# BCC\_CSM1.1 对 10 年尺度全球及区域温度的预测研究

高峰<sup>1,2</sup>、辛晓歌<sup>2</sup>、吴统文<sup>2</sup>

1 中国气象科学研究院,北京 100081

2 气候系统模式室,国家气候中心,北京100081



近期 10-30 年时间尺度的年代际预测是第五次耦合模式国际比较计划 摘要 (CMIP5) 重要内容之一。按照 CMIP5 试验要求,国家气候中心利用气候系统 模式 BCC CSM1.1 完成并提交了年代际试验结果。本文评估了该模式年代际试 验对 10 年尺度全球及区域地表温度的预测能力,并通过与 20 世纪历史气候模 拟试验的对比分析,研究模式模拟对海洋初始观测状态的依赖程度。分析结果表 明: (1) 在有、无海洋初始化条件下,模式均能模拟出 1960-2005 年间全球 10 年平均实测地表温度的变暖趋势,但在有海洋初始化条件下,可以明显减小 BCC CSM1.1 模式模拟的全球升温趋势,使得年代际试验比历史试验的结果更 接近观测值。这一特点在观测资料相对丰富的南北纬 50°以内地区更为显著。 (2) 在年代际试验预测前期,通过 nudging 方法,利用 SODA 再分析海洋温度 资料对模式进行初始化,经过前期 8-12 月的协调后,模式预测的第1年南北纬 50°范围海洋、陆面的平均地表气温接近于观测值(CRUTEM3, HadSST2)。由 于模式初值 SODA 再分析 SST 资料与 HadSST2 观测值存在明显的全球大洋系统 暖偏差以及模式本身系统偏差的影响,年代际试验模拟的地表气温在2-7年之内, 从观测 SST 状态逐渐恢复到模式系统本身状态。在同组 Decadal 试验中,陆面和 海洋恢复调整的时间长度几乎一致。(3) 从 10 年平均气候异常在区域尺度上的 预报技巧来看,有、无海洋初始同化对预测结果影响不大,高预测技巧区主要分 布在南半球印度洋中高纬度、热带西太平洋以及热带大西洋区域。(4) SST 变化 与下垫面热通量密切相关,在热带和副热带海洋区域,长波辐射和感热通量是影 响 10 年时间尺度 SST 变化较大的物理量,在中高纬度海洋,洋面温度变化主要 受潜热通量的影响相对较大。

 关键词 模拟 气候系统模式 年代际预测 BCC\_CSM CMIP5
文章编号 中图分类号 文献标识码 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11243

**收稿日期** 2011-12-18, 2012-4-4 收修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展计划 2010CB951902, 气象行业专项 GYHY200806006, 国家自然科学基金资助项目 41105054

**作者简介** 高峰,女,1988 年出生,硕士研究生,主要从事气候预测与数值模拟。 E-mail: gf65@163.com 通讯作者 吴统文, E-mail: twwu@cma.gov.cn

# Study on the Prediction of Regional and Global Temperature in Decadal Time Scale with BCC\_CSM1.1

GAO Feng<sup>1,2</sup>, XIN Xiaoge<sup>2</sup>, WU Tongwen<sup>2</sup>

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
National Climate Center, Beijing 100081



Abstract Decadal prediction on 10-30 yr time scale is one of the most important contents of the 5th phase of the Coupled Model Inter-comparison Project (CMIP5). According to the experiment requirement of CMIP5, a set of decadal experiments were performed using the Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM1.1) which is one of models jointed in CMIP5. This study evaluated the model's prediction capability in regional and global surface temperatures on decadal time scale, and aimed to explore their dependences on the initial observed states of ocean in comparison with the historical experiment in 20th century using BCC-CSM1.1. The results show as following: (1) BCC\_CSM1.1 can simulated the warming trend of 10-year mean global surface temperature not only for oceanic initialization condition but also for without oceanic initialization condition. Nevertheless, the global warming trend simulated by BCC-CSM1.1 can be obviously decreased under the condition of oceanic initialization, which is closer to the observation than that in the historical experiment without oceanic initialization. This feature is much more remarkable in the area between 50°N and 50°S where there are of abundant observation data. (2) The nudging method is used to initialize the model with the SODA temperature data. After a "training" period of 8-12 months, predicted surface temperatures in the first year not only in ocean but also in land between 50°S and 50°N are close to CRU observations. Due to the warmer SST bias of SODA reanalysis contrast to HadSST2, there are about a period of 2 to 7 years in decadal experiments that adjust from the observed ocean state to model basic state. The adjustment time for the ocean and land are almost identical in the same decadal experiment. (3) The prediction skill for decadal-mean SST has strong feature. The high correlations with the CRU observations are mainly near the middle- and high-latitude Indian Ocean in the South Hemisphere, west Pacific Ocean and Atlantic Ocean. The oceanic initialization does not significantly influence the prediction results. (4) The variation of decadal-mean predicted SST is closely correlated with the surface heat flux. In the tropical and subtropical region, the net long wave radiation and sensible heating flux has larger influence on the decadal mean SST variation than

the net short wave radiation and the latent heating flux, but in oceans at higher latitude, the variation of decadal mean SST is mostly determined by the latent heating flux.

Key words Simulation; Climate system model; Decadal prediction; BCC\_CSM;

CMIP5

### 1 引言



在政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告 (AR4) 中,通过大量的观测事实表明,近一百年来全球平均气温增加约 0.74℃(IPCC, 2007)。气候模式在自然和人类活动外强迫下能够较好地模拟出过去这一全球变暖的主要特征(Zhou and Yu, 2006)。这为气候模式对未来气候变化的预估提供了可信性。当前气候模式能够模拟预估出未来全球长期变暖趋势,但对区域尺度气候变化的预估仍然存在非常大的不确定性(IPCC, 2007)。在 IPCC 以往的几次评估报告中,对未来气候变化的预估,主要是基于在假定的人类活动排放情景条件下海气耦合模式的预估结果,如 IPCC AR4 中的 B1, A1B, A2 等,其结果是对预测未来气候变化的重要依据。

在全球变暖的大背景下,气候系统还存在明显的年代际时间尺度变化特征。 年代际时间尺度气候变化不仅受气候系统内部自然变率和外强迫(包括太阳活 动、火山喷发、人类活动排放的温室气体、气溶胶等)的共同影响,大气、海洋 初始信息也起了重要作用。Latif et al. (2006)和 Troccoli and Palmer (2007)认为, 在年代际甚至更长时间尺度上,初始条件对区域变量和模态的预报能力的影响较 之边界条件更为重要。近年来的研究表明(Smith, 2007; Keenlyside, 2008), 仅考虑外强迫条件下,气候系统模式对未来气候变化的预估实际上夸大了对未来 气候增暖的幅度,观测初始条件的考虑有助于模式更为实际地模拟对未来年代际 时间尺度的气候变化。Smith et al. (2007)指出,考虑了大气、海洋的初始态的 年代际预测试验在印度洋、大洋洲、北美、南美和澳洲东部陆地区域的预报技巧 有所提高,通过与未初始化的历史试验比较,认为预报技巧的提升主要来自上层 海面热焓量的影响。Keenlyside et al. (2008)的研究表明,考虑了模式初始化的年 代际预测试验在北大西洋地区和热带太平洋的回报技巧较之未初始化的历史试 验有所提高,并能够改善模式对北太平洋年代际振荡(PDO)的模拟,对未来 10-30 年气候变化的预估也更为可信。Pohlmann (2008)用观测海温的异常信息 初始化的模式模拟结果表明,区域上北大西洋海表温度的预报技巧有提升,全球 尺度上预报技巧稍高于未有海洋初始化的模拟结果,并指出对于年代际预测,边 值和初值问题同样重要。Branstator (2010)的研究则强调,10-30年的模式预报能 力提高有赖于对未来边界条件的准确预估,而非对海洋初始状态的准确估计,同 时指出次表层海温较之海表温度具有更高的可预报性。

第五次耦合模式国际比较计划(CMIP5)是提供 IPCC 第五次评估报告(AR5) 撰写的重要科学依据。该计划在关注历史气候模拟和对未来百年不同情景下气候 变化预估的同时,还增加了大量针对近期 10-30 年时间尺度气候的预测(Taylor, 2011),即年代际气候预测试验(简称 Decadal 试验),其目的是研究未来气候 状态对初始气候条件的依赖程度,侧重于研究在观测的海洋状态起始条件下,能 否更准确的预测未来气候。

国家气候中心研发的多圈层耦合气候系统模式 BCC\_CSM1.1 版本参与了 CMIP5 耦合模式比较计划,按CMIP5 计划要求已完成了大量数值模拟试验,其 中包含 10年时间尺度年代际回报试验和未来 10年的预测试验,已上传至 PCMDI 网站(http://pcmdi3.llnl.gov/esgcet/)可供下载。本文研究的主要目的是评估 BCC-CSM1.1 的年代际预测试验对 10年尺度全球及区域地表温度的预测能力, 并与 20 世纪历史气候模拟试验(简称 Historical 试验)的对比分析,研究有、 无海洋初始化条件下对全球和不同区域平均温度的模拟能力。

### 2 模式简介、方案设计及观测数据使用

### 2.1 BCC\_CSM1.1 模式简介

本研究所用的气候系统模式是由北京气候中心研发的气候系统模式 BCC\_CSM1.1。该模式是一个全球海洋-陆地-海冰-大气多圈层耦合的全球气候-碳循环耦合模式,以美国大气研究中心(NCAR)气候系统模式 CCSM2 的通量 耦合器为基础,把北京气候中心研发的全球大气环流模式 BCC\_AGCM2.1 和陆 面过程模式 BCC\_AVIM1.0,与基于美国地球流体动力学实验室(GFDL)的 MOM4研发的全球海洋环流模式 MOM4\_L40 和全球动力热力学海冰模式 SIS 实 现全动态的耦合,并加入碳循环模块,能够模拟人类活动碳排放引起大气 CO2 浓度变化和全球气候的影响,可满足 IPCC AR5 的模拟试验要求,详见 Wu et al. (2011)。大气模式 BCC\_AGCM2.1 是一个全球谱模式,水平分辨率为 T42 波谱截 断(全球分辨率近似 2.8125°纬度×2.8125°经度),垂直分为 26 层。模式动力框 架和物理过程介绍以及模式基本性能评估可参见相关参考文献(颉卫华和吴统文, 2009;董敏等,2009;王璐等,2009;Wu et al.,2008 and 2010;Wu,2011;Cheng et al.,2011;郭准等,2011)。陆面模式分量 BCC\_AVIM1.0 是一个大气植被相互 作用模式,在 NCAR 陆面模式 CLM3 物理模块的基础上,引入了国内发展的动 态植被和土壤碳循环模型 AVIM2 (Ji et al, 1995,2008),该模式可以描述植被光合 作用固定 CO2、植被生长、植被凋落物进入土壤并通过土壤呼吸释放 CO2 返回 大气的陆地碳循环过程。海洋分量模式 MOM4\_L40 水平分辨率是 1°×1°,经向在 热带地区加密到 1/3°,垂直 40 层。海冰分量模式 SIS 包括弹性-粘性-塑性流变学 动力学过程和 Semtner 型热力学过程,垂直方向分为 3 层,包括 1 层积雪和 2 层 海冰,其中 2 层海冰的厚度相同,模式的水平分辨率与 MOM\_L40 相同。

#### 2.2 试验方案设计

在开展 Decadal 预测试验之前, 按照 CMIP5 的要求, 首先完成了 500 年的 工业前控制试验 (CMIP5 简称 piControl),所有外强迫场稳定在 1850 年的水平; 然后以此为初值条件,完成从 1850 年到 2005 年的历史气候模拟试验,并延长至 2012 年 (CMIP5 简称 Historical 试验)。Historical 试验中在 1850~2005 年间随 时间变化的外强迫场包括太阳活动、温室气体、气溶胶、火山活动和臭氧, 2005 年以后为 RCP4.5 (典型浓度路径到 2100 年稳定在 4.5W/m2)的温室气体情景, 强迫数据均采用 CMIP5 建议的统一资料。

按照 CMIP5 试验的要求, Decadal 试验在 1960 年到 2005 年间, 每隔 5 年进 行一组 10 年的预测试验, 示意图见图 1。在开展这组 Decadal 试验之前, 还开展 了一个长期恢复试验, 初始场选取 Historical 试验 1958 年 1 月 1 日, 利用 Simple Ocean Data Assimilation (SODA)全球月平均海洋各层温度再分析资料(Carton and Giese, 2005, 2008), 通过 Nudging 方法, 把 50°N-50°S 范围内的模式 3000m 深度海温预报值逐渐调整到 SODA 再分析场, 恢复时间设定为 1 天。从 1958 年 运行至 2005 年。自 1960 年开始, 每隔 5 年的 Decadal 试验的初始场均是来自该 长期恢复试验的输出。这意味着自 1958 年至 Decadal 试验它行起始年份期间, 模式已经通过恢复方法使气候模式状态向观测海洋状态进行调整。每组 decadal 试验完成了 4 个不同的初值样本,分别从每一组试验的第 1 年(即 1960, 1965, …,

5

2005年起)的1月1日开始积分,通过同样的恢复方法,分别运行至当年的8月31日、10月31日、11月30日、12月31日。这一时段可认为是大气、陆面、海冰各模式分量向观测海洋温度适应的过程。之后正式进行预测模拟,也即分别从1960年,1965年,…,2005年的9月1日、11月1日、12月1日和次年1月1日积分到1970年,1975年,…,2015年12月31日。模式的外强迫场与Historical 试验一致。



每组4个 Decadal 预测试验集合样本的起报时间不同,旨在估计不同的初始 条件所引起的不确定性影响。为了分析不同初值对20世纪历史气候模拟的影响, 按 CMIP5 要求同时还完成了在另外2个不同初值(从 piControl 试验中选取)条 件下的同时段 Historical 模拟试验样本。

### 2.3 资料及分析方法

本文将利用 1958-2005 年 SODA 2.0.2/2.0.4 全球月平均海洋各层温度再分析 资料,应用于模式初初始化和评估模式预测对海温初值的响应。资料水平分辨率 为 0.4°经度×0.25°纬度,垂直分层 40 层,上层 100米的分辨率为 10米 (Carton and Giese, 2005, 2008)。为了便于气候系统模式的模拟和预测试验的分析评估, 本文还应用了如下观测资料: (1) HadSST2 器测全球月平均海表温度距平序列 (Rainer et al, 2006); (2)CRUTEM3 器测全球月平均陆面气温距平序列(Brohan et al, 2006); (3) HadCRUT3 器测全球月平均地表温度的距平序列(Brohan et al, 2006); (3) HadCRUT3 器测全球月平均地表温度的距平序列(Brohan et al, 2006) 是 HadSST2 和 HadCRUTEM3 两种资料综合的结果。以上三种资料都来 自英国 CRU (Climate Research Unit),文中简称 CRU 资料。本文中所分析的资 料时间长度均为 1961 年 1 月~2010 年 12 月,资料的水平分辨率为 5°经度×5 °纬度。将以上所有观测资料均用双线性插值方法插值到全球 2.8125°x2.18125° 水平分辨率的 BCC\_CSM1.1 模式对应格点。

本文主要分析每组 Decadal 试验预测的 10 年平均值, 例如 1965 年的值为

1961 起报的试验所预测的 1961-1970 年的 10 年平均,从 1961 年到 2006 年,每间隔 5 年一组,(1961,1966,1971,…,2006)共 10 组,每组试验有三个样本,对应 10 组试验的 10 年平均集合平均值。

## 3 模拟和预测结果分析



### 3.1 全球 10 年平均温度变化趋势预测

为检验模式在 10 年时间尺度上的预测能力,图 2a 给出了 BCC\_CSM1.1 模式 Decadal 试验、Historical 试验以及 HadCRUT3 观测的全球平均的 10 年平均地表温度。曲线上每个点代表每组试验预测的 10 年平均值。由图可见,两类试验模拟的温度均高于 CRU 观测值,其中 Historical 试验高出观测值 0.6℃左右,Decadal 预测试验与观测值更为接近,尤其是自 1965 年、1990 年、1995 年和 2005年起报的 10 年平均预测误差均在 0.4℃以内。

从两类试验分别相对于自身的平均异常变化来看(图 2b), Decadal 试验和 Historical 试验均能较理想地模拟出与观测一致的地表温度增暖趋势。但历史试 验的全球地表气温上升幅度显著高于 Decadal 试验。尽管 Historical 试验与观测 的相关系数达到 0.98, 略高于 Decadal 试验,但后者预测的全球温度上升趋势明 显更接近于 CRU 观测值。值得注意的是,图中 2010 年的偏差与 CRU 观测值对 应的仅是 2006-2010 年的平均值,但模式 Historical 和 Decadal 预测值对应的是 2006-2015 年的平均,模式在 2010-2015 年时间段内仍继续升温,这必然导致预 测值明显比观测值偏高的现象。

图 2. 年代际试验(红色线)、历史试验(蓝色线)和 CRU 观测值(黑色线)的十年平均全 球地表温度(a)及相对于所分析时段的异常(b),单位: °C。每个点上的上下变化分别指 示每组试验中样本的最大值、最小值。括号中的数值表示试验结果与 CRU 观测值的相关系 数。

Fig.2 (a) The 10-year means of globally-averaged surface air temperature in decadal prediction experiment (red line), historical experiment (blue line) and CRU observations (black line) and (b)

their anomalies with contrast to themselves climatology means. The units: °C.

BCC\_CSM1.1 模拟值相对 CRU 观测值偏高的现象与 CRU 资料在高纬度和 极区资料稀少有密切的关系。高纬度地区受海冰影响大部分地区观测资料缺乏 (Brohan et al, 2006), CRU 观测资料在南半球高纬度地区几乎没有资料,此外

在北半球西西伯利亚平原、东西伯利亚高原以及格陵兰岛一带也存在观测资料缺乏的情况(图8)。我们也注意到,尽管对CRU资料插值到和模式结果保持同一分辨率,由于没有对模式结果做类似CRU资料的缺测处理,可能也会对结果产生一定的影响。

南北纬 50°之间的中、低纬度地区观测资料相对较多,观测资料可信度也 相对较高。从图 3a 所示的南北纬 50°范围内全部格点平均的地表温度演变序列 可以看到,尽管 Historical 试验与 CRU 观测的相关系数仍略高于 Decadal 试验, 但 Decadal 试验与 CRU 观测的相关系数略高于全球平均的结果,且在数值上仍 然比 Historical 试验更接近 CRU 观测。在南北纬 50°海洋(图 3c),每一 Decadal 预测试验的 10 年预测平均值较 Historical 试验更接近于 CRU 资料。另一方面, Historical 试验模拟的 10 年平均温度的升温趋势明显高于观测,也高于 Decadal 试验。比较南北纬 50°陆面格点平均的结果,见图 3b,可以看出 20 世纪 Historical 试验和 Decadal 预测试验之间差异较小,均低于 CRU 观测值,与海洋平均(图 3c)类似,都表现出 Historical 试验模拟的 10 年平均温度的变暖趋势明显高于观 测和 Decadal 试验。

从南北纬 50°范围海洋格点平均来看(图 3c), Decadal 试验中海洋初值的 产生是基于 SODA 海洋各层的海温再分析资料,但 SODA 海表温度与 CRU 洋面 SST 存在 1℃左右的暖偏差。对比两种不同资料 1960-2010 年平均的空间分布及 两者之间的偏差可以清楚地看出(图 4),在南北半球高纬度地区,SODA 资料 明显高于 CRU 资料,考虑到这一问题,在设计 Decadal 试验时,BCC\_CSM1.1 海温初值协调的 nudging 过程未使用南北 50°以外的 SODA 再分析海洋的温度 场。在南北 50°范围,SODA 海表温度平均比 CRU 高出 1℃以上。

图 3. Decadal 试验、Historical 试验和观测(SODA、CRU)中的南北纬 50°内所有格点 10 年 平均(a),陆面平均(b)和海洋平均(c)地表温度。单位: °C Fig. 3. The same as Fig. 2a but for the mean averaged for (a) the whole area, (b) land region, and (c) ocean region between 50°N and 50°S. The orange line in (c) indicates the SODA SST observations.

图 4. 1960-2010 年平均的 SODA (a) 和 CRU (b) 年平均海表温度 (SST) 的空间分 布及两者之间的偏差 (c, SODA-CRU), 单位: ℃ Fig. 4. Annual mean SST climatology of (a) SODA, (b) CRU, and (c) their difference (SODA-CRU). The units: °C.

### 3.2 海洋初值的影响

Decadal 试验初值依赖于 SODA 再分析海洋温度的状态,从图 5a 所示的 10 组 Decadal 试验预测的南北纬 50°范围格点平均的第 1 年年平均海表温度与 SODA 比较,可以清楚地看到通过 Nudging 方法产生的海温初值对模式预测的影响,第 1 年的 SST 预测结果非常接近于 SODA 观测资料,这表明 8-12 个月的 Nudging 同化过程是有效的。由于在预测前期有较长一段时间的初值协调,受 SODA 观测海温的影响,所预测的第 1 年南北纬 50°范围陆面格点平均气温也 接近于 CRU 观测值 (图 5b),这也从侧面说明了通过 Nudging 方法把模式海温 逐渐向观测状态恢复是有效的,即便是在没有陆面同化过程的情况下,通过一段 时间的多圈层协调,也能影响到陆面过程的模拟。

图 5. Decadal 试验(红色线)、Historical 试验(蓝色线)和观测(CRU,黑色线)中第一 年年平均地表温度:(a)的南北纬 50°内所有格点 10年平均南北纬 50°内所有海洋格点平 均;(b)南北纬 50°内所有陆面格点平均。

Fig.5 The same as Fig. 3c but for annual mean of the predicted surface temperature at the first

year for (a) ocean and (b) land regions between 50°N and 50°S.

SODA与CRU的系统性偏差直接影响到10年尺度逐年预测结果。图6给出 了每组 Decadal 试验所预测的南北纬50°范围内海洋、陆面格点平均的逐年年平 均结果,每组试验均有4个样本,可以看到,10组试验均在起报之初,在南北 纬50°范围内的海洋(a),陆地(b)上,均经历了温度下降的过程,这表明 BCC\_CSM1.1 模式观测初始化的状态逐渐恢复到模式系统本身的状态,这一恢 复调整时间约为2-7年。在同一组预测试验中,陆面和海洋恢复调整的时间长短 几乎一致。其中从1960年、1980年、1985年起报预测试验的调整期相对较短, 从1965年、1995年、2000年、2005年起报的预测试验调整期相对较长。

图 7 给出的 10 组 Decadal 试验的平均情况,在南北纬 50°范围内,预测的 逐月月平均 SST 相对于 SODA 数据在预测的前 24 个月期间,存在明显的冷偏差,并随着时间呈逐渐增加的趋势,之后模式调整到一个相对稳定的状态,两者之间

的偏差基本上维持在-0.40~-0.6℃,这反映了模式气候态相对于 SODA 观测气候态仍存在平均 -0.5℃的系统偏差。这一系统偏差,还存在较小的年周期变化。对比 20 世纪历史试验结果可以看出,在同一时段,Historical 试验所模拟的 SST 较 SODA 再分析资料仍然存在约-0.2℃的系统偏差。这也进一步说明了模式对 SST 模拟的偏冷系统偏差的存在。

相对于给出 CRU 海温资料,不管是 Decadal 预测试验还是 Historical 试验, 所预测或模拟的 10 年平均 SST 明显较 CRU 资料偏暖,且存在更强的年周期变 化特征(图 7b)。这表明了不同观测资料之间的较大差异和较大的不确定性问题。

结合图 7a, b 来看, 对 Decadal 试验和 Historical 试验的逐月 SST 变化与同期 SODA、CRU 资料均进行 12 个月的滑动平均,可以看到,模拟与观测值的偏差 还存在准 5 年(近 60 个月)的变化。这可能与 SODA 或 CRU 资料在南北 50° 之间的平均温度存在准 5 年周期变化,或与 Decadal 预测试验选取每 5 年时间间 隔有关。关于这一现象,仍有待于深入研究。

在南北 30°之间的热带地区,也存在自起报之日起 SST 降温并逐渐向模式 准平衡态的调整过程(图 7c),在模式预测的最初 2 年,Decadal 试验与 SODA 资料的偏差在数值上仍略高于 Historical 试验与 SODA 之间的偏差;Decadal 试 验和 Historical 试验预测的 SST 与 CRU 资料相比较,仍明显高出 0.8-1.3℃(图 7d)。模拟和观测两者之间的偏差除年周期变化外,5 年的周期振荡较南北 50° 平均更为显著,这可能与 ENSO 事件有一定的关联。

图 7. 10 组 Decadal 试验(黑色虚线)和历史试验(蓝色虚线)模拟的南北纬 50°以内(a, b)和南北纬 30°以内(c,d)格点平均海表温度,分别相对于 SODA 和 CRU 观测值的偏差 值的逐月序列。实线为 12 点滑动平均结果

Fig. 7 The ensemble mean of 10 decadal experiments (Black doted line) and historical experiments (Blue doted line) of predicted monthly SST biases with contrast to SODA (a,c) and CRU data (b, d) averaged for the region of 50°S-50°N (a, b) and 30°S- 30°N (c, d). The solid line indicates 12 months running mean.

图 6. 10 组 Decadal 试验预测的南北纬 50°范围内海洋格点平均的逐年年平均 SST (a)和 陆面格点平均的地表温度(b),每组试验的四条彩色线分别代表 4 个样本

Fig. 6 The time series of the prediction SST averaged for (a) ocean region and (b) land region of 50°N-50°S in 10 decadal experiments. Each experiment contains 4 examples.

#### 3.3 10年平均温度预测的区域性特征

为检验模式在区域范围对 10 年平均温度的模拟能力,给出 10 组 Decadal 试 验预测的 10 年预测年平均地表气温与 HadCRUT3 观测值的相关分布 (图 8a)。 可以看出,通过 95% 信度检验(相关系数大于 0.66)的区域主要位于南北纬 60 。之间。其中,在大洋上的热带印度洋、热带西太平洋和热带大西洋,以及陆地 上的欧亚大陆南部、非洲东部、北美洲中东部区域,相关系数都通过99.9% 信度 检验(大于 0.82),这意味着这些区域的 Decadal 试验的预测技巧高于其它区域。 不过,这些区域在 Historical 试验中也达到了同样的信度检验水平(图 8b)。相 对而言, Decadal 试验与观测的相关系数在欧亚大陆西北部的里海、黑海附近区 域以及南半球的印度洋高纬区域高于 Historical 试验。但在东亚地区、北大西洋 地区和非洲以南的大西洋海域, Historical 试验与观测的相关系数达到 0.71, 通 过 99% 信度检验的区域,比 Decadal 试验大。在北大西洋高纬、北太平洋、热带 中太平洋、南太平洋和南大西洋区域, Historical 试验与观测的相关系数均小于 0.58 未通过 95% 信度检验, Decadal 试验也未能提高这些区域的预测水平。因此, 进行海洋初始化,只能提高局地区域的预测技巧,对大部分区域的改善并不明显。 Smith et al, (2010)指出,温度的预报技巧大部分是源于外强迫,这与本文结论 一致。此外他们还指出,最有可能由初始条件所带来的技巧提高的区域是北大西 洋和副热带太平洋,这在我们的模拟结果中并不明显。

10年尺度预测的区域性差异与下垫面热通量密切相关。图9给出了 Decadal 试验回报的 10年平均潜热通量、感热通量、净长波和净短波与地表气温的相关 分布。各个热通量的影响区域存在很大的不同。净长波辐射在热带地区表现出与 SST 的正相关,但在中高纬度海洋与 SST 在 10年平均尺度上表现为反位相变化; 潜热通量和太阳短波辐射的影响主要集中在中高纬海洋;感热通量的影响主要集 中在热带部分地区,表现为负相关关系。通过对比发现,在热带和副热带海洋区 域,长波辐射和感热通量是影响 10年时间尺度 SST 变化较大的物理量,SST 的 变化与净长波辐射的关系最为密切,在大部分地区二者的正相关系数超过了 0.82, 超过了 99.9%的信度检验。在南北半球的中高纬度地区,地表温度变化主要受潜 热通量的影响相对较大,大部分区域潜热通量与地表气温呈较显著的正相关关 系,相关系数超过 0.58 以上,通过了 90%的信度检验。 选取图 8 中 SST 预报技巧较高的两个区域:印度洋(10°S-15°N,50°-100 °E)和西太平洋(10°S-20°N,130°-160°E),以及预报技巧低的地区北太 平洋(20°-50°N,120°W-160°W),可进一步看出 Decadal 试验中各区域平 均的热通量与 SST 的联系。如图 10 所示,在预报技巧较高的印度洋和西太平洋 地区,在长波辐射与观测海温的标准差变化基本一致,相关系数分别达到 0.98 和 0.99,其次是感热通量,与观测海温呈明显的负相关关系,相关系数为-0.95 和-0.88(图 10a-b)。这表明 Decadal 试验在这些地区较高的模拟技巧取决于模式 能够较好地模拟出该区域的长波辐射和感热通量变化。在预报技巧较差的北太平 洋地区(图 10c),长波辐射和感热通量与 SST 的相关关系均未通过 95%信度检验, 该地区的 SST 变化更加依赖于潜热通量的变化,潜热通量与 SST 的相关系数为 0.84,因此,提高在北太平洋地区预测技巧的有效途径是改善模式对该地区潜热 通量变化的模拟能力。



图 8. (a) 10 组 Decadal 试验的 10 年平均地表气温(a) 和 Historical 试验(b) 分别与 CRU 观测值的相关分布

Fig. 8 (a) Correlation coefficients between 10-year means of predicted SST for 10 decadal experiments and CRU observations and (b) those for historical experiment and CRU observation

图 9. 10 组 Decadal 试验模拟的 10 年平均潜热通量(a) 感热通量(b) 净长波辐射(c) 和 净短波辐射(d) 与其模拟的 SST 的相关空间分布

Fig. 9 Correlation coefficients between the series of 10-year means of predicted SST for 10 decadal experiments and corresponding 10-year mean of (a) latent heating flux, (b) sensible heating flux, (c) net longwave radiation, and (d) net shortwave radiation at surface

图 10. Decadal 回报试验模拟的区域平均的潜热通量(蓝色线)、感热通量(红色线)、净长 波辐射通量(棕色线)、净短波辐射通量(橙色线)以及海表温度(黑线)的 10 年平均值的 标准差随时间的变化:(a)印度洋;(b)西太平洋;(c)北太平洋。括号值表示模拟的通量 与海温的相关系数

Fig.10 Time series of the standard deviation of the area-averaged mean of 10-year predicted SST, net shortwave radiation (orange line), sensible heating flux (red line), latent heating flux (blue line), net longwave radiation (black line) for (a) Indian ocean area, (b) Western Pacific, (c) North Pacific, are given The values in brackets denote correlations with SST

4 主要结论

本文针对 BCC-CSM1.1 参与 CMIP5 的 10 组 Decadal 试验,与 20 世纪 Historical 模拟试验的对比分析,研究了有、无海洋初始同化条件下对全球和不 同区域平均温度的模拟能力,主要结论如下:

(1) 10年时间尺度预测受大气初值的影响较小,10年平均的全球地温升温的 趋势主要决定于自然与人类活动外强迫的共同作用。从 1960-2005年每间隔 5年 一组的 10年预测的长期变化趋势来看,有、无海洋初始化条件,模式都能合理 地模拟再现 1960-2005年间全球 10年平均 CRU 实测温度的变暖趋势。

(2) 在有海洋初始化条件下,可以明显减缓 BCC\_CSM1.1 模式偏强的升温趋势,使得预测回报试验比无海温初始同化条件下更接近观测值。这一特点在观测 资料相对丰富的南北纬 50°之间的中、低纬度地区更为显著。

(3) 在 Decadal 试验中, 陆面和海洋初值状态决定于 SODA 再分析 3000m 的 各层海洋温度。通过预测前期 8-12 月的初值协调,可使得陆面状态接近于 CRU 观测值。

(4) SODA 再分析资料本身与 CRU 观测 SST 还存在较大的偏差。CRU 观测 资料在南半球高纬度地区几乎没有资料,北半球西西伯利亚平原、东西伯利亚高 原以及格陵兰岛一带也存在观测资料缺乏;除在 60°S,0-60°E 部分区域外, SODA 资料在全球范围内均高于 CRU 资料 0.5°C 以上,高纬度地区相差更大。

(5)由于模式初值 SODA 再分析海温 SST 与 CRU 观测值存在明显的全球大 洋系统暖偏差以及受到模式本身系统偏差的影响,在预测前期存在 2-7 年左右从 观测 SST 状态逐渐恢复到模式系统本身状态的过程。在同一组 Decadal 试验中, 陆面和海洋恢复调整的时间长短几乎一致;这一调整过程很大程度上依赖于模式 的基本性能。

(6) 10 年平均气候异常在区域尺度上的预报技巧来看,有、无海洋初始同化 对预测结果影响不大。Decadal 试验的高预测技巧区主要分布在印度洋中高纬度、 热带西太平洋以及热带大西洋区域。相比之下,Historical 试验与 CRU 观测资料 相关系数大的区域面积比 Decadal 试验大,表现最为显著的是北大西洋地区和非 洲以南的大西洋海域,在这些地区 Decadal 试验与观测为负相关。

(7) Decadal 试验预测的 SST 变化与下垫面热通量密切相关。在热带和副热

13

本文的 Decadal 试验方案,采用的是将模式模拟的海温本身恢复到 SODA 再 分析温度场的方法。事实上,还有另外一种试验方法是将模式模拟的海温异常场 向观测海温的异常场进行恢复,即异常场恢复方案。采用这种方法可能会对本文 中模式开始预测试验后的模拟结果产生一定的影响。这将在未来的研究中进行深 入探讨。



### 参考文献(Reference)

Brohan P., Kennedy J. J., Harris I., et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. J Geophys Res, 2006, 111: D12106

- Branstator, G., Teng H., 2010: Two Limits of Initial-Value Decadal Predictability in a CGCM[J]. J. Climate, 23, 6292–6311.
- Carton, J.A., Giese B. S., Grodsky S.A., 2005: Sea level rise and the warming of the oceans in the SODA ocean reanalysis, J. Geophys. Res., VOL. 110, C09006, 8 PP., 2005
- Carton, J. A., Giese B. S., 2008: A Reanalysis of Ocean Climate Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA), Mon. Weather Rev., 136, 2999-3017
- Chen Haoming, Yu Rucong, Li Jian, Xin Xiaoge, Wang Zaizhi, Wu Tongwen, 2011: The coherent interdecadal changes of East Asia climate in mid-summer simulated by BCC\_AGCM 2.0.1[J], Clim Dyn, DOI 10.1007/s00382-011-1154-6 (published online first).
- 董敏,吴统文,王在志,张芳,2009:北京气候中心大气环流模式对季节内震荡的模拟[J], 气象学报,67(6):912-922. Dong Min,Wu Tongwen,Wang Zaizhi,Zhang Fang. Simulations of the Tropical Intraseasonal Oscillation by the Atmospheric General Circulation Model of the Beijing Climate Center[J]. Acta Meteorologica Sinica,2010,(5).
- 郭准,吴春强,周天军,吴统文,2011: LASG/IAP 和 BCC 大气环流模式模拟的云辐射强 迫之比较,大气科学,35(4),739-752. GUO Zhun; WU Chunqiang; ZHOU Tianjun; and WU Tongwen. A Comparison of Cloud Radiative Forcings Simulated by LASG/IAP and BCC Atmospheric General Circulation Models. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)[J]. 35(4),739-752

IPCC.2007.Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge

University Press.

- Ji JJ,1995: A Climate-vegetation Interaction Model: Simulating Physical and Biological Processes at the Surface[J]. J Biogeogr, 22: 2063-2069
- Ji JJ, Huang M., and Li K., 2008: Prediction of Carbon Exchange between China Terrestrial Ecosystem and Atmosphere in 21st Century[J]. Science in China series D: Earth Science, 51(No. 6): 885-898.
- 颉卫华,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\_AGCM2.0.1 Model[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(5): 962-978.
- Keenlyside N. S., Latif M., Jungclaus, J., et al. 2008: Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector[J]. Nature, 453, 84–88.
- Latif, M., Collins M., Pohlmann H., et al. 2006: A review of predictability studies of Atlantic sector climate on decadal scales[J]. J. Climate, 19, 5971–5987.
- Meehl, G. A., Coauthors L, Murphy J., et al. 2009: Decadal Prediction[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90, 1467–1485.
- Pohlmann, H., Johann H. Jungclaus, Köhl A., et al. 2009: Initializing Decadal Climate Predictions with the GECCO Oceanic Synthesis: Effects on the North Atlantic[J]. J. Climate, 22, 3926–3938.
- Smith D. M., Cusack S., Colman A. W., et al. 2007: Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model[J]. Science, 317, 796–799.
- Smith, D. M., Eade R., Dunstone N. J., et al. 2010: Skilful multi-year predictions of Atlantic hurricane frequency[J]. Nature Geoscience, 3, 846-849
- Troccoli A., and Palmer T. N., 2007: Ensemble decadal predictions from analysed initial conditions[J]. Phil. Trans. R. Soc., 365A, 2179–2191.
- Taylor, K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A., 2011: An overview of CMIP5 and the experiment design. Bull. Amer. Meteorol. Soc., doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- 王璐,周天军,吴统文,吴波,2009: BCC 大气环流模式对亚澳季风年际变率主导模态的模拟,气象学报[J]: 67(6): 973-982. Wang Lu, Zhou Tianjun, Wu Tongwen, Wu Bo,2009:

Simulation of the leading mode of Asian-Australian monsoon interannual variability with the Beijing Climate Center atmospheric general circulation model[J]: 67 (6): 973-982.

- Wu Tongwen, Yu Rucong, Zhang Fang, 2008: A Modified Dynamic Framework for the Atmospheric Spectral Model and Its Application[J]. J. Atmos. Sci., 65, 2235–2253.
- Wu Tongwen, Yu Rucong, Zhang Fang, 2008: A modified Dynamic Framework For Atmospheric Spectral Model and Its Application[J]. J. Atmos. Sci., 65: 2235-2253.
- Wu Tongwen, Yu Rucong, Zhang Fang, et al., 2010: The Beijing Climate Center for Atmospheric General Circulation Model(BCC-AGCM2.0.1):Description and its performance for the present-day climate[J]. Clim. Dyn., 34: 123-147.
- Wu Tongwen, 2011: A Mass-Flux Cumulus Parameterization Scheme for Large-scale Models: Description and Test with Observations[J]. Clim.Dyn., DOI: 10.1007/s00382-011-0995-3. (published online first)
- Wu Tongwen. and co-authors: The 20th century global carbon cycle from the Beijing Climate Center Climate System Model (BCC\_CSM), submitted to Climate Dynamics.
- ZhouTianjun, Yu Rucong, 2006: Twentieth-Century Surface Air Temperature over China and the Globe Simulated by Coupled Climate Models[J]. J. Climate, 19, 5843–5858.

/







# 年代际回报\预报实验方案



图 2. 年代际试验(红色线)、历史试验(蓝色线)和 CRU 观测值(黑色线)的十年平均全 球地表温度(a)及相对于所分析时段的异常(b),单位: °C。每个点上的上下变化分别指 示每组试验中样本的最大值、最小值。括号中的数值表示试验结果与 CRU 观测值的相关系 数。

Fig.2 (a) The 10-year means of globally-averaged surface air temperature in decadal prediction experiment (red line), historical experiment (blue line) and CRU observations (black line) and (b) their anomalies with contrast to themselves climatology means. The units: °C.





图 3. Decadal 试验、Historical 试验和观测(SODA、CRU)中的南北纬 50°内所有格点 10 年 平均 (a),陆面平均 (b)和海洋平均 (c)地表温度。单位: ℃ Fig. 3. The same as Fig. 2a but for the mean averaged for (a) the whole area, (b) land region, and (c) ocean region between 50°N and 50°S. The orange line in (c) indicates the SODA SST observations.





图 5. Decadal 试验(红色线)、Historical 试验(蓝色线)和观测(CRU,黑色线)中第一 年年平均地表温度:(a)的南北纬 50°内所有格点 10 年平均南北纬 50°内所有海洋格点平 均;(b)南北纬 50°内所有陆面格点平均。

Fig.5 The same as Fig. 3c but for annual mean of the predicted surface temperature at the first year for (a) ocean and (b) land regions between 50°N and 50°S.







Fig. 6 The time series of the prediction SST averaged for (a) ocean region and (b) land region of 50°N-50°S in 10 decadal experiments. Each experiment contains 4 examples.



图 7. 10 组 Decadal 试验(黑色虚线)和历史试验(蓝色虚线)模拟的南北纬 50°以内(a, b)和南北纬 30°以内(c,d)格点平均海表温度,分别相对于 SODA 和 CRU 观测值的偏差 值的逐月序列。实线为 12 点滑动平均结果

Fig. 7 The ensemble mean of 10 decadal experiments (Black doted line) and historical experiments (Blue doted line) of predicted monthly SST biases with contrast to SODA (a,c) and CRU data (b, d) averaged for the region of 50°S-50°N (a, b) and 30°S- 30°N (c, d). The solid line indicates 12 months running mean.





Fig. 8 (a) Correlation coefficients between 10-year means of predicted SST for 10 decadal experiments and CRU observations and (b) those for historical experiment and CRU observation









图 10. Decadal 回报试验模拟的区域平均的潜热通量(蓝色线)、感热通量(红色线)、净长 波辐射通量(棕色线)、净短波辐射通量(橙色线)以及海表温度(黑线)的 10 年平均值的 标准差随时间的变化:(a)印度洋;(b)西太平洋;(c)北太平洋。括号值表示模拟的通量 与海温的相关系数

Fig.10 Time series of the standard deviation of the area-averaged mean of 10-year predicted SST, net shortwave radiation (orange line), sensible heating flux (red line), latent heating flux (blue line), net longwave radiation (black line) for (a) Indian ocean area, (b) Western Pacific, (c) North

Pacific, are given The values in brackets denote correlations with SST

