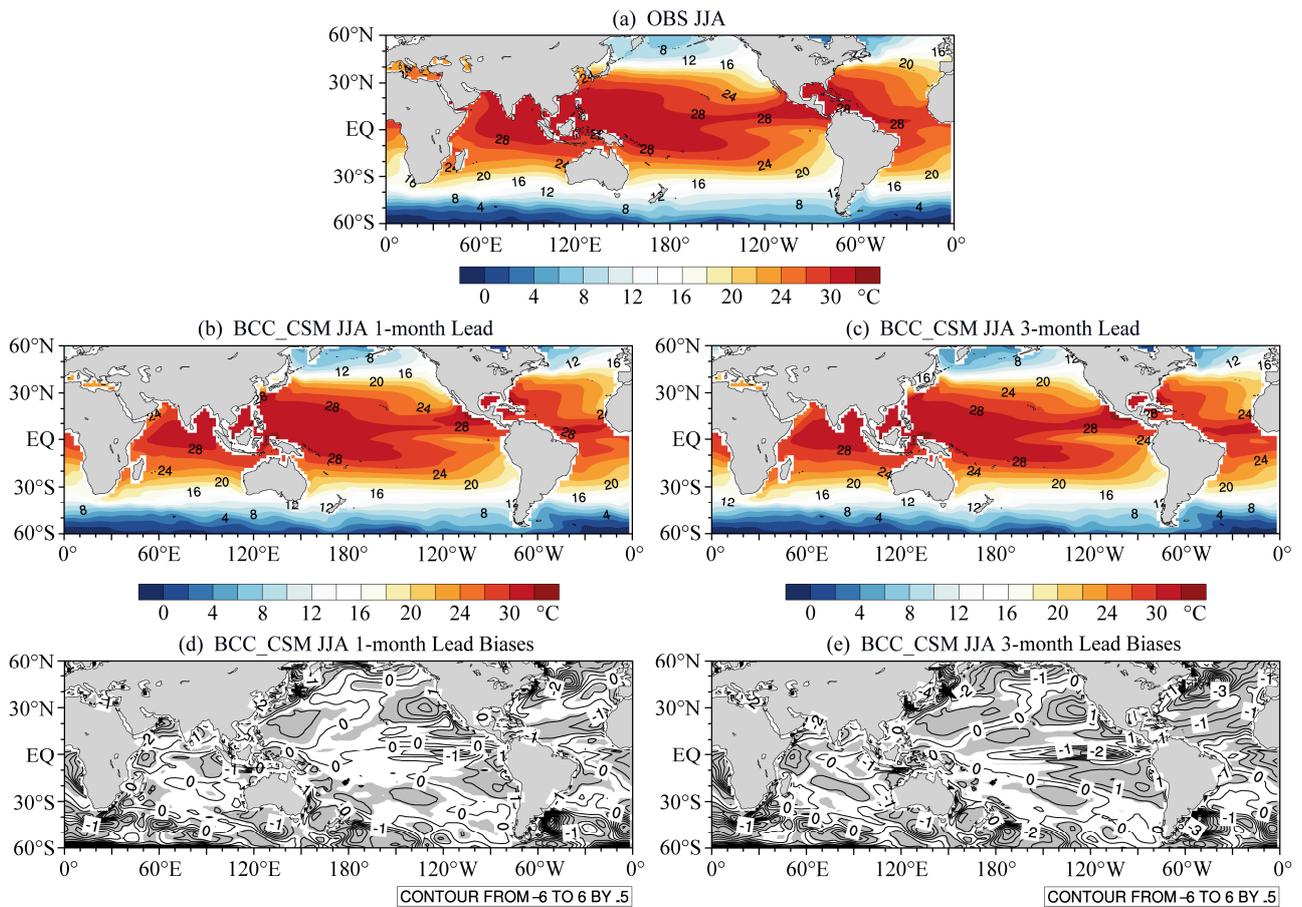


图1 观测与模式回报1981~2007年夏季SST及偏差气候分布:(a)观测;(b)超前1个月预测;(c)超前3个月预测;(d)超前1个月预测偏差;(e)超前3个月预测偏差。图(d)、(e)阴影区表示99%的信度;单位:°C

Fig. 1 Spatial distribution of the summer climatology SST and bias for 1981-2007 (°C): (a) Observation; (b) 1-month lead predictions; (c) 3-month lead predictions; (d) 1-month lead bias; (e) 3-month lead. Shaded areas are above the 99% confidence level

海温区域性年际变化特征,但模式回报结果(图2b, c)在赤道太平洋区域年际变率偏强,中心位置偏西,这与气候平均中冷舌偏西的问题相对应;北太平洋区域除KOE区外年际变率偏小,KOE区附近年际变率明显偏大;北大西洋区域年际变率明显偏大,且随着模式在超前预测时间增长,年际变率的差异明显增大。且由方差比值图(图2d, e)可见,北半球尤其是北太平洋区域大部分地区方差比分布较为一致且小于1,表明模式在这些区域的年际变率要小于观测;方差比比较大区域主要分布在南半球中纬度,其中南大西洋方差比大值分布较为明显,表明在这些区域模式回报结果年际变率相对于观测偏大。

为进一步评估BCC\_CSM模式对于夏季SST的预测技巧,图3为1981~2007年夏季观测与模式回报的全球中低纬海温相关系数分布,从图中来

看,BCC\_CSM模式在低纬地区都具有较高的预测技巧,且北半球的预测技巧明显高于南半球。由图3a与图3b对比可见,预测时间延长后,模式在大部分区域预测技巧有所下降。KOE区的预测技巧相对偏低,且超前3个月的预测技巧高于超前1个月的预测技巧,这与预测技巧KOE区具有的动力与热力、大气和海洋间复杂的相互作用特点有关(Kelly et al., 2010),导致耦合系统很难预测该地区的海温,且大多数的气候模式的分辨率太低,难以预测出黑潮的位置和强度(Kwon et al., 2010)。另一个特点是模式对热带印度洋东部的预测技巧较低,这可能与模式回报的冷舌偏西偏强以及暖池区域较小有关,且预测时间变长后,模式的预测技巧有所下降,但分布型存在类似的结构特征。超前预测时间为1个月时,模式在北大西洋大部分地区都拥有一定的预测技巧,但随着预测时间的增长,预

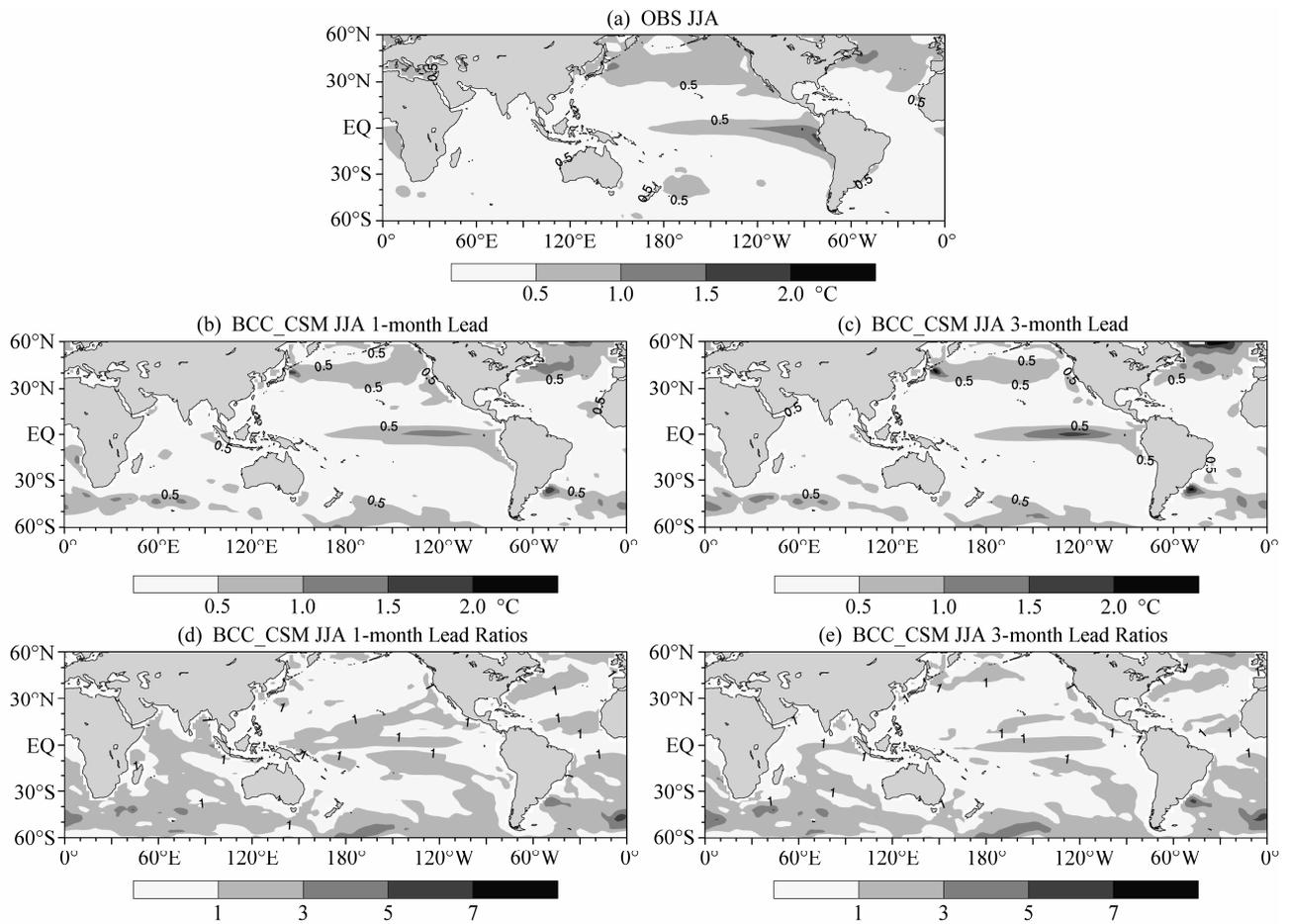


图2 观测与模式回报 1981~2007 年夏季 SST 方差及方差比分布：(a) 观测；(b) 超前 1 个月预测；(c) 超前 3 个月预测；(d) 超前 1 个月预测方差比；(e) 超前 3 个月预测方差比。图 (a-c) 单位：°C

Fig. 2 Spatial distribution of the summer SST standard deviation and ratios for 1981-2007 (°C): (a) Observation; (b) 1-month lead predictions; (c) 3-month lead predictions; (d) 1-month lead ratios; (e) 3-month lead ratios

测技巧在中纬度地区下降的很快，仅在低纬以及少数地区表现出一定的预测技巧。从图 4a-b 可以看出，模式在不同超前预测时间，均方根误差 (RMSE, Root Mean Square Error) 较大值主要分布在南半球区域以及北大西洋中高纬度与 KOE 区附近等区域，反映了模式在这些区域的预测误差相对较大，且随着超前预测时间增长而增长。

### 3.1 夏季太平洋

前人大量关于 ENSO 关键区—热带太平洋的海温研究工作揭示了大部分耦合模式在热带太平洋地区拥有较好的预测技巧，前文的分析也同样证实了这一点。BCC\_CSM 模式对热带外北太平洋海温的预测技巧也同样是本文关注的重点。主模态的空间分布反映了北太平洋年际变率最显著的分布型特征，因此分析了观测和模式预测的 EOF

(Empirical Orthogonal Function) 模态的空间分布，限于篇幅，这里仅给出了北太平洋第一模态的空间分布图 (图 5)，从图 5a 中可以看出，观测中夏季北太平洋海温第一模态是东西反位相的空间分布，图 5b 和图 5c 分别为超前 1 个月和超前 3 个月的预测，可以看出模式预测的海温第一模态分布特征与观测的分布型比较类似，空间分布型的相关系数分别为 0.8 和 0.81 (表 1)。同时，观测的夏季海温距平的第一模态的解释方差比例为 27.2%，模式超前 1 个月和 3 个月预测的主模态分别占了总方差的 33.7% 和 42.9%，这表明模式预测比观测更容易出现第一模态的空间分布型。模式的第二模态的空间分布与观测的第二模态仍有较好的一致性 (图略)，超前 1 个月和超前 3 个月预测的空间相关系数分别为 0.79 和 0.78，第三模态空间分布的差异明显变大，

相关系数也仅为 0.33 和 0.31。但第二模态的解释方差所占总方差的比重模式预测小于观测。

为了分析模式对观测的第一模态空间分布型的预测能力,将模式回报结果的时空矩阵投影到由

观测时空矩阵进行 EOF 分解得到的特征向量上,得到模式回报相应的时间系数,图 5d 给出了观测和模式预测的时间系数年际变化。可以看出,观测的时间系数和模式预测的投影系数年代际震荡特征

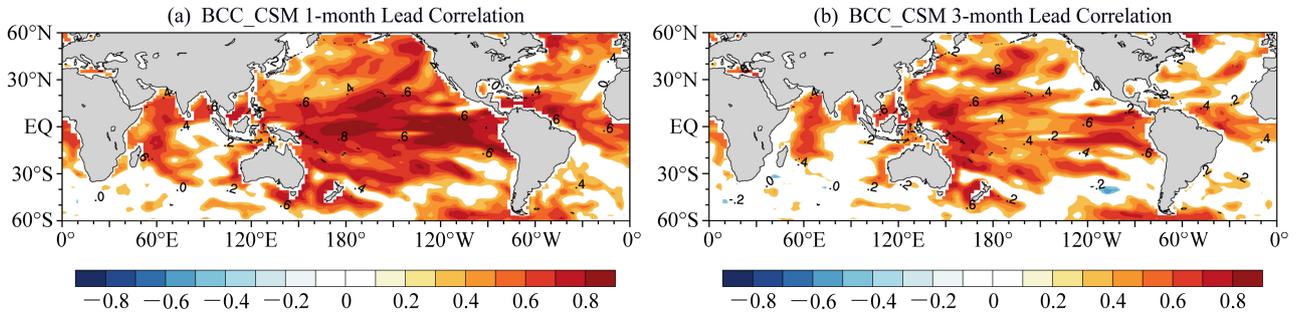


图 3 模式回报与观测 1981~2007 年夏季海温相关分布: (a) 超前 1 个月预测; (b) 超前 3 个月预测。彩色阴影区表示 95% 的置信度  
Fig. 3 Correlation skill of the BCC\_CSM summer SST predictions during 1981 to 2007: (a) 1-month lead predictions; (b) 3-month lead predictions. Shaded areas are above the 95% confidence level

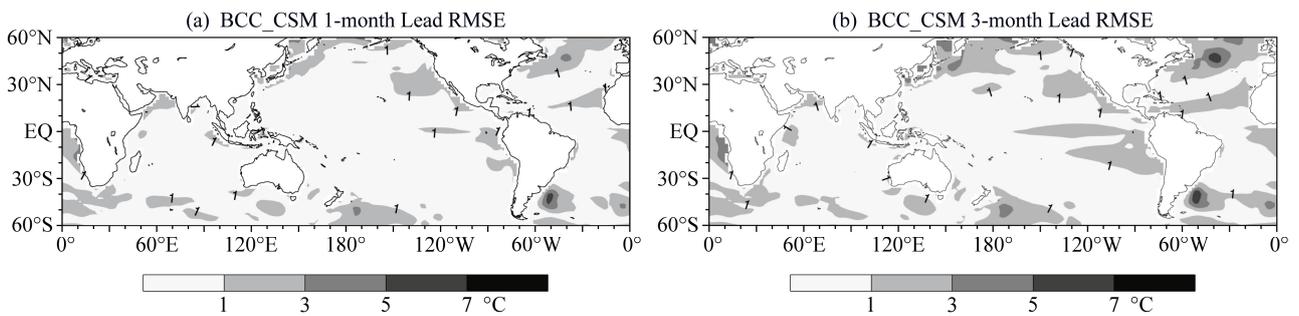


图 4 模式回报与观测 1981~2007 年夏季海温 RMSE 分布: (a) 超前 1 个月预测; (b) 超前 3 个月预测。单位: °C  
Fig. 4 RMSE of the BCC\_CSM summer SST predictions during 1981 to 2007 (°C): (a) 1-month lead predictions; (b) 3-month lead predictions

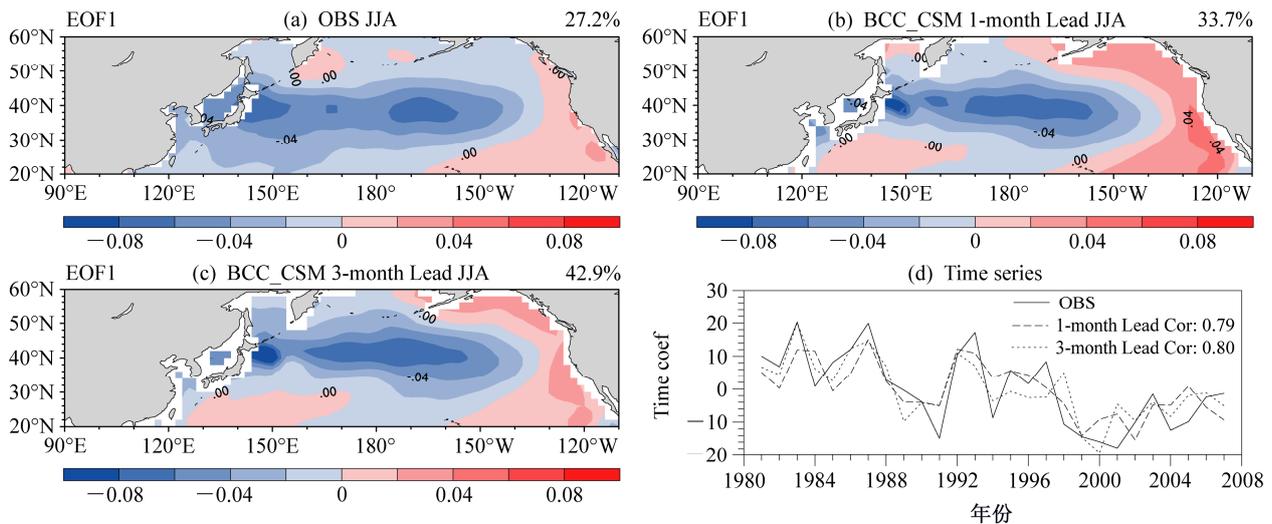


图 5 观测与模式回报 1981~2007 年夏季北太平洋 SST 的 EOF 第一模态及对应时间系数: (a) 观测; (b) 超前 1 个月预测; (c) 超前 3 个月预测; (d) 时间系数 (实线、长虚线和短虚线分别为观测值、超前 1 个月预测和超前 3 个月预测,下同)  
Fig. 5 Spatial patterns and time series of the first EOF mode of the summer SST (1981-2007): (a) Observation; (b) 1-month predictions; (c) 3-month lead predictions; (d) time series. Solid line, long dashed line, and short dashed line indicate observations, 1-month lead, and 3-month lead, respectively (the same hereinafter)

十分明显且均具有一个逐渐下降的趋势,表明在这 27 年间,该海区夏季平均海温西部升高而东部降低,而模式很好的再现了这个特征及趋势,超前 1 个月预测和超前 3 个月预测的时间相关系数分别为 0.78 和 0.80,都达到了 99%的置信水平,且超前 3 个月的预测对第一模态空间分布型的年际变率预测能力更高。第二模态和第三模态超前 1 个月的预测均好于超前 3 个月的预测,超前 1 个月对第二模态和第三模态的时间系数相关分别为 0.77 和 0.53,超前 3 个月则分别为 0.64 和 0.19。可以看出,超前 1 个月预测技巧高于超前 3 个月的主要原因是第二模态和第三模态预测性能的提高。通过不同时效的预测效果对比,我们初步估计,春季异常的影响可能体现在第二和第三模态上,第一模态的变化可能主要来自于冬季的异常信号,具体的可能原因将另文进行详细讨论。

BCC\_CSM 模式对表征 ENSO 事件的 Niño 3.4 指数的预测技巧优劣,是本文研究夏季太平洋年际变率所关注的另一重点。图 6 给出了 1981~2007 年观测与模式回报的夏季平均 Niño 3.4 指数及其差

值图,结果(图 6a)显示超前 1 个月时间的预测在指数位相变化与指数强度上与观测更为接近,超前 1 个月和超前 3 个月预测的 Niño 3.4 指数与观测的相关系数分别为 0.83 和 0.63,都达到了 99%的置信水平,超前 3 个月的预测技巧明显低于超前 1 个月。从差值图(图 6b)中可以看出,超前 1 个月的预测与观测差值集中在 0 附近,变化幅度较小;超前 3 个月的预测与观测的差值位相变化基本与超前 1 个月的差值相同,但变化幅度更大。这表明 BCC\_CSM 模式对于夏季 Niño3.4 区 SST 异常具有较高的预测技巧,但随着超前预测时间的增加,模式的预测技巧下降比较快。进一步分析了夏季发生发展 ENSO 事件的年份的预测技巧,实况中在夏季发生 El Niño 现象的年份有 1982、1987、1991、1997 和 2002 年,其中强度较强是 1982、1987 和 1997 年,模式在超前 1 个月预测时间回报的指数都与观测基本吻合,其他海温强度偏弱的年份,模式的回报的 Niño 3.4 指数皆弱于观测;在夏季发生 La Niña 现象的年份为 1984、1985、1988、1999、2000 和 2007 年,其中强度较强的 1988 和 1999 年,模式回报的指数皆

表 1 北太平洋海温 EOF 分析前 3 模态方差贡献百分率及模式与观测时间系数、空间模态相关系数

Table 1 Variance percentages and correlation coefficient of time series and spatial patterns of the first third modes in the EOF analysis of SST fields in the North Pacific

	第一模态方差贡献/时间系数 相关系数/空间模态相关系数	第二模态方差贡献/时间系数 相关系数/空间模态相关系数	第三模态方差贡献/时间系数 相关系数/空间模态相关系数	累计方差贡献
超前 1 个月预测	33.7/0.78/0.80	19.2/0.77/0.79	9.8/0.53/0.33	62.7%
超前 3 个月预测	42.9/0.80/0.81	18.4/0.64/0.78	11.1/0.19/0.31	72.4%
观测	27.2	21.5	9.2	57.9%

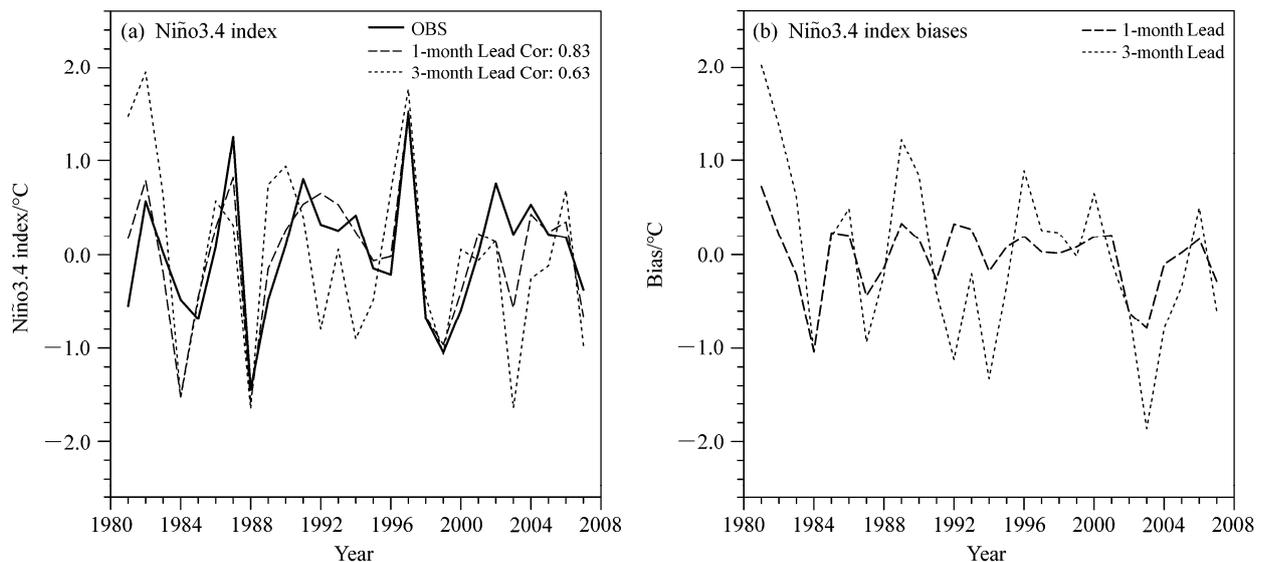


图 6 观测与模式回报 1981~2007 年夏季 Niño 3.4 指数和偏差: (a) Niño 3.4 指数; (b) 偏差。单位: °C  
Fig. 6 (a) Summer Niño 3.4 index and (b) biases (1981-2007)

与观测基本吻合, 其他海温强度偏弱的年份, 模式回报的 Niño 3.4 指数皆强于观测。

### 3.2 夏季热带印度洋

图 7a-c 给出了观测和模式回报夏季热带印度洋海温 EOF 第一模态的空间分布。在图 7a 中, 观测的第一模态显示了热带印度洋海温在夏季的空间分布为总体为全区一致型, 但这种分布型已经处于衰减状态, 逐渐在向东西偶极型分布发展, 图 7b 和图 7c 分别为超前 1 个月和超前 3 个月的预测, 可以看出模式预测的海温第一模态分布特征与观测的分布型基本呈现一致, 空间分布型的相关系数分别为 0.84 和 0.76 (表 2), 但预测结果在不同区域都出现了相反位相的分布。同时, 观测的夏季海

温距平的第一模态的解释方差比例为 43.5%, 模式超前 1 个月和 3 个月预测的主模态分别占了总方差的 40.0% 和 36.0%, 这表明模式预测的第一模态的空间分布型与观测基本相当。模式的第二、三模态的空间分布与观测的第二、三模态的一致性有所下降 (图略), 超前 1 个月和超前 3 个月预测的空间相关系数分别为 0.42 和 0.61, 第三模态空间分布的差异明显变大, 相关系数也仅为 0.40 和 0.20。但第二模态的解释方差所占总方差的比重模式预测均大于观测, 这表明模式预测出现第二模态的空间分布型的概率要大于观测。

同样利用投影的方法得到了印度洋夏季海温模式回报相应的时间系数, 图 7d 给出了观测和模

表 2 印度洋海温 EOF 分析前 3 模态方差贡献百分率及模式与观测时间系数、空间模态相关系数

Table 2 Variance percentages and correlation coefficient of time series and spatial patterns of the first third modes in the EOF analysis of SST fields in the Indian Ocean

	第一模态方差贡献/时间系数	第二模态方差贡献/时间系数	第三模态方差贡献/时间系数	累计方差贡献
	相关系数/空间模态相关系数	相关系数/空间模态相关系数	相关系数/空间模态相关系数	
超前 1 个月预测	40.0/0.74/0.84	29.8/0.44/0.42	9.3/0.37/0.40	79.1%
超前 3 个月预测	36.0/0.71/0.76	21.9/0.36/0.61	11.5/0.19/0.20	69.4%
观测	43.5	13.4	12.9	69.8%

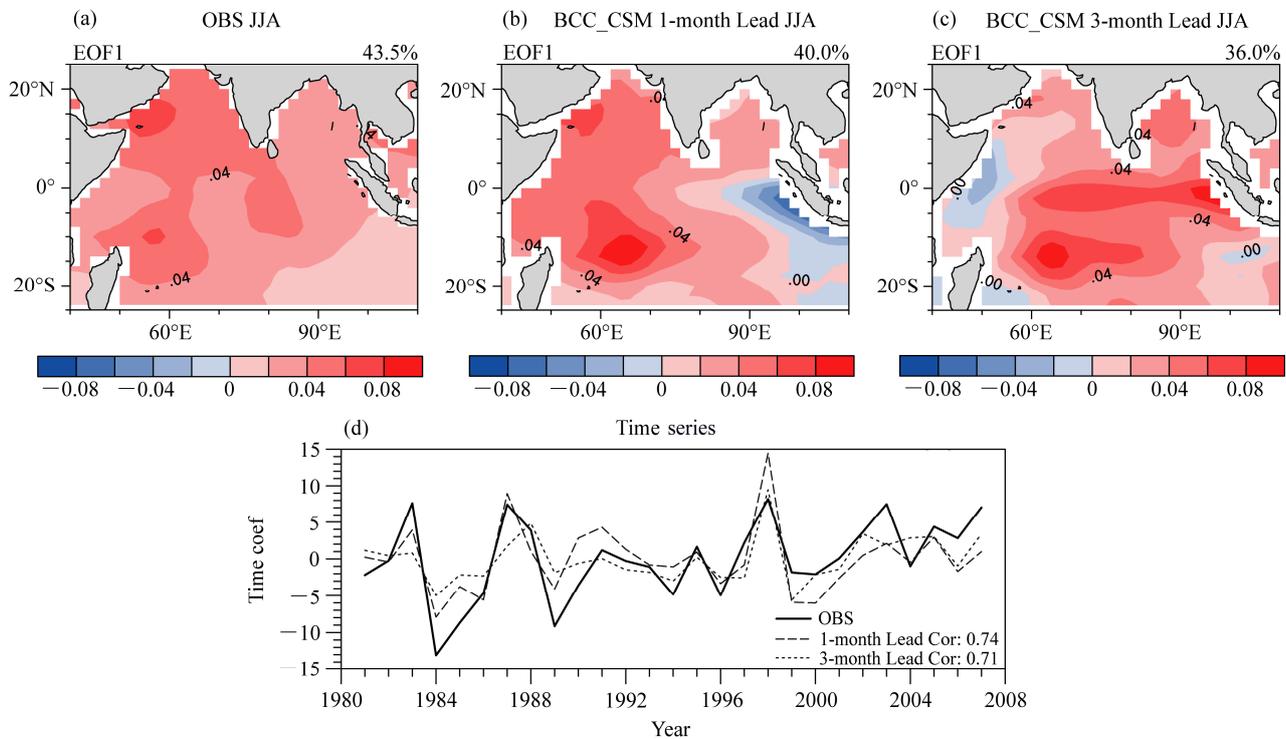


图 7 观测与模式回报 1981~2007 年夏季印度洋 SST 的 EOF 第一模态及对应的时间系数: (a) 观测; (b) 超前 1 个月预测; (c) 超前 3 个月预测; (d) 时间系数

Fig. 7 Spatial patterns and time series of the first EOF mode of the summer SST (1981-2007): (a) Observation; (b) 1-month predictions; (c) 3-month lead predictions; (d) time series

式预测的时间系数年际变化。可以看出, 模式基本再现了夏季热带印度洋海温的变化特征, 超前 1 个月预测和超前 3 个月预测的时间相关系数分别为 0.74 和 0.71, 都达到了 99% 的置信水平, 且超前 1 个月的预测对第一模态空间分布型的年际变率预测能力更高。第二模态超前 3 个月的预测好于超前 1 个月的预测, 第三模态超前 1 个月的预测好于超前 3 个月的预测, 超前 1 个月对第二模态和第三模态的时间系数相关分别为 0.44 和 0.36, 超前 3 个月则分别为 0.37 和 0.19。可以看出, 模式对于印太暖池的预测误差使得模式对热带印度洋以及太平洋海温的主模态的空间分布误差增大, 且该地区海温异常信号的持续性要弱于太平洋, 主要体现在第二模态和第三模态, 导致了预测误差增长。

图 8 给出了 1981~2007 年观测与模式回报的夏季季节平均 IOBW 指数及其差值图, 模式的预测结果的年际变化特征基本与观测一致, 超前 1 个月时间预测和超前 3 个月的预测与观测指数的相关系数分别为 0.75 和 0.69, 均达到了 99% 的置信水平, 但模式预测的强度与观测存在差异, 在 1996 年之前表现为强度偏弱, 在此之后表现为偏强。从图中 (图 8a) 可以看出, 观测的 IOBW 指数振幅在随着时间减小, 且负指数的绝对值在随着时间减小。模式回报的指数振幅比较平缓, 在前期振幅较观测偏小, 即指数强度小于观测; 在后期模式回报的指数数值较之观测偏向冷位相, 且对于负指数的上升趋势

势预测技巧偏低。结合差值图 (图 8b) 可见, 模式虽然对夏季 IOBW 指数的变化趋势具有一定的技巧, 但是对强度的预测还是存在一定的偏差。

### 3.3 夏季北大西洋

图 9a-c 给出了观测和模式回报夏季北大西洋海温 EOF 第一模态的空间分布。在图 9a 中, 观测的第一模态显示了北大西洋海温在夏季的空间分布为北高南低的分布型, 图 9b 和图 9c 分别为超前 1 个月和超前 3 个月的预测, 可以看出模式预测的海温第一模态分布特征与观测的分布型基本呈现一致, 空间分布型的相关系数分别为 0.73 和 0.67 (表 3), 但预测结果的南北位相差异常偏大。同时, 观测的夏季海温距平的第一模态的解释方差比例为 39.1%, 模式超前 1 个月和 3 个月预测的主模态分别占了总方差的 41.9% 和 63.7%, 这表明模式预测尤其是超前 3 个月的预测更容易出现第一模态的空间分布型。模式的第二、三模态的空间分布与观测的第二、三模态的一致性下降很快 (图略), 且除超前 3 个月预测的第三模态外基本表现为不相关, 超前 1 个月和超前 3 个月预测的空间相关系数分别为 -0.19 和 0.03, 第三模态空间分布的差异明显变大, 相关系数也仅为 -0.10 和 0.42。且第二、三模态的解释方差所占总方差的比重模式预测均小于观测。

图 9d 给出了北大西洋观测和模式预测特征向量投影对应的时间系数年际变化。可以看出, 模式

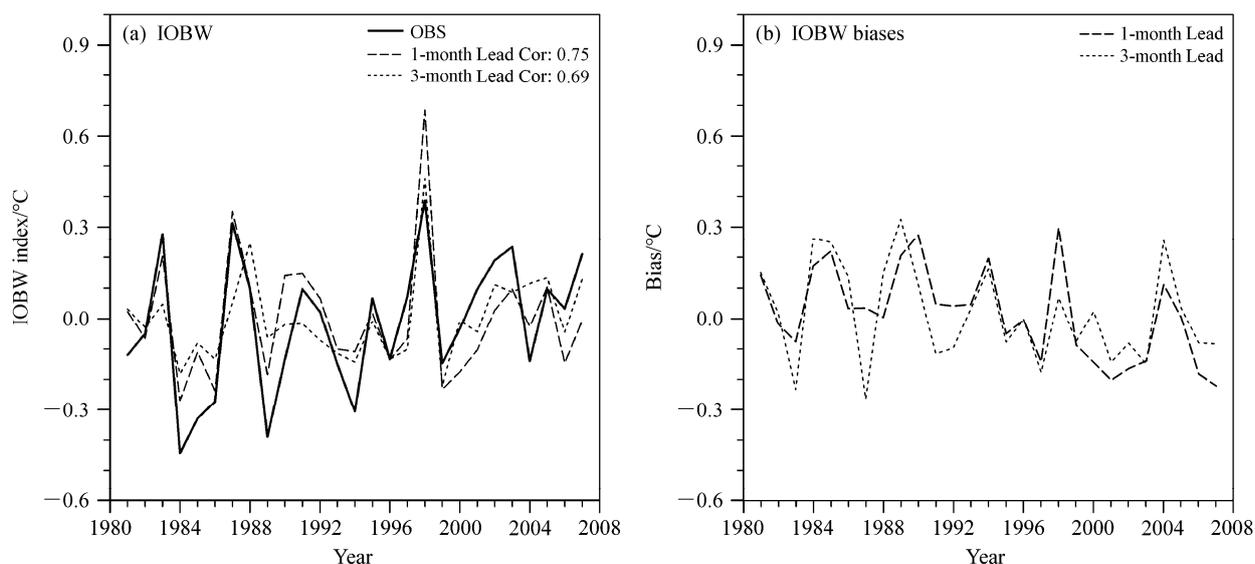


图 8 观测与模式回报 1981~2007 年夏季 IOBW 指数和偏差: (a) IOBW 指数; (b) 偏差。单位: °C

Fig. 8 (a) Summer IOBW index and (b) biases (1981-2007)

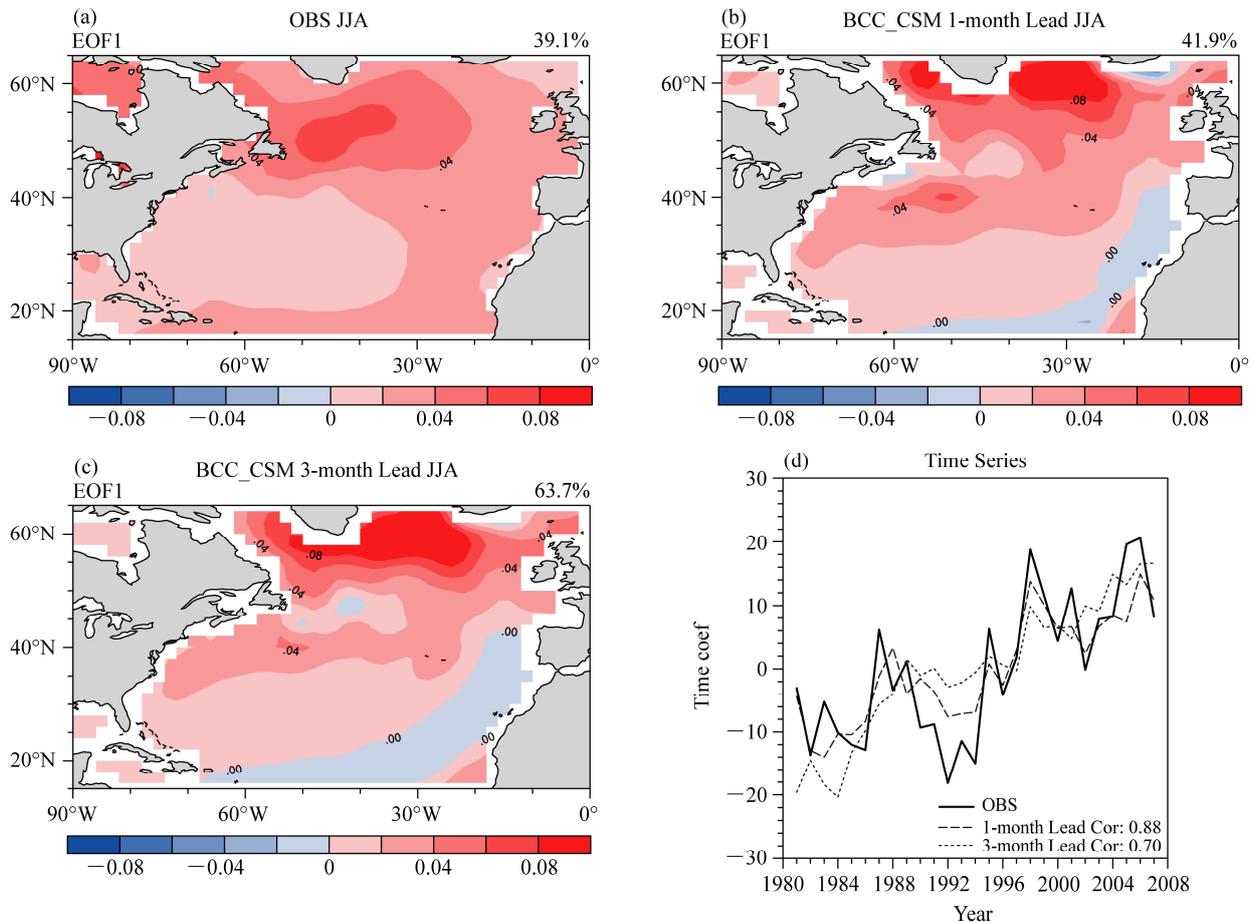


图9 观测与模式回报 1981~2007 年夏季北大西洋 SST EOF 第一模态及对应的时间系数: (a) 观测; (b) 超前 1 个月预测; (c) 超前 3 个月预测; (d) 时间系数  
Fig. 9 Spatial patterns and time series of the first EOF mode of the summer SST (1981-2007): (a) Observation; (b) 1-month predictions; (c) 3-month lead predictions; (d) time series

表 3 北大西洋海温 EOF 分析前 3 模态方差贡献百分率及模式与观测时间系数、空间模态相关系数

Table 3 Variance percentages and correlation coefficient of time series and spatial patterns of the first third modes in the EOF analysis of SST fields in the North Atlantic

	第一模态方差贡献/时间系数 相关系数/空间模态相关系数	第二模态方差贡献/时间系数 相关系数/空间模态相关系数	第三模态方差贡献/时间系数 相关系数/空间模态相关系数	累计方差贡献
超前 1 个月预测	41.9/0.88/0.73	16.8/0.59/-0.19	8.6/0.59/-0.10	67.3%
超前 3 个月预测	63.7/0.70/0.67	13.0/0.45/0.03	5.4/0.30/0.42	82.1%
观测	39.1	17.8	11.3	68.2%

总体表现为与观测一致上升趋势, 这表明最近 27 年夏季北大西洋海温有明显的升高趋势, 但模式回报的时间系数变化幅度小于观测, 超前 1 个月预测和超前 3 个月预测的时间相关系数分别为 0.88 和 0.70, 都达到了 99% 的置信水平, 且超前 1 个月的预测对第一模态空间分布型的年际变率预测能力更高。第二模态与第三模态超前 1 个月的预测皆好于超前 3 个月的预测, 超前 1 个月对第二模态和第三模态的时间系数相关分别为 0.59 和 0.45, 超前 3

个月则分别为 0.59 和 0.30。可以看出, 北大西洋海温的春季海温异常信号明显强于冬季, 第一模态的差异尤为明显, 这使得超前 1 个月预测技巧高于超前 3 个月。

图 10 给出了 1981~2007 年观测与模式回报的夏季季节平均 NAT 指数及其差值图, 从图 10a 可以看出, 超前 1 个月预测时间与观测的指数相关系数为 0.42, 通过了 95% 的置信水平, 超前 3 个月预测与观测的指数相关系数为 0.20, 这表明模式对 NAT

指数的预测技巧很低,尤其是超前3个月的预测。从差值图(图10b)中可以看出,模式在不同超前预测时间对夏季 NAT 指数的预测技巧基本一致,且在 NAT 高指数年 1987、1993 和 1997 年,指数的差值很大,模式回报的指数变化比较平缓,未能反映出指数强烈振荡的特征,在其他年份,模式超前 1 个月的预测对于 NAT 指数的回报结果大多偏高。总体来说,模式对 NAT 指数的预测技巧相对于 Niño 3.4 指数与 IOBW 指数来说较低,仅在超前 1 个月的预测表现出一定的预测技巧。

### 3.4 海温指数的预测时效

图 11 给出了模式采取不同初值时对三个海温指数逐月预测技巧随时间的演变特征。从图中可以看出,对于 6 至 8 月的各指数预测,5 月的初值相

对而言具有更高的预测技巧,即模式超前 1 个月的指数预测更具有技巧。各指数的预测技巧基本都随积分时间的增长而下降,大部分情形前期技巧下降比较明显。比较图 11 中的各图可以看出,模式对 Niño 3.4 指数(图 11a)一直保持了一个较高的预测技巧,而在模式使用 5 月作为初值时,后期的技巧在甚至要高于前期。IOBW 指数(图 11b)从二月起报一直表现出一定的预测技巧,在 8 月份的预测技巧甚至略高于 5 月份初值;而 5 月份的海温初值在模式积分四个月之后到 11 月份表现出较弱的相关,这可能与热带印度洋全区一致海温模式春夏季较强而在秋季表现的不是很显著有关;模式对 NAT(图 11c)的预测技巧一直较低,预测技巧下降趋势也较为明显,后期预测技巧虽有提升但技巧

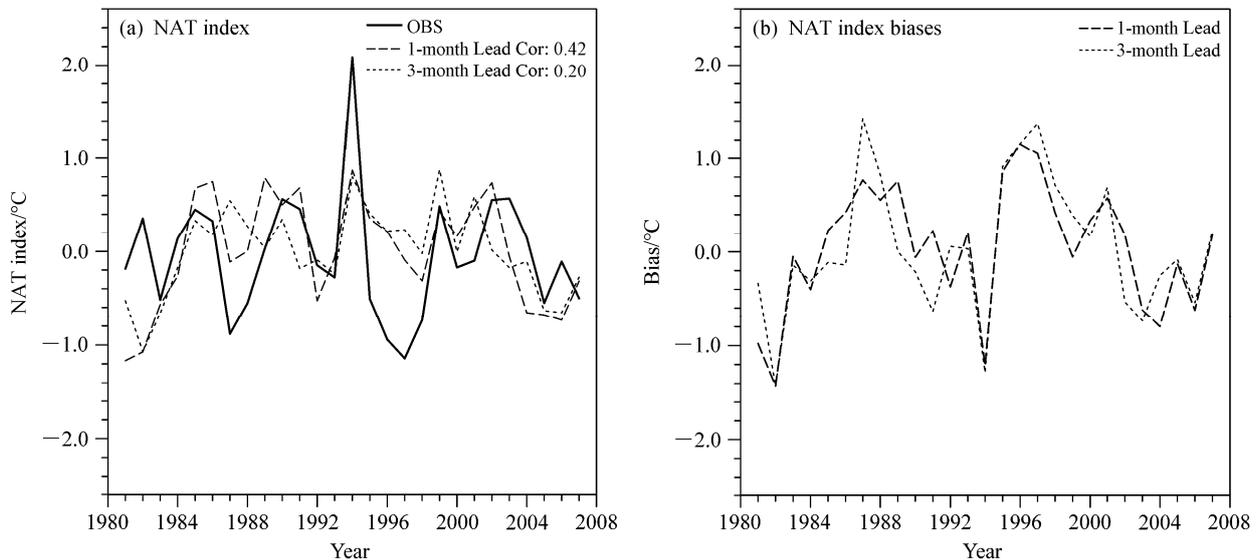


图 10 观测与模式回报 1981~2007 年夏季 NAT 指数和偏差: (a) NAT 指数; (b) 偏差。单位: °C  
Fig. 10 (a) Summer NAT Index and (b) biases during 1981 to 2007

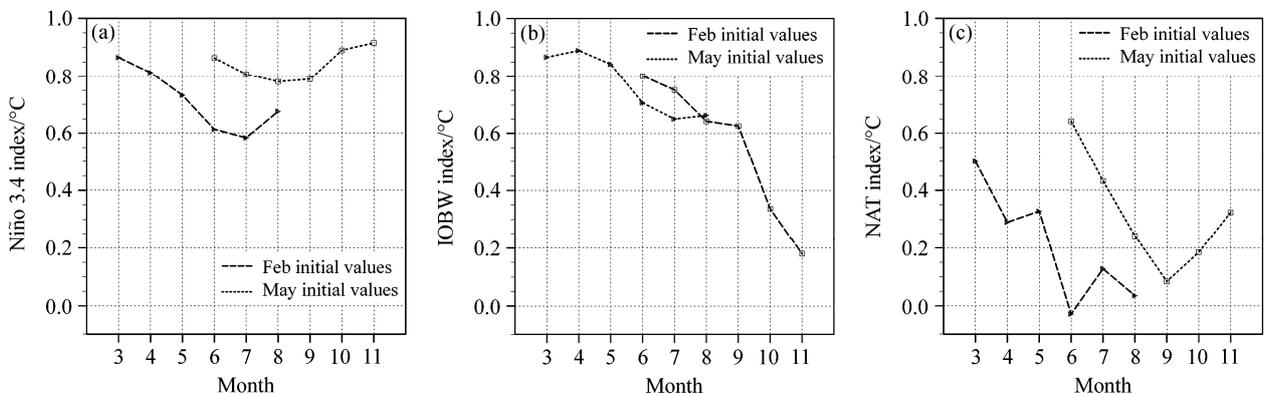


图 11 模式对各指数的预测时效(长虚线和短虚线分别为 2 月和 5 月提供初值): (a) Niño 3.4 指数; (b) IOBW 指数; (c) NAT 指数。单位: °C  
Fig. 11 Correlation skill of three indices for BCC\_CSM predictions (long dashed line and short dashed line indicate the months for initial conditions are February and May): (a) Niño 3.4 index; (b) IOBW index; (c) NAT index

很低。

## 4 前冬 ENSO 位相对于模式对夏季海温预测技巧的影响

### 4.1 前冬不同 ENSO 位相 SST 合成分析

众多研究表明,赤道中东太平洋年际变率最强信号 ENSO 事件,它在大洋、印度洋和北大西洋都存在着显著的相关,表明这些海区的海温变化受到来自热带太平洋的影响(Latif and Barnett, 1995; Lau, 1994; 吴国雄和孟文, 1998; Alexander et al., 2002)。由于 ENSO 的成熟期一般在冬季,本文根据 1981~2007 年的前冬的尼诺三四区海温异常,将回报结果分为 El Niño 年、La Niña 年和正常年

三种情况(表 4),以此来分析前冬 ENSO 位于不同位相时,对模式三个海区夏季海温预测技巧有何影响。

将模式回报与观测的夏季海温分别在 ENSO 不同位相下进行合成后进行差值分析,前冬不同 ENSO 位相模式回报与观测的夏季海温差值如图 12 示。前冬 ENSO 处于不同位相时,模式回报的海温差值分布特征基本一致,差值从北到南为一个负正相间的排列,但其强度和通过显著性检验的区域范围有所不同:前冬处于 ENSO 正常位相时(图 12a),海温的差异(通过 99% 的置信水平的区域)比前冬处于异常位相(图 12b-c)更为明显,这表明前冬的 ENSO 事件为夏季中低纬度的海温提供了可预报

表 4 不同 ENSO 位相分类

Table 4 Sets of different ENSO phases

前冬 ENSO 位相 年份 (27 a)	El Niño 年 (8 a)	La Niña 年 (8 a)	中性年 (11 a)
	1983、1987、1988、1992、1995、 1998、2003、2007	1984、1985、1986、1989、1996、 1999、2000、2001	1981、1982、1990、1991、1993、1994、1997、2002、 2004、2005、2006

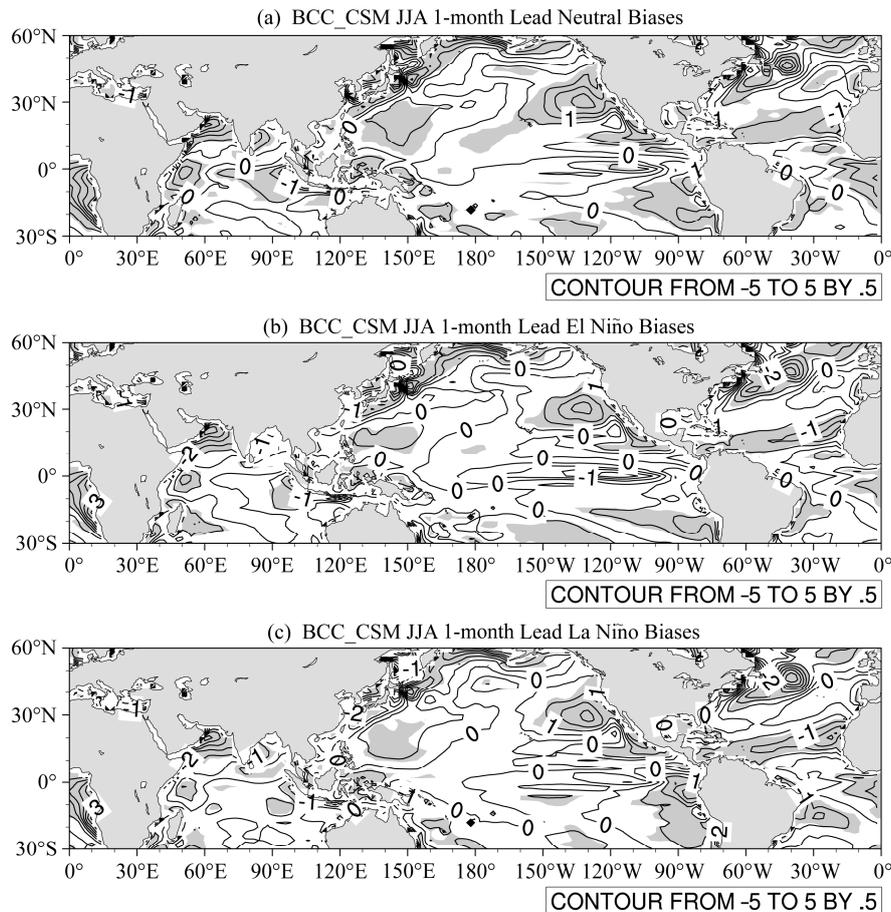


图 12 不同 ENSO 位相模式 SST 偏差合成(超前 1 个月预测): (a) 中性年; (b) El Niño 年; (c) La Niña 年。单位: °C

Fig. 12 Composite SST biases for different ENSO phases (1-month Lead): (a) Neutral; (b) El Niño; (c) La Niña

性来源; 前冬处于 El Niño 位相(图 12b)与 La Niña 位相时(图 12c)两种情形除在南太平洋等少数地区有细微差异外基本一致。随着超前预测时间的增长, 如图 13a-c 示, 海温差值的总体分布特征与图 12 相似, 但相对于超前 1 个月时间预测海温误差明显增大。

#### 4.2 不同 ENSO 位相各指数预测技巧的评估

为了进一步分析 ENSO 对于模式对夏季关键区海温预测技巧的影响, 本文对前冬 ENSO 处于不同位相下的模式回报各指数进行了分类, 以便深入分析。如图所示, 在前冬 ENSO 异常位相下(图 14a-b)观测的夏季 Niño 3.4 指数数值总体低于 ENSO 正常位相下(图 14c), 模式的回报在一定程度上也反映了这个特点。本文计算了在前冬位于 El Niño、La Niña 及正常位相下模式回报的 Niño 3.4 指数与观测值的差值  $B$ 。计算公式如下:

$$B = \left[ \sum |F(i) - O(i)| \right] \times \left[ \left( \sum F(i) - \sum O(i) \right) / \left| \sum F(i) - \sum O(i) \right| \right], \quad (1)$$

其中,  $F$  代表预测场,  $O$  代表观测场,  $i$  代表同一前冬位相下同一超前预测时间的所有预测。超前 1 个月时间预测的差值依次为 -0.31、0.36 和 0.31; 超前 3 个月时间预测的差值依次为 -0.58、0.44 和 0.53, 表明前冬 ENSO 为正常位相与 El Niño 位相时, 模式超前 1 个月的预测对于 Niño 3.4 指数的回报与观测更为接近, 且 El Niño 位相时回报偏低, 正常位相回报偏高; La Niña 位相预测技巧再次之, 且回报的指数偏高。而超前 3 个月的预测情形正好与前者相反, 即模式在前冬位于 La Niña 位相时预测技巧更高。总体来看, 前冬 ENSO 位相对该模式的夏季 Niño 3.4 指数预测技巧影响较小。

热带印度洋的 IOBW 指数滞后响应于赤道东太平洋 ENSO 事件 (Nigam and Shen, 1993; Turre and White, 1995; Chambers et al., 1999), 前冬 ENSO 位相为 El Niño 时(图 15a), IOBW 指数较高且大多位于正位相; 前冬 ENSO 位相为 La Niña 时(图 15b), IOBW 指数较低且大多位于负位相; 前冬

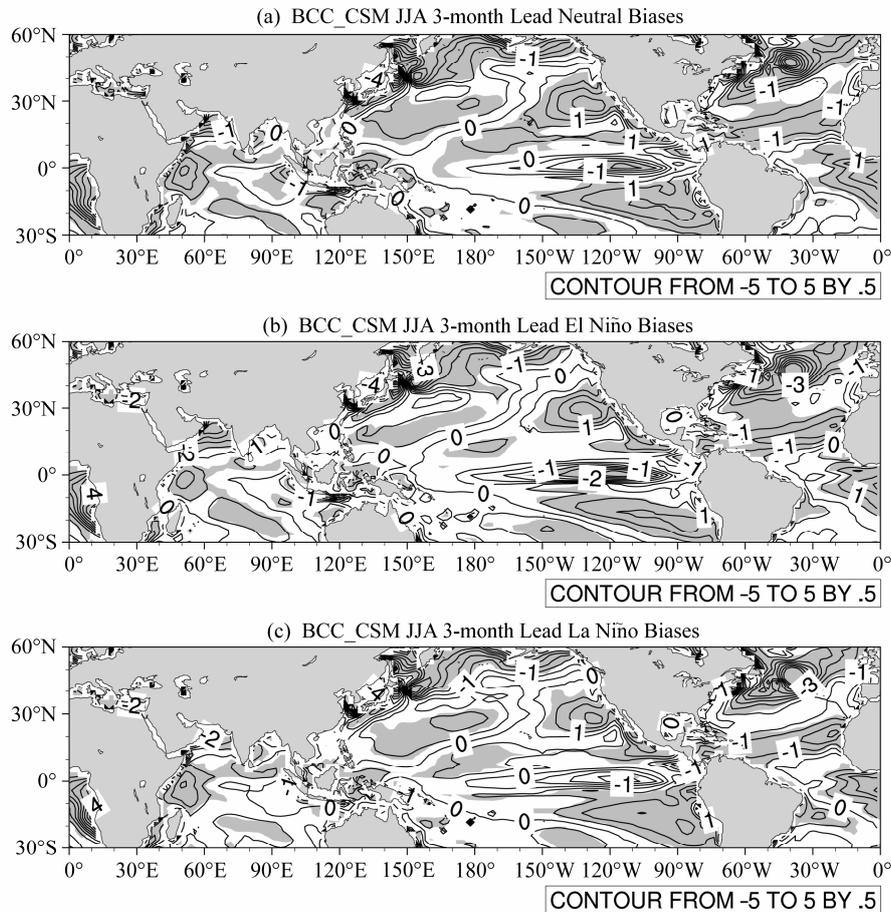


图 13 同图 12, 但为超前 3 个月回报结果

Fig. 13 Same as Fig. 12, but for 3-month lead

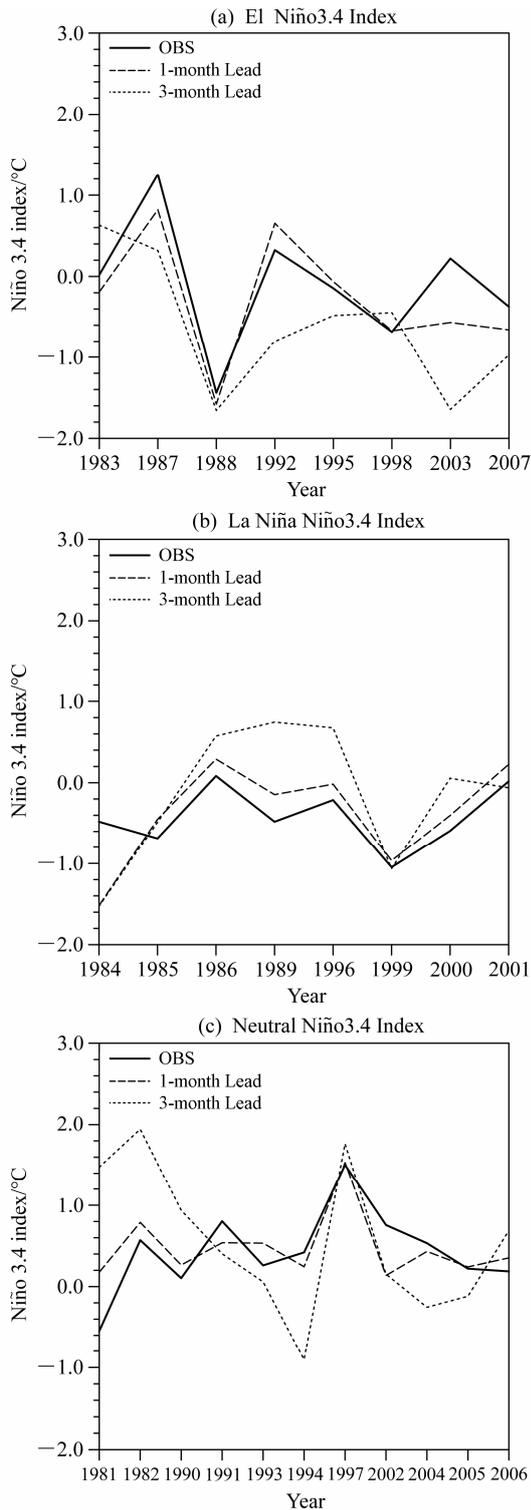


图 14 前冬 ENSO 处于不同位相对应的夏季 Niño 3.4 指数: (a) El Niño 年; (b) La Niña 年; (c) 中性年。单位: °C, 横坐标为挑选对应个例的年份, 下同

Fig. 14 The summer Niño 3.4 index corresponding to different previous winter ENSO phases: (a) El Niño; (b) La Niña; (c) neutral

ENSO 位相为正常时 (图 15c), IOBW 指数位于 0 附近波动, 模式的回报在一定程度上反映了该指数

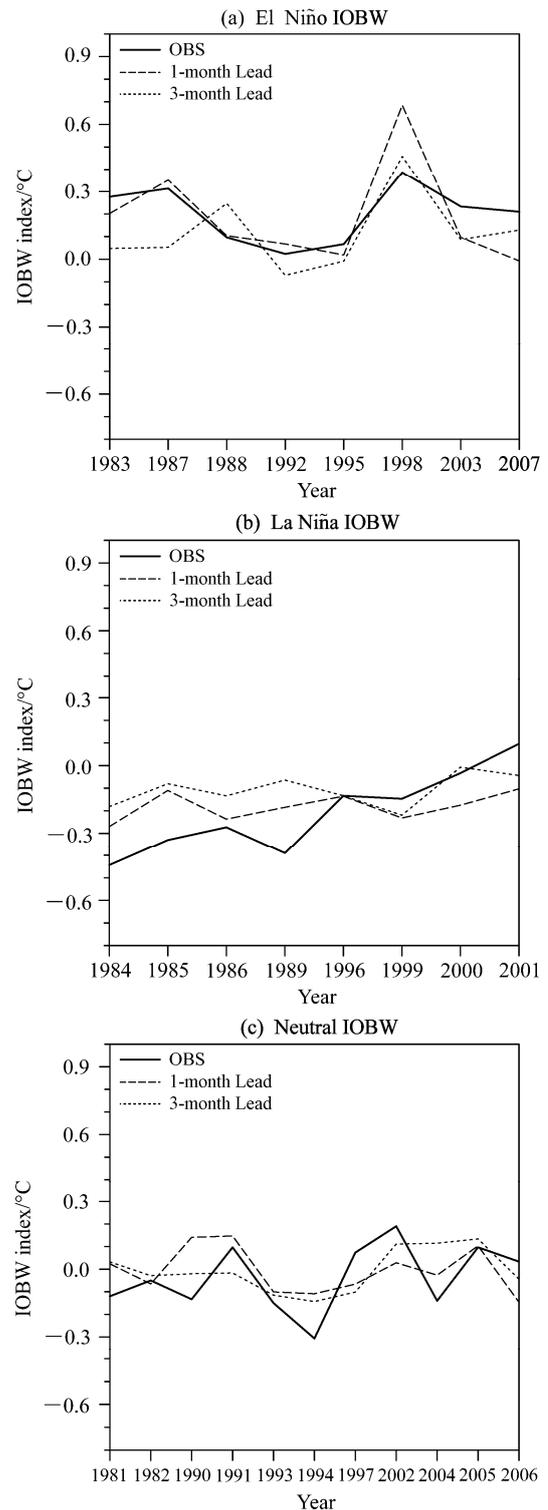


图 15 前冬 ENSO 处于不同位相对应的夏季 IOBW 指数: (a) El Niño 年; (b) La Niña 年; (c) 中性年。单位: °C

Fig. 15 The summer IOBW index corresponding to different previous winter ENSO phases: (a) El Niño; (b) La Niña; (c) neutral

对于 ENSO 滞后响应这一特点, 其中前冬位于 La Niña 位相时 (图 15b), 观测的 IOBW 指数逐渐由

负位相向正位相变化的趋势, 而模式未能反映出指数的这个变化特点。超前 1 个月预测时间与观测的差值依次为 -0.11、0.13 和 0.12; 超前 3 个月预测时间的差值依次为 -0.14、0.15 和 0.11, 表明前冬 ENSO 位相为 El Niño 时, 模式超前 1 个月的预测对于 IOBW 指数的回报与观测更为接近, 且回报的指数总体偏低; 正常位相时预测技巧次之, La Niña 位相预测技巧再次之, 且这两种位相回报的指数总体偏高。模式超前 3 个月的预测情形有所不同, 模式在前冬位于正常位相时更具有预测技巧。

如图 16a-c 所示, 在前冬 ENSO 位相下的 NAT 指数的变率较小, 而位于正常位相时变率较大。超前 1 个月时间的预测与观测的差值依次为 0.48、0.49 和 -0.63; 超前 3 个月时间预测的差值依次为 0.63、0.37 和 -0.62。表明前冬 ENSO 位相为 El Niño 时, 模式超前 1 个月的预测对于 NAT 指数的回报与观测更为接近, La Niña 位相时次之, 正常位相预测技巧再次之, 且正常位相回报的指数总体偏低。模式超前 3 个月的预测情形也有所不同, 模式在前冬位于 La Niña 位相时更具有预测技巧, 且预测技巧高于超前 1 个月的预测。

### 5 结论与讨论

本文评估了国家气候中心 BCC\_CSM 模式对夏季关键区海温的预测能力。首先对模式回报的夏季海温的气候态及年际变化等特征进行了整体分析; 其次, 对关键区海温进行了 EOF 分析, 旨在了解模式对于夏季关键区海温的年际变率模式及其年际变化特征的刻画能力; 再次, 对关键区海温的代表性年际变化指数进行了分析, 以此来了解模式对于关键区海温的年际变率的预测能力; 最后, 分析了前冬的 ENSO 位相对于模式预测夏季海温的影响, 用来分析模式的预测技巧与前期外强迫的联系。结果表明:

(1) BCC\_CSM 的回报结果基本再现了全球夏季中低纬度海温的气候分布特征, 但也存在一定的偏差, 低纬地区如赤道太平洋的冷舌、暖池区, 中纬地区误差较大的地区为 KOE 区、大西洋中纬度地区等; 从不同超前时间来看, 模式预测技巧在超前 1 个月预测的气候态特征更接近实际观测;

(2) 从方差分析与相关分析来看, 模式在南半球的海温预测技巧较低, 预测技巧较高的区域主要分布在赤道附近, 且随着超前预测时间的增长, 低

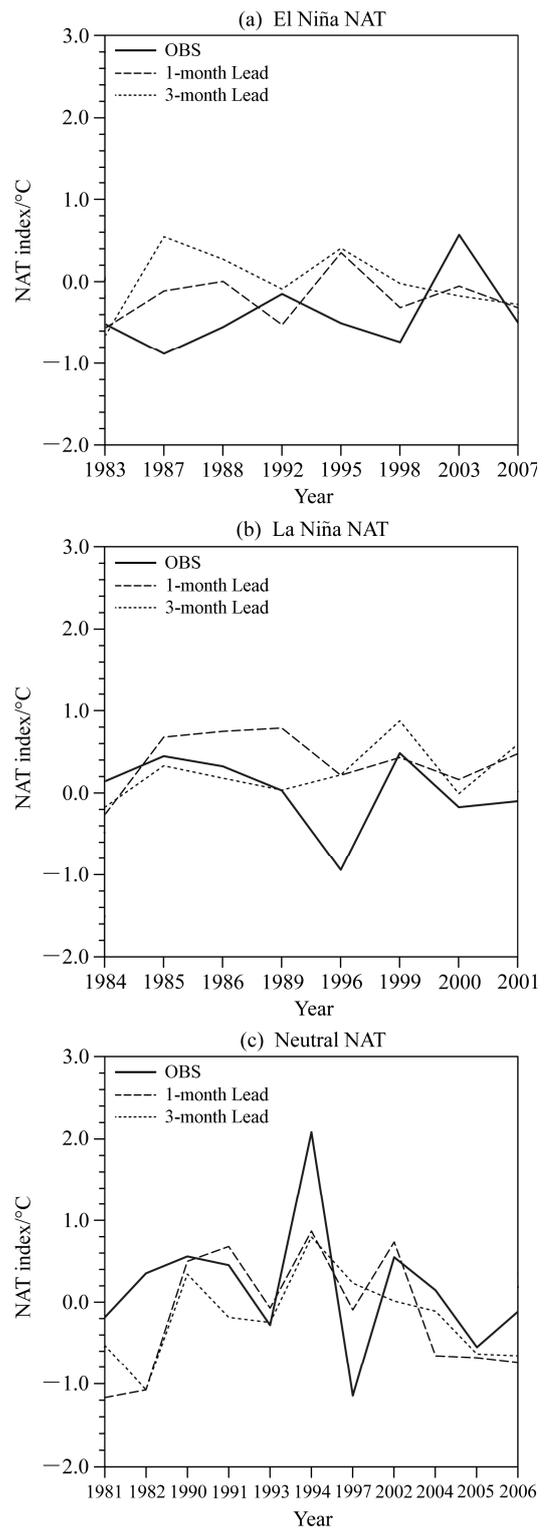


图 16 前冬 ENSO 处于不同位相对应的夏季 NAT 指数: (a) El Niño 年; (b) La Niña 年; (c) 中性年。单位: °C

Fig. 16 The summer NAT index corresponding to different previous winter ENSO phases: (a) El Niño; (b) La Niña; (c) neutral

纬地区的可预测性有所增强, 但绝大部分地区的预测技巧都有所降低;

(3) 通过分析 BCC\_CSM 对夏季回报关键海区海温的 EOF 分析可知, 模式对于北太平洋、热带印度洋、北大西洋的夏季海温前三个模态的空间分布型及其时间系数的演变均具有一定的预测技巧, 北太平洋区域技巧最高。海温不同模态的预测技巧来自于不同的超前时间的海温异常, 导致了不同模态的预测技巧的差异;

(4) BCC\_CSM 对夏季 Niño 3.4 指数、IOBW 指数和 NAT 指数均具有一定的预测技巧, 其中对超前 1 个月预测的 Niño 3.4 指数的预测技巧最高, 但在超前 3 个月的预测中技巧有所下降; 对 IOBW 指数也表现出一定的预测技巧; 而对 NAT 指数的技巧稍逊一筹, 尤其是在超前 3 个月的预测中, 模式几乎表现的技巧很低;

(5) 前冬 ENSO 位于不同位相时, BCC\_CSM 对夏季海温预测技巧的特征有所不同, 前冬位于 ENSO 位相时模式对于三大洋夏季海温的预测技巧高于前冬位于正常位相, 前冬处于 El Niño 位相与 La Niña 位相时模式的预测除在南太平洋等少数地区有些许差异外基本一致;

(6) NAT 指数在前冬位于 La Niña 位相时, BCC\_CSM 模式在超前 3 个月的预测表现出最高的预测技巧; Niño 3.4 指数与 IOBW 指数在前冬不同 ENSO 位相下, 该模式的预测技巧差别不大。

国家气候中心在研发 BCC\_CSM 模式的过程中, 针对东亚区域的地形和气候特点, 对提高和改进模式对东亚区域气候的模拟能力进行了大量的工作 (吴统文等, 2013), 对模式的物理参数化方案进行了调整 (Zhang and Mu, 2005; 颜宏, 1987; Wu and Wu, 2004), 大量的试验表明, 该模式对东亚气候具有一定的预测能力, 且改进和发展了一新的积云对流参数化方案 (Wu et al., 2010), 通过 AMIP 试验的初步检验评估, 表明改进了 BCC\_AGCM 对印度和孟加拉湾地区夏季季风降水的模拟能力。通过本文对 BCC\_CSM 模式对于夏季关键区海温的预测技巧进行了初步评估, 进一步发现 BCC\_CSM 模式对于夏季关键区海温的主要特征同样具有较好的预测能力, 能为我国的汛期预测工作提供参考。同时 BCC\_CSM 模式还是存在一定的不足, 如模式中各子系统的研发工作同时进行, 导致资料同化和预测模式子系统的衔接不够完善; 且 NCEP、TCC (Tokyo Climate Center) 等预测中心使用的大气模式在水平分辨率上相差不大, 但大气和

海洋垂直分辨率与国际上主流业务机构相比还是略有差距 (吴统文等, 2013)。通过本文的评估工作, 加深了对海温的预测能力的认识, 而对于该模式对造成这些关键区域海温的预测技巧差异的原因还待有进一步的研究。同时, 由于模式存在系统性误差, 下一步工作还将结合误差特征研发动力统计预测方法来提高该模式预测水平。

## 参考文献 (References)

- Alexander M A, Bladé I, Newman M, et al. 2002. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans [J]. *J. Climate*, 15 (16): 2205–2231.
- Bader D, Covey C, Gutkowski W, et al. 2008. *Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations*. U. S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product 3.1 [R]. Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, 124pp.
- Bjerkness J. 1966. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature [J]. *Tellus*, 18 (4): 820–829.
- Bjerkness J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 97 (3): 163–172.
- Chambers D P, Tapley B D, Stewart R H. 1999. Anomalous warming in the Indian Ocean coincident with El Niño [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (C2): 3035–3047.
- Chang C P, Zhang Y, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge [J]. *J. Climate*, 13 (24): 4310–4325.
- Chen Haoming, Yu Rucong, Li Jian, et al. 2012. The coherent interdecadal changes of East Asia climate in mid-summer simulated by BCC\_AGCM 2.0.1 [J]. *Climate Dyn.*, 39 (1): 155–163.
- 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.
- 董敏, 叶正青. 2005. 国家气候中心大气模式的验证研究——AMIP-II 结果分析 [J]. *应用气象学报*, 16 (S1): 22–29.
- Dong Min, Ye Zhengqing. 2005. A verification study of national climate center's AGCM-AMIP-II result analysis [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 16 (S1): 22–29.
- 董敏, 吴统文, 王在志, 等. 2009. 北京气候中心大气环流模式对季节内振荡的模拟 [J]. *气象学报*, 67 (6): 912–922.
- Dong Min, Wu Tongwen, Wang Zaizhi, et al. 2009. Simulations of the tropical intraseasonal oscillation by the atmospheric general circulation model of the Beijing Climate Center [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (6): 912–922.
- 董敏, 吴统文, 王在志, 等. 2013. BCC\_CSM1.0 模式对 20 世纪降水及其变率的模拟 [J]. *应用气象学报*, 24 (1): 1–11.
- Dong Min, Wu Tongwen, Wang Zaizhi, et al. 2013. Simulation of the precipitation and its variation during the 20th century using the BCC climate model (BCC\_CSM1.0) [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 24 (1):

- 1–11.
- Guan Z Y, Yamagata T. 2003. The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (10): 1541–1544.
- 郭准, 吴春强, 周天军, 等. 2011. LASG/IAP 和 BCC 大气环流模式模拟的云辐射强迫之比较 [J]. *大气科学*, 35 (4): 739–752. Guo Zhun, Wu Chunqiang, Zhou Tianjun, et al. 2011. A comparison of cloud radiative forcings simulated by LASG/IAP and BCC atmospheric general circulation models [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 35 (4): 739–752.
- 龚道溢, 王绍武. 1999. ENSO 对中国四季降水的影响 [J]. *自然灾害学报*, 7 (4): 44–52. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 1999. Impact of ENSO on the seasonal rainfall in China [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 7 (4): 44–52.
- 颀卫华, 吴统文. 2010. 全球大气环流模式 BCC\_AGCM2.0.1 对 1998 年夏季江淮流域强降水过程的回报试验研究 [J]. *大气科学*, 34 (5): 962–978. Jie Weihua, Wu Tongwen. 2010. Hindcast for the 1998 summer heavy precipitation in the Yangtze and Huaihe River valley using BCC\_AGCM 2.0.1 model [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 34 (5): 962–978.
- 金祖辉, 陶诗言. 1999. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究 [J]. *大气科学*, 23 (6): 663–672. Jin Zuhui, Tao Shiyan. 1999. A study on the relationships between ENSO cycle and rainfalls during summer and winter in eastern China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 23 (6): 663–672.
- Kelly K A, Small R J, Samelson R, et al. 2010. Western boundary currents and frontal air–sea interaction: Gulf Stream and Kuroshio Extension [J]. *J. Climate*, 23 (21): 5644–5667.
- Klein S A, Soden B J, Lau N C. 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge [J]. *J. Climate*, 12 (4): 917–932.
- Kumar V, Krishnamurti T N. 2012. Improved seasonal precipitation forecasts for the Asian monsoon using 16 atmosphere–ocean coupled models. Part I: Climatology [J]. *J. Climate*, 25 (1): 39–64.
- Krishnamurti T N, Kumar V. 2012. Improved seasonal precipitation forecasts for the Asian monsoon using 16 atmosphere–ocean coupled models. Part II: Anomaly [J]. *J. Climate*, 25 (1): 65–88.
- Kwon Y O, Alexander M A, Bond N A, et al. 2010. Role of the Gulf Stream and Kuroshio–Oyashio systems in large-scale atmosphere–ocean interaction: A review [J]. *J. Climate*, 23 (12): 3249–3281.
- Latif M, Barnett T P. 1995. Interactions of the tropical oceans [J]. *J. Climate*, 8 (4): 952–964.
- Latif M, Sperber K, Arblaster J, et al. 2001. ENSIP: The El Niño simulation intercomparison project [J]. *Climate Dyn.*, 18 (3–4): 255–276.
- Lau N C, Nath M J. 1994. A modeling study of the relative roles of tropical and extratropical SST anomalies in the variability of the global atmosphere–ocean system [J]. *J. Climate*, 7 (8): 1184–1207.
- Lau N C, Nath M J. 2000. Impact of ENSO on the variability of the Asian–Australian monsoons as simulated in GCM experiments [J]. *J. Climate*, 13 (24): 4287–4309.
- 李建, 周天军, 宇如聪. 2007. 利用大气环流模式模拟北大西洋海温异常强迫响应 [J]. *大气科学*, 31 (4): 561–570, doi:10.3878/j.issn.1006.9895.2007.04.01. Li Jian, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2007. Atmospheric response to the North Atlantic SST anomalies in CAM2 [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 31 (4): 561–570.
- Lin J L. 2007. The double-ITCZ problem in IPCC AR4 coupled GCMs: Ocean–atmosphere feedback analysis [J]. *J. Climate*, 20 (18): 4497–4525.
- Lu R, Dong B. 2005. Impact of Atlantic sea surface temperature anomalies on the summer climate in the western North Pacific during 1997–1998 [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D16102, doi:10.1029/2004JD005676.
- Marshall J, Kushnir Y, Battisti D, et al. 2001. North Atlantic climate variability: Phenomena, impacts and mechanisms [J]. *Inter. J. Climatol.*, 21 (15): 1863–1898.
- Mechoso C R, Robertson A W, Barth N, et al. 1995. The seasonal cycle over the tropical Pacific in coupled ocean–atmosphere general circulation models [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (9): 2825–2838.
- Meyers G. 1996. Variation of Indonesian throughflow and El Niño/Southern Oscillation [J]. *J. Geophys. Res.*, 101(C5): 12255–12263.
- Murray R J. 1996. Explicit generation of orthogonal grids for ocean models [J]. *J. Comput. Phys.*, 126 (2): 251–273.
- NRC/NAS. 2010. Assessment of Intraseasonal to Interannual Climate Prediction and Predictability [M]. Washington D C: The National Academies Press.
- Nigam S, Shen H S. 1993. Structure of oceanic and atmospheric low-frequency variability over the tropical Pacific and Indian Oceans. Part I: COADS observations [J]. *J. Climate*, 6 (4): 657–676.
- Palmer T N, Sun Z B. 1985. A modelling and observational study of the relationship between sea surface temperature in the North-West Atlantic and the atmospheric general circulation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 111 (470): 947–975.
- Palmer T N, Hagedorn R. 2006. Predictability of Weather and Climate [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Saha S, Shrinivas M, Pan H L, et al. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91 (8): 1015–1057.
- Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al. 2014. The NCEP climate forecast system version 2 [J]. *J. Climate*, 27 (6): 2185–2208.
- 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.
- Stockdale T, Anderson D L T, Davey M, et al. 1993. Intercomparison of tropical ocean GCMs. World Climate Research Programme [R]. Report No.79 (WMO/TD-No. 545), World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Stockdale T N, Alves O, Boer G, et al. 2010. Understanding and predicting seasonal-to-interannual climate variability—The producer perspective [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 1: 55–80.
- Sun Y, Ding Y H. 2009. A projection of future changes in summer precipitation and monsoon in East Asia [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 53 (2): 284–300.
- Toure Y M, White W B. 1995. ENSO signals in global upper ocean temperature [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 25 (6): 1317–1332.
- Vitart F. 2004. Monthly forecasting at ECMWF [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (12): 2761–2779.
- 王璐, 周天军, 吴统文, 等. 2009. BCC 大气环流模式对亚澳季风年际变率主导模态的模拟 [J]. *气象学报*, 67 (6): 973–982. Wang Lu, Zhou

- Tianjun, Wu Tongwen, et al. 2009. Simulation of the leading mode of Asian–Australian monsoon interannual variability with the Beijing Climate Center atmospheric general circulation model [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (6): 973–982.
- Wang Bin, Ding Qinghua, Fu Xiouhua, et al. 2005. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L 5711, doi:10.1029/2005GL022734.
- 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 Dyn.*, 33 (1): 93–117.
- 吴国雄, 孟文. 1998. 赤道印度洋—太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件. I. 资料分析 [J]. *大气科学*, 2 2(4): 470–480. Wu Guoxiong, Meng Wen. 1998. Gearing between the Indo-monsoon circulation and the Pacific–Walker circulation and the ENSO. Part I: Data analyses [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 22 (4): 470–480.
- Wu Z W, Wang B, Li J P, et al. 2009. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D18120, doi:10.1029/2009JD011733.
- Wu B, Zhou T J, Li T M. 2009. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate [J]. *J. Climate*, 22 (11): 1992–3005.
- Wu Tongwen, Li Weiping, Ji Jinjun, et al. 2013. Global carbon budgets simulated by the Beijing Climate Center Climate System Model for the last century [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118 (10): 4326–4347.
- Wu T W, Wu G X. 2004. An empirical formula to compute snow cover fraction in GCMs [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21 (4): 529–535.
- Wu T W, Yu R C, Zhang F. 2008. A modified dynamic framework for the atmospheric spectral model and its application [J]. *J. Atmos. Sci.*, 65 (7): 2235–2253.
- Wu T W, Yu R C, Zhang F, et al. 2010. The Beijing Climate Center atmospheric general circulation model: Description and its performance for the present-day climate [J]. *Climate Dyn.*, 34 (1): 123–147.
- Wu T W. 2012. A mass-flux cumulus parameterization scheme for large-scale models: Description and test with observations [J]. *Climate Dyn.*, 38 (3–4): 725–744.
- 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]. *J. Appl. Meteor. Sci.*, 24 (5): 533–543.
- 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 Tongwen, Song Lianchun, Li Weiping, et al. 2014. Overview on progress in Beijing Climate Center Climate System Model—Its development and application to climate change studies [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72 (1): 12–29.
- 晏红明, 肖子牛. 2000. 印度洋海温异常对亚洲季风区天气气候影响的数值模拟研究 [J]. *热带气象学报*, 16 (1): 18–27. Yan Hongming, Xiao Ziniu. 2000. The numerical simulation of the Indian Ocean SSTA influence on climatic variations over Asia monsoon region [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 16 (1): 18–27.
- 颜宏. 1987. 初始方程 P- $\sigma$  混合坐标细网格嵌套模式的设计 (二)数值模式中次网格物理过程参数化 [J]. *高原气象*, 6 (增刊): 64–139. Yan H. 1987. Design of a nested fine-mesh model over the complex topography. Part 2: Parameterization of the subgrid physical processes [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 6 (Suppl.): 64–139.
- 杨修群, 谢倩, 黄士松. 1992. 大西洋海温异常对东亚夏季大气环流影响的数值试验 [J]. *气象学报*, 50 (3): 349–354. Yang Xiuqun, Xie Qian, Huang Shisong. 1992. Numerical experiments of effect of warm SST anomalies in Atlantic Ocean on the East Asian general circulation during the Northern Hemisphere summer [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 50 (3): 349–354.
- Zhang G J, Mu M Q. 2005. Effects of modification to the Zhang-McFarlane convection parameterization on the simulation of the tropical precipitation in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, Version 3 [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D09109, doi:10.1029/2004JD005617.
- 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.
- Zhang R, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 16 (2): 229–241.
- Zhou L T, Tam C Y, Zhou W, et al. 2009. Influence of South China Sea SST and the ENSO on winter rainfall over South China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27 (4): 832–844.
- Zhou T J, Wu B, Wang B. 2009. How well do atmospheric general circulation models capture the leading modes of the interannual variability of Asian–Australian monsoon? [J]. *J. Climate*, 22 (5): 1159–1173.
- Zhou W, Chan J C L. 2007. ENSO and the South China Sea summer monsoon onset [J]. *Int. J. Climatol.*, 27 (2): 157–167.
- 左金清, 李维京, 任宏利, 等. 2012. 春季北大西洋涛动与东亚夏季风年际关系的转变及其可能成因分析 [J]. *地球物理学报*, 55 (2): 384–395. Zuo Jinqing, Li Weijing, Ren Hongli, et al. 2012. Change of the relationship between spring NAO and East Asian summer monsoon and its possible mechanism [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 55 (2): 384–395.
- Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al. 2013. Impact of the North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (4): 1173–1186.