

IAP/LASG 气候系统模式 FGOALS_g1 预测的海表面温度年代际尺度的演变

吴波, 周天军

中国科学院大气物理研究所, 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029
E-mail: wubo@mail.iap.ac.cn

2011-11-30 收稿, 2012-02-23 接受

中国科学院战略性先导科技专项(XDA05110305)、全球变化国家重大科学研究计划(2010CB951904)、国家自然科学基金(41005040)、优秀国家重点实验室研究项目(41023002)和国家高技术研究发展计划(2010AA012302)资助

摘要 利用中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)发展的耦合气候系统模式 FGOALS_g1, 进行了年代际气候回报和预测试验. 首先, 采用“Incremental Analysis Updates”(IAU)方案同化海洋客观分析资料的三维温度和盐度场, 完成对耦合模式海洋分量的初始化. 然后, 用国际耦合模式比较计划的“20世纪气候模拟试验”20C3M 给定的太阳常数、温室气体和硫酸盐气溶胶强迫耦合模式, 进行年代际回报试验; 在回报试验的基础上, 再进行对 A1B 排放情景下的 21 世纪初 20 年的预测试验. 把回报试验的结果与单纯的 20C3M 试验的结果进行比较, 发现回报试验对热带中东太平洋和中纬度东北太平洋等区域海表面温度(SST)的年代际变率的模拟技巧远高于 20C3M 试验的结果. 这表明, 海洋初始化过程能够有效地提高耦合模式对年代际变率较大区域的预测技巧. 预测试验表明, 目前热带中东太平洋 SST 已经达到年代际振荡负位相的谷值, 之后 10~15 年将逐渐增暖. 同时, 预测试验预测的 2000~2010 年全球平均表面温度的增暖速度显著落后于 A1B 情景试验的结果, 之后则超过 A1B 试验.

关键词

年代际预测
气候系统模式
IPCC AR5

未来 10~30 年气候变化及其对经济、社会发展的影响, 是广受社会关注的问题^[1,2]. 该时间尺度的气候变率被称为年代际尺度变率. 对年代际尺度气候变化预测问题的关注, 是“政府间气候变化专门委员会”IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第 5 次评估报告(AR5)相对于此前四次评估报告新增加的重要内容之一^[3].

在年代际尺度上, 可能的预报技巧主要来自如下 3 方面: 外强迫的变化、气候系统的惯性和气候系统内部变率导致的年代际振荡^[1]. 气候系统的外强迫包括自然强迫(太阳活动、火山喷发等)和人类活动(温室气体和气溶胶排放等)^[4]. 气候系统的惯性主要源

于海洋稳定层结导致的系统慢变过程, 例如即使温室气体维持在现有水平, 未来 40~50 年全球平均表面温度仍将以 0.1°C/10 年的速度增加, 到 2100 年将共增温 0.6°C^[5]. 气候系统对外强迫变化的敏感度和气候系统的惯性一度是气候变化研究的重点. 例如, IPCC AR4 重点关注在不同的排放情景下, 2100 年全球表面温度增幅的变化. 但是, IPCC AR4 同时指出, IPCC AR4 耦合模式的集合结果表明, 在未来 30 年内, 全球表面温度的增温幅度和空间分布均对排放情景的变化不敏感^[6].

2007 年以来, 国际上主要的模式研发机构开始基于耦合气候系统模式, 开展年代际气候回报和预

测试验^[7-10]。与年际或更短尺度气候预测问题不同,年代际预测本质上是初值问题和强迫响应问题的结合,即模式初值和温室气体等外强迫因子均对预测结果有影响^[1]。从技术上来说,给定模式外强迫的方法与以往气候预估试验类似,但是,关于如何得到初始条件,亦即如何对模式进行初始化,目前尚未有统一的方案。此外,不同研究机构关注的区域和过程也不相同。例如,Keenlyside 等人^[7]采用 SST nudging 的方案进行初始化,即将耦合模式模拟的海表面温度(SST)向观测 SST 进行恢复。基于该方案,耦合模式 ECHAM5/MPI-OM 对大西洋经向翻转环流(AMOC)及北大西洋周边国家气候的年代际变化具有较高的预报技巧。Mochizuki 等人^[8]采用 IAU(Incremental Analysis Update)方案同化客观分析资料的海洋上层 700 m 温度和盐度。基于该初始化方案,他们发现耦合模式 MIROC 对太平洋年代际振荡(PDO)具有一定的预报技巧。

本文使用中国科学院大气物理研究所(CAS/IAP)大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)发展的耦合气候系统模式 FGOALS_g1,进行了年代际回报和预测试验,本文是对年代际回报技巧的分析和总结。该工作是在 IAP/LASG 开展“国际耦合模式比较计划”(CMIP5)为 IPCC AR5 组织的年代际气候回报和预测试验的基础。

1 模式、试验方法和观测资料

1.1 模式

FGOALS_g1 是基于 LASG/IAP 耦合气候系统模式框架的低分辨率版本。它能够满足大计算量长期积分的需求^[11]。FGOALS_g1 由大气模式、海洋模式、陆面模式和海冰模式 4 个动力模块组成。大气分量为低分变率的 LASG/IAP 格点大气环流模式(GAMIL)。它的水平分辨率相当于 $5^\circ(\text{经度}) \times 4^\circ(\text{纬度})$,垂直方向采用混合坐标系,分为 26 层^[12]。海洋分量为 LASG/IAP 发展的准全球海洋环流模式 LICOM,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直方向分为 30 层^[13]。陆面和海冰分量分别为美国国家大气研究中心(NCAR)发展的通用陆面模式 CLM^[14]和海冰模式 CSIM^[15]。4 个动力模块通过 NCAR 发展的耦合器 CPL5 进行耦合。该模式已被用于 20 世纪温度变化^[16],热带海气相互作用^[17]、云辐射反馈^[18]、过去千年气候变化^[19,20]和北太平洋年代际

变率^[21]等模拟研究,并表现出较好的模拟性能。

1.2 试验方案

本文进行如下 3 组数值试验:

(1) 利用 IPCC AR4 标准的历史辐射强迫资料驱动 FGOALS_g1(20C3M 情景试验),从 1850 年积分至 2000 年。辐射强迫场包括温室气体、硫酸盐气溶胶、太阳常数的变化及主要的火山活动,其中火山活动在模式中的辐射强迫效应是通过改变太阳常数起作用的。在 A1B 情景下,将上述试验延伸至 2020 年,整个试验 1 称为“20C3M+A1B”试验。

(2) 采用 Incremental Analysis Updates(IAU)方案同化客观分析资料 EN3_v2a 提供的逐月海洋上层 1000 m 温度和盐度,从 1950 年积分至 2005 年。同化区域取为 $70^\circ\text{S} \sim 70^\circ\text{N}$,其中, $60^\circ \sim 70^\circ\text{S}$ 和 $60^\circ \sim 70^\circ\text{N}$ 为过渡区。IAU 方案是一种结合了连续和间隔同化方法优点的同化技术,曾广泛应用于大气再分析同化系统的构建^[22]。与 Nudging 方案不同,IAU 方案在一个同化循环过程中,预报方程中的分析增量保持不变,因而能够有效地减小同化过程中引入的短波噪音。值得注意的是,年代际预测试验关注的是气候系统在年代际及更长时间尺度上的变率,而非气候态特征。因此,为了减少同化过程对模式气候态的影响,我们仅同化了客观分析资料的距平场(相对于 1960~1989 年的气候平均)。该组试验称为初始化试验(INIT)。

(3) 以 INIT 试验结果为初始场,从 1955~2005 年,每隔 5 年(1960 年、1965 年,以此类推)开始一组预测试验。除了 2005 年开始的试验积分 15 年至 2020 年,其余试验均积分 10 年。该试验的辐射强迫场与“20C3M+A1B”试验完全相同。此外,为了减少模式积分初始阶段扰动对结果的影响,所有预测试验均从起始年前一年的 11 月开始积分,例如,1970 试验从 1969 年的 11 月开始积分,前两个月的结果舍去不进行分析。1995 年及其之前开始的试验称为回报试验(Hindcast),之后开始的试验称为预测试验(Forecast)。

1.3 观测资料

本文使用的观测资料包括:

(1) 英国 Hadley 中心(Met Office Hadley Centre)提供的海洋温度和盐度资料 EN3_v2a。EN3_v2a 是一套基于多种原始观测资料(包括 WOD05, GTSP 和

Argo 等)的客观分析资料. 它经过了严格的质量控制和检验, 其水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直方向分为42层, 最底层达到4000 m^[23].

(2) Hadley 中心提供的全球表面温度距平资料 HadCRUT3^[24]. HadCRUT3 是一套混合资料, 其陆表温度部分来自 CRUTEM3, 海表温度(SST)部分来自 HadISST2. HadCRUT3 的水平分辨率为 $5^\circ \times 5^\circ$.

(3) Hadley 中心提供的海表面温度资料 HadISST2, 其水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ^[25]. 所用资料时段均为1955~2005年.

2 结果分析

初始条件是决定年代际预报技巧的关键因子之一. 为了评估INIT试验对海洋表层及次表层初始化的效果, 图1给出了INIT试验模拟的逐月海洋上层300 m平均温度与客观分析数据的相关系数和均方根误差(RMSE)的空间分布. 相关系数呈现出典型的带状分布, 赤道大洋($10^\circ\text{S} \sim 10^\circ\text{N}$)和高纬度海洋(60°N 以北和 60°S 以南)相关系数较低, 而在赤道外到中高纬度的广阔海域, 相关系数则较高, 达到了0.9以上(图1(a)).

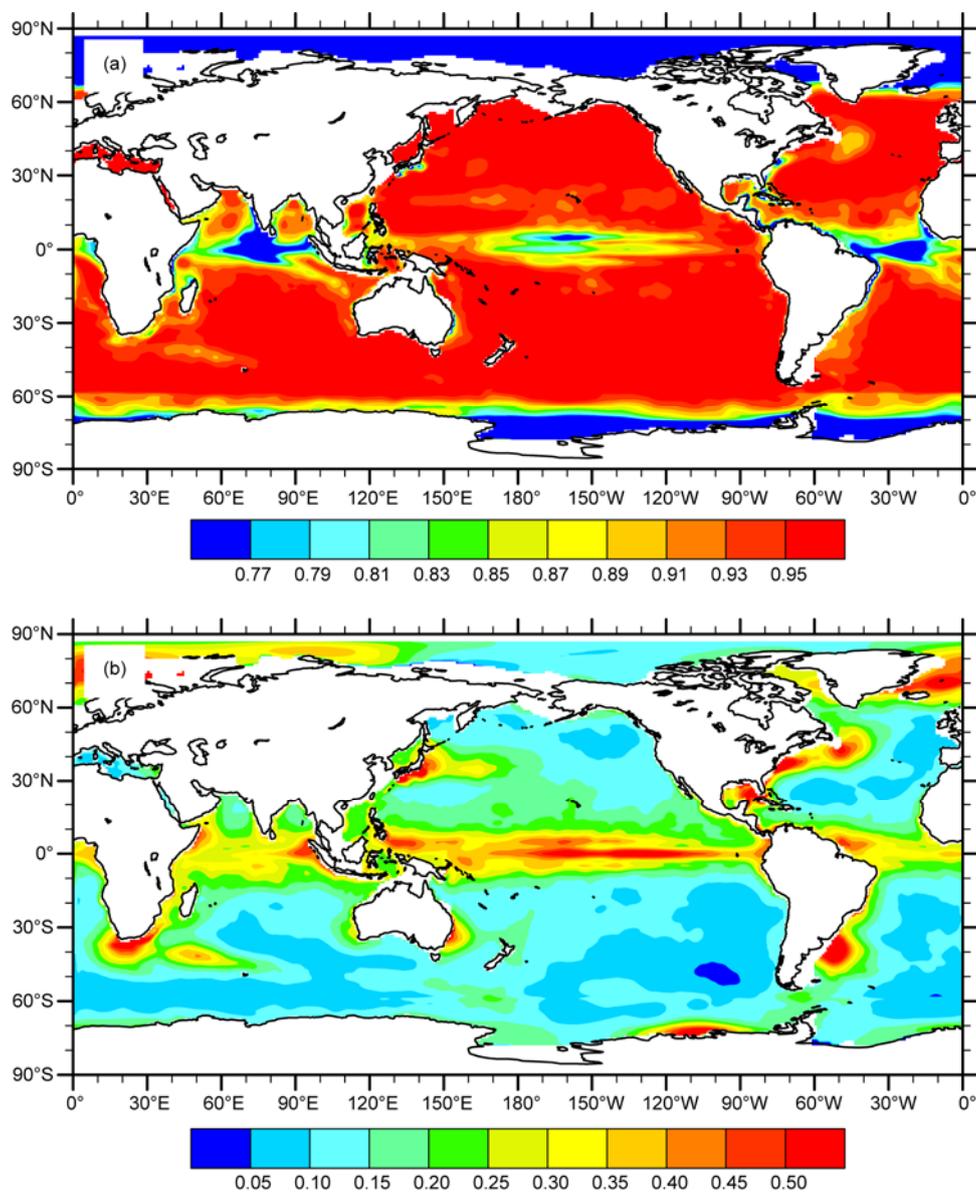


图1 (a) INIT 试验模拟的上层 300 m 平均温度与 EN3_v2a 客观分析资料的相关系数; (b)同(a), 但为均方根误差(RMSE)

高纬度相关系数较低与 INIT 试验的设计方案有关. INIT 试验的同化区域设为 70°N~70°S, 其中 60°~70°S 和 60°~70°N 为过渡区. 70°S 以南和 70°N 以北区域的海温是模式大气、海洋和海冰分量自由耦合作用的结果, 因此, 与观测没有对应关系. 而在热带海洋, 相关系数较低则可能与如下原因有关. 由于热带海洋上层热容量振荡周期短, 振幅大; 热带海洋上层波动传播速度快; 热带海气相互作用过程活跃等原因, 热带海洋的内部变率远大于中高纬度. 同化过程中, 分析增量可视为预报方程中的外强迫项. 预报变量的变率是系统内部变率和分析增量带来的外强迫共同作用的结果. 当内部变率大时, 预报变量受到外

强迫的影响相对较弱, 同化效果相对较差. 因此, 赤道区域相关系数略低于中高纬度, 约在 0.7~0.8 的范围内.

如图 1(b)所示, RMSE 的空间分布除了呈现出与相关系数类似的纬向带状分布外(赤道和高纬度误差较大, 而中高纬度误差较小), 它在所有西边界流区的值均明显大于同纬度的大洋内部区域. 总体来说, INIT 试验的初始化过程虽然存在一定的误差和缺陷, 但在大部分区域, 特别是 60°以内的中高纬度海洋, 还是表现出较高的技巧, 这是本文进一步开展回报和预测试验的基础.

图 2(a)给出了 Hindcast 试验回报的 SST 与历史

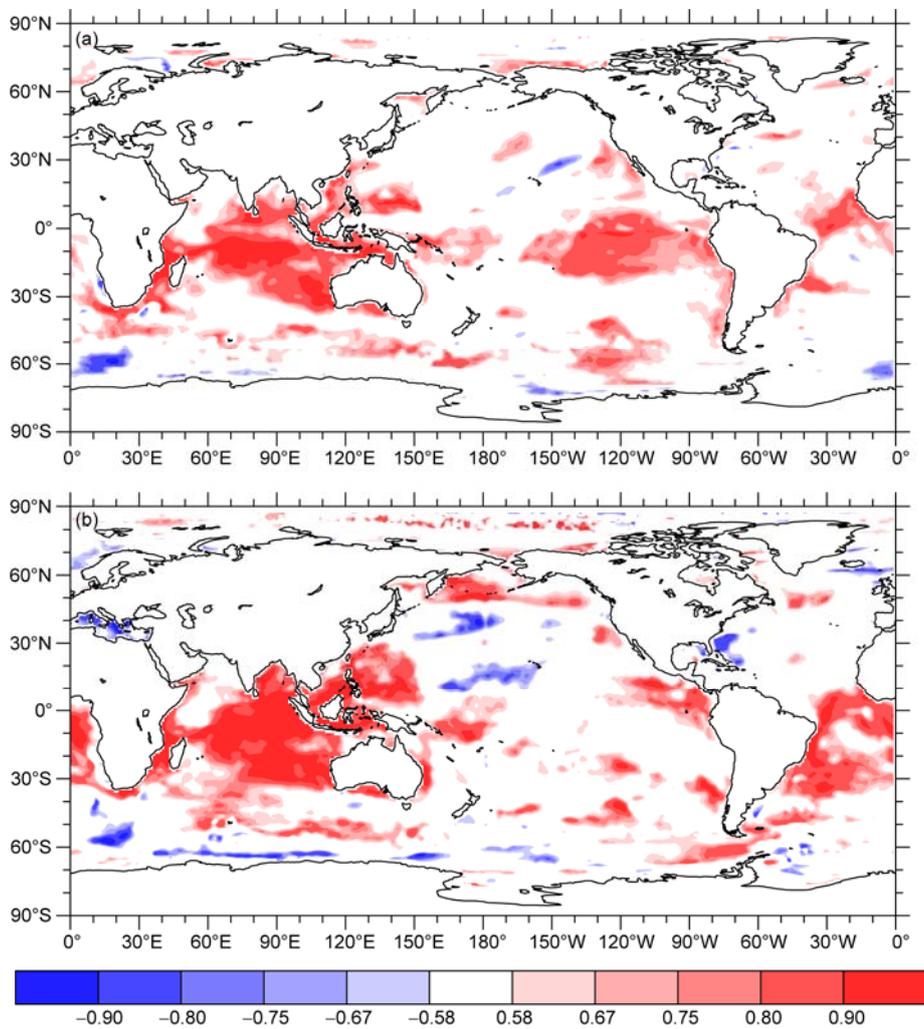


图 2 Hindcast 试验和 20C3M 试验对 10 年平均的历史 SST 的回报技巧

Hindcast 试验包括 9 组 10 年回报试验, 分别从 1955 年、1960 年...1995 年开始. 对每组回报试验预测的 SST 求 10 年平均, 再求得每个对应时段的平均观测 SST 和 20C3M 试验模拟的 SST. (a) Hindcast 试验模拟的 SST 与观测 SST 相关系数的空间分布. (b)同(a), 但为 20C3M 试验结果.

图中仅给出通过显著性检验的部分. 0.58, 0.67, 0.75, 0.8 和 0.9 分别代表 Student's *t* 检验 10%, 5%, 1%, 0.1%和 0.01%的显著性

观测数据的相关系数的空间分布. 显著的正相关区域主要位于热带印度洋-西北太平洋、热带中东太平洋和大西洋, 表明 Hindcast 试验对热带 SST 具有较高的回报技巧. 而在中、高纬度带, 显著的正相关区域则呈现出絮状或零星分布. 值得注意的是, 相关系数的显著性受到样本自由度的影响. 在热带中东太平洋和中纬度东北太平洋, 自相关很小, 独立样本数基本等于原样本数. 而在热带印度洋, 自相关较大, 独立样本数远小于原样本数. 这与该区域 SST 增暖趋势很强, 而年代际变率相对较小是一致的^[26].

相较于 20C3M 试验, Hindcast 试验的目的就是要通过海洋初始化过程, 提高模式对气候系统自身年代际变率的记忆能力. 因此, 20C3M 试验能够作为检验 Hindcast 回报技巧的参照试验. 比较发现, Hindcast 试验对赤道中东太平洋和中纬度东北太平洋 SST 的模拟技巧显著高于 20C3M 试验. 但是, 在热带印度洋, Hindcast 试验的模拟技巧则略有降低. 热带印度洋主要表现为增暖倾向, 而年代际变率较弱, 初始化过程可能影响了模式对温室气体的响应.

为了更清楚地体现 Hindcast 试验相对于 20C3M 试验模拟技巧的提升, 图 3(a), (b)给出了赤道中东太平洋(10°S~10°N, 90°~150°W)和中纬度东北太平洋(20°~60°N, 105°~140°W)区域平均 SST 的演变. 在整个回报时段, 这两个区域的 SST 表现出几乎一致位相的年代际振荡, 它们均在 1980 年前后由负位相转变为正位相. Hindcast 试验较好地模拟出了这两个区域的年代际变化特征, 它们与观测的相关系数分别达到了 0.82(热带中东太平洋区域)和 0.75(中纬度东北太平洋), 远高于 20C3M 试验的 0.68 和 0.58. 尤其是在年代际位相转换的时间点这一特征上, Hindcast 试验的技巧远高于 20C3M 试验.

太平洋最为显著的年代际变率信号是太平洋年代际振荡(PDO), 即黑潮和亲潮延伸体区域(KOE) SST 与北美沿岸的东北太平洋区域 SST 的东西振荡结构^[27]. 虽然 Hindcast 试验对东北太平洋 SST 的年代际位相转变模拟的较好, 但对 KOE 区域 SST 的年代际振荡却几乎没有模拟技巧(图 3(c)). KOE 区域 SST 的年代际振荡与阿留申低压异常激发的海洋 Rossby 波导致的海表高度异常有关^[28]. 由于 FGOALS_g1 模拟的气候态阿留申低压位置较之观测偏北^[11], 对应的海洋 Rossby 波所在纬度与观测差异较大, 因此, 即使初始条件接近观测, 模式预测的 KOE 区域 SST 的

年代际振荡的位相依然与观测差异较大. 如何提高 PDO 的回报和预报技巧, 是未来年代际预报试验亟待解决的难题.

基于 Hindcast 试验对热带中东太平洋和中纬度东北太平洋较高的模拟技巧, 本文分析了 Forecast 试验预测的这两个区域的 SST 未来 20 年的演变(图 3). 注意下文中的 2000 年代表的是 1995~2004 年 10 年平均的结果, 并以此类推. 结果表明, 赤道中东太平洋

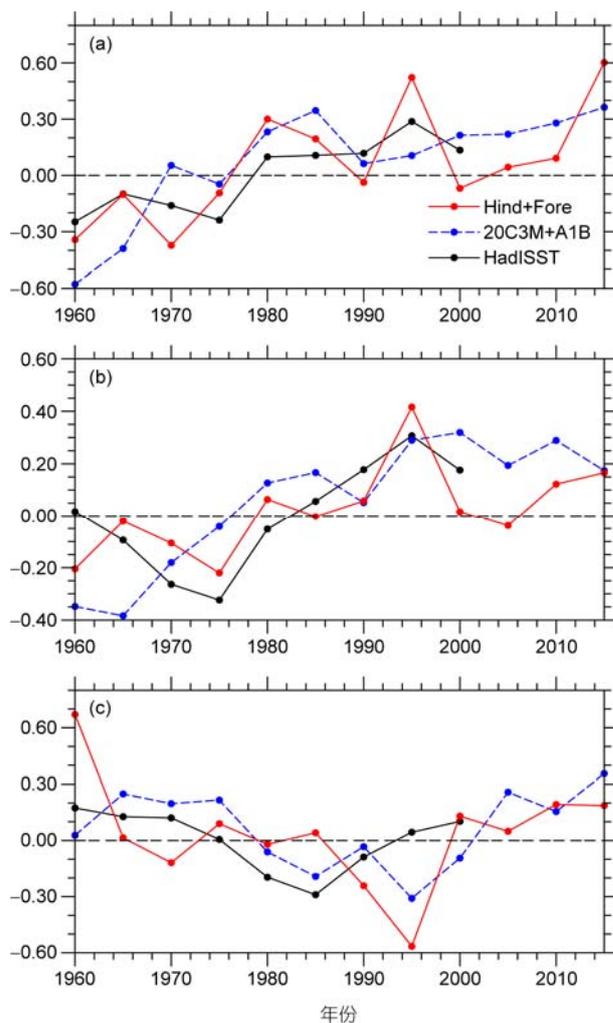


图 3 (a) 赤道东太平洋(10°S~10°N, 90°~150°W)区域平均 SST 异常随时间的演变, 红线为“Hindcast+Forecast”试验回报和预测的结果, 蓝线为“20C3M+A1B”试验模拟结果, 黑线为观测值. 每个点均代表一个回报或预测试验 10 年积分结果的平均. 例如, 1960(1965)代表 1955~1964(1960~1969)的 10 年平均, 之后以此类推. (b)同(a), 但为中纬度东北太平洋区域(20°~60°N, 105°~140°W). (c)同(a), 但为西北太平洋黑潮和亲潮延伸体区域(30°~45°N, 140°E~175°W)

SST 在 2000 年已经达到了去除增暖趋势之后的年代际振荡负位相的谷值, 之后将经历一段时间的缓慢升高, 并在 2015 年之后快速升高. 而中纬度东北太平洋 SST 将在 2005 年之后达到负位相的谷值, 之后逐渐增加.

除了太平洋年代际振荡等区域特征在未来 10~30 年的变化, 全球平均表面温度的变化也是众所关注的问题^[7]. 图 4 给出了观测的(HadCRU3 资料)、“20C3M+A1B”试验和“Hindcast+Forecast”试验模拟的全球平均表面温度随时间的演变. 与 20C3M 试验相比, Hindcast 试验在 1960~1970 年经历了一段虚假的降温过程, 这可能与模式初始化未完成有关(INIT 起始于 1950 年). 1970 年之后, 特别是 1975~1995 年, Hindcast 试验回报的全球平均温度的演变较 20C3M 试验更接近观测. Forecast 试验和 A1B 试验的预测结果也存在显著的区别. Forecast 试验预测的 2000~2010 全球平均表面温度的增暖速度显著落后于 A1B 试验, 之后则超过 A1B 试验. 这一结果和德国学者的试验结果类似^[7]. 由于 Forecast 试验的初始场来自模式海洋的初始化, 它模拟的气候系统内部变率较之 A1B 试验要更接近实际. 气候系统内部年代际振荡能够抵消或增强温室气体外强迫的作用, 这是造成 Forecast 试验和 A1B 预测结果差异的主要原因.

3 总结和讨论

本文使用 IAP/LASG 自主研发的耦合气候系统

模式 FGOALS_g1, 开展了年代际回报(Hindcast)和预测(Forecast)试验. 其中, 模式初始化过程采用了 IAU 技术同化 ENS_v2a 客观分析资料提供的海洋上层 1000 m 温度和盐度的方案. 通过与 20C3M 试验的比较, 本文评估了 Hindcast 的回报技巧, 并在此基础上对未来 20 年气候变化进行了预测, 主要结论如下:

(1) IAU 初始化方案对中纬度海洋变率, 特别是除西边界流外的大洋内部区域, 具有较高的同化技巧. 该方案能够满足我们开展年代际气候预测的需要.

(2) 回报试验对热带中东太平洋和中纬度东北太平洋 SST 年代际振荡的回报技巧较高. 它能够准确模拟出这两个区域 SST 在 80 年代际前后的年代际位相转变. 而在 20C3M 试验中, 这两个区域 SST 年代际振荡则与观测没有显著的对应关系. 年代际尺度气候变率是辐射外强迫和气候系统内部变率共同作用的结果, 通过引入模式初始化过程得到的初始条件, 再结合给定的历史辐射强迫, FGOALS_g1 能够实现某些区域年代际变率较为准确的预测.

(3) 预测试验表明, 目前热带中东太平洋 SST 已经接近去除增暖趋势之后的年代际振荡负位相的最低点, 未来 10~15 年将持续增高. 同时, 中纬度东北太平洋亦表现出相同的特征.

(4) 预测试验预测的 2000~2010 年全球平均表面温度的增速较缓, 显著慢于 A1B 试验. 之后, 前者预测的增暖速度突然加快并超过 A1B 试验. 这种未来 10~20 年全球平均表面温度由缓慢增暖到快速增暖

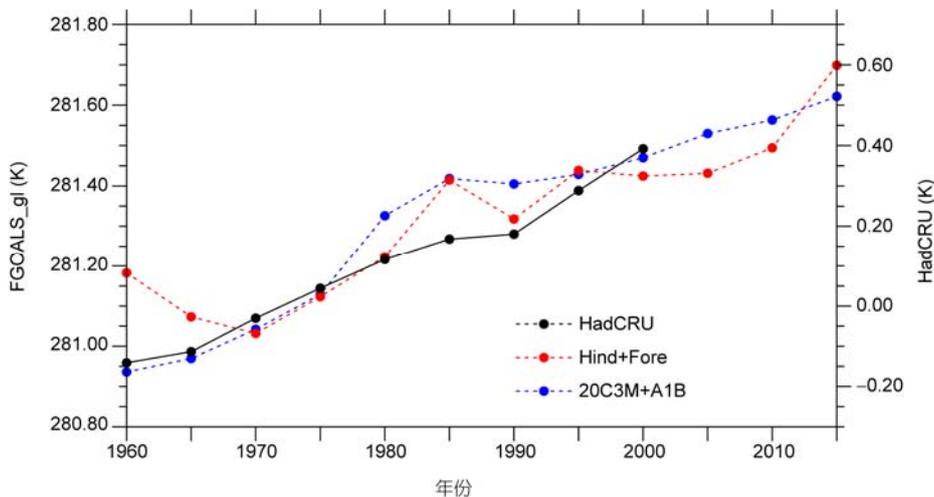


图 4 全球平均温度随时间的演变

每个点均代表一个回报或预测试验 10 年积分结果的平均. 黑线为观测的全球平均温度异常(HadCRU3 资料, 其量值参照右侧纵轴). 红线和蓝线分别为“Hindcast+Forecast”试验和“20C3M+A1B”试验模拟的全球平均温度(其量值参照左侧纵轴)

的变化特征,与德国学者的相关结果一致^[7],表明 IAP/LASG耦合模式及本文设计的年代际预测初始化系统适用于 CMIP5 年代际预测试验。

模式年代际预测技巧受到气候年代际变率可预测性、初始化方法、模式对年代际变率模拟能力等多种因素的影响。年代际尺度气候变率的产生原因及可预报性尚存在许多需要进一步研究的问题。例如,关于热带中东太平洋年代际变率的产生原因,有研究认为与热带自身海气相互作用过程有关,而另外一些则认为主要来自热带-中纬度相互作用或者中纬度遥强迫(详见 Mestas-Nuñez 和 Miller 的综述^[29])。FGOALS_g1 回报试验技巧最高的区域就出现在热带中东太平洋,暗示热带海气相互作用可能是该区域可预报性的主要来源。将来我们拟开展“Perfect model”理想试验^[30],进一步研究热带中东太平洋可预报性的来源。

在研究潜在可预报性的基础上,我们还需要通

过改进初始化方法,提高模式年代际预测技巧。由于目前对海洋环流的观测较少,本研究没有同化海洋环流。但初始条件中海洋环流的误差可能是导致预报结果偏差的可能原因之一,特别是在海气相互作用较弱的中纬度海洋。未来我们将通过“Perfect model”试验探讨是否同化海洋环流对年代际预测结果的影响。

介绍中提到, ECHAM5/MPI-OM 模式对 AMOC 有较高的预测技巧,而 FGOALS_g1 Hindcast 试验对 AMOC 几乎没有表现出任何预测技巧(图 2(a))。这可能与 FGOALS_g1 对 AMOC 的模拟能力较低有关。Zhou 等人^[11]将 FGOALS_g1 控制试验模拟的 AMOC 在北半球的最大值与基于观测分析的最优估计值进行比较,发现前者约为 30 Sv,远大于后者的 17~18 Sv。ECHAM5/MPI-OM 模式模拟的 MOC 最大值约为 20 Sv(见文献[7]图 3a),远较 FGOALS_g1 接近最优估计值。

参考文献

- 1 Meehl G A, Goddard L, Murphy J, et al. Decadal prediction: Can it be skillful? *Bull Amer Meteorol Soc*, 2009, 90: 1467–1485
- 2 Hurrell J, Meehl G A, Bader D, et al. A unified modeling approach to climate system prediction. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2009, 90: 1819–1832
- 3 Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2012, 93, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- 4 Lee T C K, Zwiers F W, Zhang X, et al. Evidence of decadal climate prediction skill resulting from changes in anthropogenic forcing. *J Clim*, 2006, 19: 5305–5318
- 5 Meehl G A, Washington W M, Collins W D, et al. How much more global warming and sea level rise? *Science*, 2005, 307: 1769–1772
- 6 Meehl G A, Stocker T F, Collins W D, et al. Climate change 2007: The physical science basis. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al, eds. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 747–845
- 7 Keenlyside N, Latif M, Jungclaus J, et al. Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector. *Nature*, 2008, 453: 84–88
- 8 Mochizuki T, Ishii M, Kimoto, et al. Pacific decadal oscillation hindcasts relevant to near-term climate prediction. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 1833–1837
- 9 Sugiura N, Awaji T, Masuda S, et al. Potential for decadal predictability in the North Pacific region. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L20701, doi: 10.1029/2009GL039787
- 10 Smith D, Cusack S, Colman A, et al. Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global circulation model. *Science*, 2007, 317: 796–799
- 11 Zhou T J, Wu B, Wen X Y, et al. A fast version of LASG/IAP climate system model and its 1000-year control integration. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25: 655–672
- 12 Wen X, Zhou T, Wang S, et al. Performance of a reconfigured atmospheric general circulation model at low resolution. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24: 712–728
- 13 Liu H, Zhang X, Li W, et al. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluations. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 675–690

- 14 Bonan G B, Oleson K W, Vertenstein M, et al. The land surface climatology of the Community Land Model coupled to the NCAR Community Climate Model. *J Clim*, 2002, 15: 3123–3149
- 15 Briegleb B P, Bitz C M, Hunke E C, et al. Scientific description of the sea ice component in the Community Climate System Model: Version Three. NCAR Technical Note NCARTN-463+STR. 2004
- 16 满文敏, 周天军, 张洁, 等. 气候系统模式 FGOALS_g1 模拟的 20 世纪温度变化. *气象学报*, 2011, 69: 644–654
- 17 满文敏, 周天军, 张丽霞. 气候系统模式 FGOALS_g1 模拟的赤道太平洋年际变率. *大气科学*, 2010, 34: 1141–1154
- 18 刘景卫, 周天军, 吴春强, 等. 海气耦合模式 FGOALS_g1 模拟的水汽和云辐射反馈过程. *大气科学*, 2011, 35: 531–546
- 19 张洁, 周天军, 满文敏, 等. 气候系统模式 FGOALS_g1 模拟的小冰期气候. *第四纪研究*, 2009, 29: 1125–1134
- 20 周天军, 李博, 满文敏, 等. 过去千年三个特征期气候的耦合模式模拟比较. *科学通报*, 2011, 56: 2083–2095
- 21 朱益民, 杨修群, 俞永强, 等. FGOALS_g 快速耦合模式模拟的北太平洋年代际变率. *地球物理学报*, 2008, 51: 58–69
- 22 Bloom S C, Takacs L L, Da Silva A M, et al. Data assimilation using Incremental Analysis Updates. *Mon Weather Rev*, 1996, 124: 1256–1271
- 23 Guinehut S, Coatanoan C, Dhomps A L, et al. On the use of satellite altimeter data in Argo quality control. *J Atmos Ocean Technol*, 2009, 26: 395–402
- 24 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, doi: 10.1029/2005JD006548
- 25 Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4407, doi: 10.1029/2002JD002670
- 26 Schott F A, Xie S P, McCreary Jr J P. Indian Ocean circulation and climate variability. *Rev Geophys*, 2009, 47: RG1002, doi: 10.1029/2007RG000245
- 27 Zhu Y, Yang X. Joint propagating patterns of SST and SLP anomalies in the North Pacific on bidecadal and pentadecadal timescales. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20: 694–710
- 28 Qiu B. Kuroshio Extension variability and forcing of the Pacific decadal oscillations: Responses and potential feedback. *J Phys Ocean*, 2003, 33: 2465–2482
- 29 Mestas-Nuñez A M, Miller A J. Interdecadal variability and climate change in the eastern tropical Pacific: A review. *Prog Ocean*, 2006, 69: 267–284
- 30 Meehl G A, Hu A, Tebaldi C. Decadal Prediction in the Pacific Region. *J Clim*, 2010, 23: 2959–2973