

容新尧, 刘征宇, Liu Yun, 等. 耦合模式中北太平洋和北大西洋海表面温度年代际可预报性和预报技巧的季节依赖性[J]. 地球科学进展, 2017, 32(4): 382-395, doi: 10.11867/j. issn. 1001-8166. 2017. 04. 0382. [Rong Xinyao, Liu Zhengyu, Liu Yun, et al. Seasonal dependence of the North Pacific and North Atlantic SST predictability and forecast skill[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(4): 382-395, doi: 10.11867/j. issn. 1001-8166. 2017. 04. 0382.]

耦合模式中北太平洋和北大西洋海表面温度年代际可预报性和预报技巧的季节依赖性^{*}

容新尧¹, 刘征宇^{2,3}, Liu Yun², 段晚锁⁴

(1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;

2. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Center for Climatic Research, University of Wisconsin-Madison, Madison Wisconsin, USA; 3. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871;

4. 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)

摘要: 利用一个全球耦合环流模式在理想模式框架下进行了3组动力预报试验, 研究了北太平洋和北大西洋海表面温度异常(SSTA)的年代际可预报性和预报技巧。结果表明北太平洋年平均SSTA在年代际尺度上可预报性和预报技巧表现较低, 明显弱于北大西洋。通过分析不同季节平均SSTA的可预报性与预报技巧, 发现北太平洋中西部区域冬季平均SSTA的年代际可预报性和预报技巧显著高于其他季节, 其量值和北大西洋相当, 表现为明显的季节依赖性; 北大西洋SSTA的可预报性和预报技巧也显示了随季节变化的特征。进一步分析表明, 北太平洋SSTA年代际可预报性和预报技巧的季节依赖性归因于北太平洋冬季SSTA的年与年之间再现机制, 这一再现机制源于北太平洋混合层显著的季节变化; 而北大西洋SSTA的可预报性和预报技巧的季节依赖性则可能与其他过程(如大西洋年代际涛动)的季节变化有关。研究结果表明, 对于年代际气候预报, 如果考虑所关注指标的季节平均, 则可能在某些季节获得比年平均更高的预报技巧。

关键词: 北太平洋; 北大西洋; 年代际预测; 季节依赖性; 耦合模式

中图分类号: P467; P731.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2017)04-0382-14

1 引言

年际到年代际尺度上的气候可预报性主要来源于海洋。海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)的年代际变化一方面不仅可以直接引起其周边区域大气环流的年代际变化, 而且可以通过大气遥相关过程影响其他区域大气环流的年代际变化; 另一方面, 它是年际变率的背景, 对年际变率现象以及年际

关系具有调制作用。因此, SST的年代际预测是年代际气候预测的前提, 同时也可影响到年际气候预测, 其准确预报具有非常重要的意义。

气候年代际可预报性有3个方面的来源: 外强迫变化(如温室气体)、气候系统的惯性以及气候系统内部变率^[1]。其中, 与气候系统内部变率相关的可预报性主要源于海温的年代际变化模态, 而这些模态通常源于气候系统内部海洋和大气之间的相互

^{*} 收稿日期: 2016-10-19; 修回日期: 2017-01-20.

^{*} 基金项目: 公益性行业(气象)科研专项项目“基于FGOALS-s、CMA和CESM气候系统模式的年代际集合预测系统的建立与研究”(编号: GYHY201506012); 科技部全球变化研究项目(编号: 2012CB955201)资助.

作者简介: 容新尧(1979-), 男, 海南三亚人, 副研究员, 主要从事气候数值模拟及预测研究. E-mail: rongur@camsma.cn

作用。比如发生在太平洋的太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)^[2]或太平洋十年际涛动(Interdecadal Pacific Oscillation, IPO)^[3],以及发生在大西洋的大西洋多年代际振荡(the Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)^[4,5]。尽管定性上海温的年代际可预报性与年代际变化模态相关,但如何准确估计海温的年代际可预报性仍是难题。年代际可预报性的估计方法可分为2类:第一类基于统计诊断方法^[6,7],这类方法通过分析海温长期时间序列的统计特征来估计海温的可预报性,因此在一些文献中称之为DPP(Diagnostic Potential Predictability)。第二类利用动力模式在“理想模式”(perfect model)框架下进行集合预报试验^[8,9]。“理想模式”采用模式的一组积分作为真值,并利用相同的模式进行预报。由于该框架下不存在模式误差,因此可以通过在初始场进行微小的扰动进而分析集合的发散度来估计可预报性。前一类方法较难定量给出具体的可预报时间和预报技巧,但优点是可利用观测资料来进行诊断;后一类方法尽管可以进行定量估计,但其估计成立的前提是模拟和观测的变率具有可比较的统计特征^[10]。无论基于何种方法,目前已有的认识是大西洋海温可能存在较高的年代际可预报性,而太平洋海温的可预报性与大西洋相比弱得多^[7,8]。近年来一些年代际预报的尝试也显示北大西洋区域具有较高的实际预报技巧^[11,12],而太平洋的实际预报技巧可能更多来源于外强迫变化导致的趋势,内部变率的贡献较小^[13]。

海温的持续性是其可预报性的一个表征。研究发现SST的持续性存在季节依赖性,同时其可预报性也具有季节变化。比如与厄尔尼诺—南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)相关的SST异常(SSTA)的持续性在春季快速降低,即存在所谓的持续性障碍(persistence barrier),对应了ENSO的春节预报障碍^[14~16]。已有研究指出北太平洋和北大西洋SSTA的持续性具有季节依赖性^[17~23]。如An等^[20]和Ding等^[21]均发现北太平洋7~9月存在SST的持续性障碍。Namias等^[17,18]注意到北太平洋和北大西洋部分区域冬季的SSTA和随后夏季的SSTA没有持续性,但在下一个冬季重新出现,由此导致冬季SSTA的持续性比夏季长。Alexander等^[24]把这一现象称为SSTA的“再现”(reemergence)机制。

一些研究已经发现北太平洋SSTA的季节预报技巧存在季节依赖性^[25~27]。如前所述,前人研究指

出北太平洋年平均SSTA在年代际尺度上的可预报性与预报技巧远弱于北大西洋。然而,基于SST持续性的季节依赖性,是否存在如下可能:北太平洋某些季节平均SSTA在年代际尺度上的可预报性和预报技巧是否高于年平均SSTA?甚至达到和大西洋相当的预报技巧?为了回答这个问题,本文将利用统计方法和动力方法分析耦合环流模式中北太平洋和北大西洋SST的年代际可预报性,并利用多种同化方法初始化模式进行年代际预报试验,通过对比年平均以及不同季节平均的预报结果,研究SSTA的年代际可预报性和预报技巧的季节依赖特征。

2 模式、试验设计和分析方法

2.1 模式和试验设计

本文所用模式为FOAM(Fast Ocean Atmosphere Model)^[28,29]。FOAM是一个包含大气、陆面、海洋和海冰的完全耦合的气候系统模式,其大气分量为采用了CCM3物理过程的CCM2模式,水平分辨率为R15(约 $7.5^\circ \times 4^\circ$),垂直方向18层。海洋分量源于美国地球物理流体动力学实验室(Geophysical Fluid Dynamic Laboratory, GFDL)的MOM1.0模式,水平分辨率为 $2.8^\circ \times 1.4^\circ$,垂直方向24层。海冰分量采用了热力学海冰,分辨率与海洋模式相同。FOAM已经被广泛用于热带—热带外相互作用以及太平洋年代际变化等方面的研究,并显示了对ENSO以及PDO一定的模拟能力^[30~32],同时已应用于基于集合数据同化的参数估计以及气候变率机制研究^[33,34]。

本文基于“理想模式”框架进行数值试验。模式首先从静止海洋出发,海温和盐度初始场为观测的气候态。模式首先进行了2000年spin up积分。以spin up积分为起点,模式进行了300年的控制试验,其中外强迫(如温室气体)均取为常数。选取控制试验第134~200年的模拟作为真值,并在每个模式格点的月平均SST和海表面盐度(Sea Surface Salinity, SSS)上叠加高斯分布的误差作为观测SST,其中观测误差取其控制试验标准差的10%。随后利用张弛法(Nudging)以及集合卡尔曼滤波(EnKF)2种方法将月平均SST和SSS同化到模式中,同化时间段为控制试验第134~185年。Nudging方法采用真值的月平均SST和SSS对海洋模式进行恢复,恢复时间为5天。EnKF方法采用Anderson^[35,36]提出的集合调整卡尔曼滤波(EAKF)算法,同化带有误差的月平均SST和SSS观测,同时利用温盐场之

间的协方差来同化海洋上层 400 m 以上的温盐场(温度观测用于同化盐度场,盐度观测同化温度场)。EnKF 同化步长为 1 个月,采用模式月平均状态变量来计算协方差矩阵以及同化增量,并把每个格点的增量加到下一个月的第一步中作为新的分析场。Nudging 和 EnKF 2 种同化方案的集合成员数均为 30,其中 30 个成员的海洋和海冰初始场为控制试验第 134 年 1 月 1 日的结果,大气和陆面初始场取自控制试验第 134 年前后各 15 年的大气和陆面模式初始场。上述同化均在耦合模式中进行,因此通过海气相互作用,大气可以获得观测 SST 的信息。图 1 显示了真值以及 Nudging 和 EnKF 同化的北太平洋和北大西洋年平均上层海洋热容量异常经验正交函数分解(EOF)第一模态的时间序列。可见,2 种方法均较好地抓住了上层海洋热容量的时间变化特征。相比较而言,EnKF 方法的误差更小。特别是在北大西洋,Nudging 方法同化的时间序列的位相要滞后真值 1 年左右,而 EnKF 方法在位相和振幅均与真值均符合较好,这可能是因为 EnKF 采用温盐协方差来同化海洋 400 m 以上的温盐场。在北大西洋,海温的变化与经向翻转流关系密切,而盐度的变化对经向翻转流的变化具有重要影响,因此同化上层盐度场会有利于减小温度场的分析误差。

在同化的基础上,进行 3 组预报试验。第一组利用 Nudging 得到初始场,从第 135 年起,每 5 年进行 2 个预报(即每 5 年起报 2 次,起报年份为第 135,137,140,142,145 年,以此类推),预报个数为 18 个,起报时间为 1 月 1 日,预报长度为 10 年,每个预报集合数为 30,称该组预报为 Nudging 预报。第二组预报利用 EnKF 同化的初始场,从第 135 年起每隔 5 年起报 1 次,预报个数为 10,其余设置同 Nudging 预报,称为 EnKF 预报。第三组称为 Perfect Ocean 预报(简称 PERFO)。PERFO 预报的预报起始时间、预报个数、集合数等设置与 Nudging 预报相同,但采用完美的海洋初始场,即所有集合成员的海洋初始场均取自真值,而大气初始场取与 Nudging 预报相同。由于 PERFO 预报采用完美海洋初始场,因此其预报技巧可以用来衡量 SST 的可预报性;Nudging 预报和 EnKF 预报的预报技巧则类似于业务预报,代表了实际预报情况下的预报技巧。

2.2 分析方法

本文用于衡量预报技巧的指标为标准化的均方根误差(RMSE),RMSE 定义为:

$$RMSE_j = \sqrt{\frac{\langle F_{j,i} - O_{j,i}, F_{j,i} - O_{j,i} \rangle}{\langle O_{j,i}, O_{j,i} \rangle}} \quad (1)$$

式中: j 表示预报的第 j 年, $F_{j,i}$ 为第 i 个预报第 j 年预报集合平均的距平, $O_{j,i}$ 为与第 i 个预报第 j 年预报对应的真值距平,“ $\langle \rangle$ ”表示对所有预报(对 i)求方差, $\langle O_{j,i}, O_{j,i} \rangle$ 取为控制试验 300 年积分的方差。当 $RMSE > 1$,则表示预报误差大于控制试验的标准差,也就是预报误差大于气候态预报误差(即预报值 $F_{j,i}$ 取为零值),此时认为预报误差饱和,预报技巧趋于零。

本文采用 Boer^[6] 提出的统计方法来估计 SST 的年代际可预报性,定义为:

$$DPP = \frac{\sigma_{10}^2}{\sigma_1^2} \quad (2)$$

式中: σ_1^2 为模式控制试验年平均异常的方差, σ_{10}^2 为年际异常的 10 年滑动平均的方差。在下文对各季节可预报性的分析中, σ_1^2 和 σ_{10}^2 分别对应了各季节平均的年际异常的方差以及相应的 10 年滑动平均的方差。DPP 的值表示年代际异常的方差占总方差的比例,高 DPP 值表示年代际方差较大,因此可预报性高。如前所述,该方法通常只用于定性估计可预报性的高低,难以精确获得具体的可预报时效,而这在动力预报的方法(如 PERFO 试验)中可以定量估计得到。

3 SST 年平均异常的年代际潜在可预报性及预报技巧

本节首先给出统计方法(公式(2))估计 SST 的年代际可预报性的特征,随后分析动力预报的结果,估计不同区域年平均 SSTA 的可预报性以及预报技巧。

3.1 统计方法估计的年平均 SSTA 的年代际可预报性

图 2 给出了统计方法估计的 FOAM 模式控制试验模拟的年平均 SSTA 的年代际潜在可预报性(DPP)分布。由图 2 可见,模式 SST 年代际可预报性较高的区域主要位于中高纬度北大西洋以及南大洋中高纬的南极绕极流区域,而低值区主要位于热带海洋,这是因为全球海温的年代际变化模态主要发生在记忆时间较长的中高纬海洋。在北太平洋的西边界部分区域、北部区域以及北美西部沿岸存在一定的年代际可预报性,但其 DPP 高值区范围均较小,量值也较北大西洋和南大洋小。上述分布特征

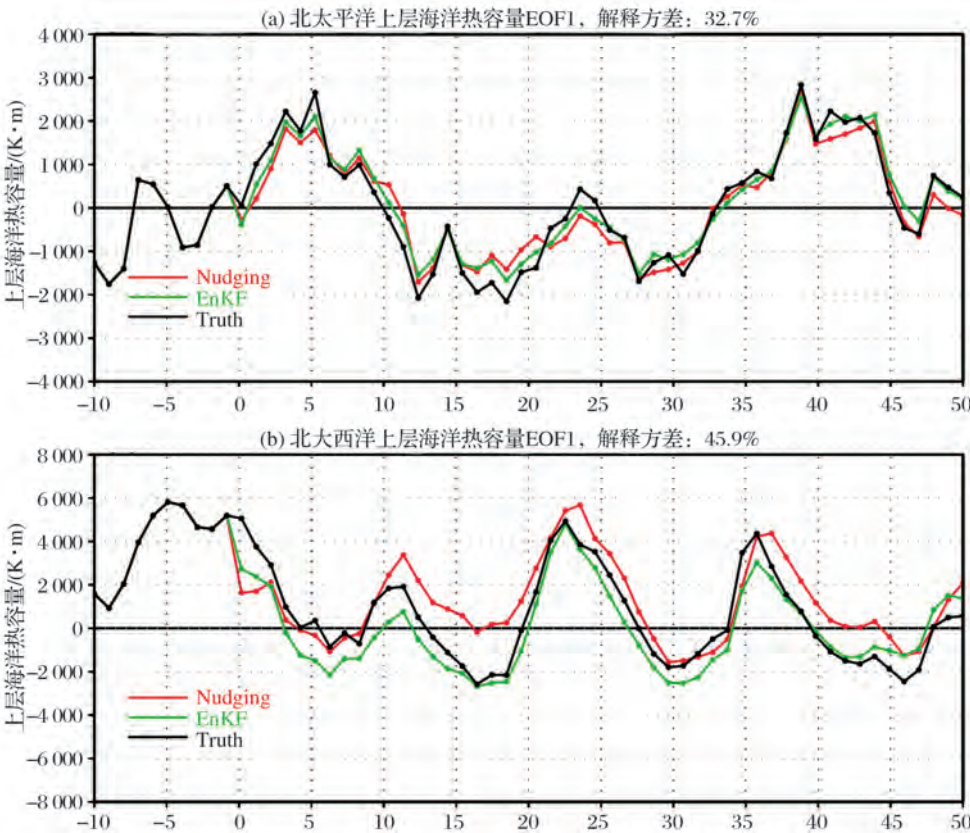


图 1 年平均上层海洋热容量(400 m)异常的 EOF 第一模态时间系数

Fig.1 Temporal coefficients of the first EOF mode of the upper ocean heat content (400 m)

(a) 北太平洋(120°E ~ 110°W, 20° ~ 60°N) 区域; (b) 北大西洋(80°W ~ 10°E, 20° ~ 80°N) 区域; 图中黑线代表真值, 红线和绿线分别为 Nudging 和 EnKF 同化的结果; 横坐标的时间点 0 对应控制试验的第 135 年

(a) The North Pacific (120°E ~ 110°W, 20° ~ 60°N) region; (b) the North Atlantic (80°W ~ 10°E, 20° ~ 80°N) region. The black lines represent the true values, and the red and green lines are the result of assimilation from Nudging and EnKF, respectively.

The abscissa of the time zero represents the 135th year of control run

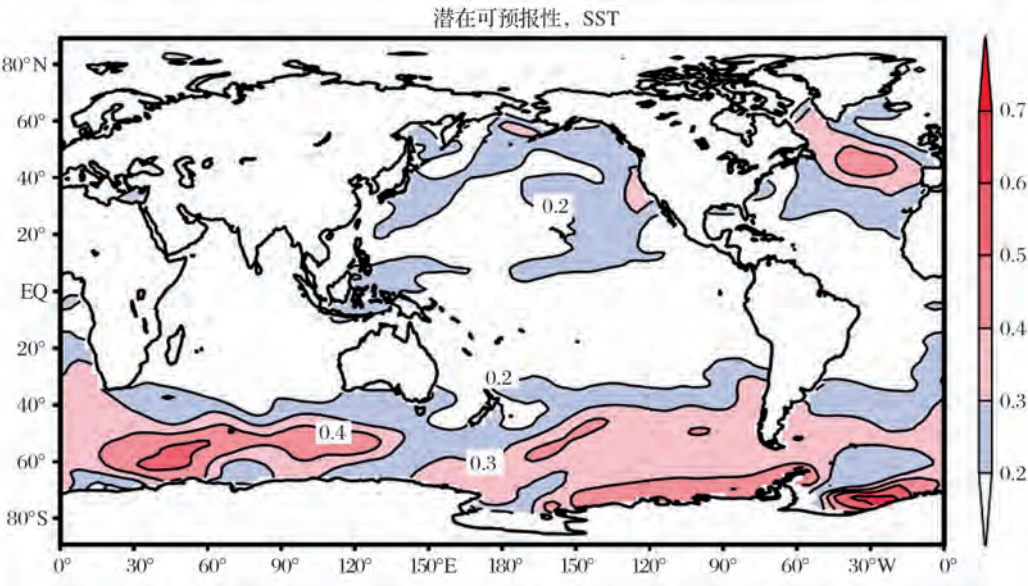


图 2 控制试验模拟的年平均 SST 异常的年代际潜在可预报性分布

Fig.2 Decadal potential predictability of annual mean SSTa of control run

与 Boer^[7]等基于观测 SST 资料估计的 10 年尺度上的高可预报性区域较为一致,表明 FOAM 对全球 SST 的年代际变率具有一定的模拟能力。

3.2 基于动力预报的年代际可预报性及预报技巧

为了定量估计不同区域 SST 及其变化模态的可预报性及预报技巧,计算了模式 3 组试验预报的北太平洋和北大西洋 SSTA 前 3 个 EOF 模态时间系数的 RMSE。计算方法如下:首先对 300 年控制试验模拟的北太平洋(120°E ~ 110°W, 20° ~ 60°N)和北

大西洋(80°W ~ 10°E, 20° ~ 80°N)年平均 SSTA 进行 EOF 分解,分别取前 3 个模态,然后将真值以及 3 组预报的北太平洋和北大西洋年平均 SSTA 投影到前 3 个模态空间场,得到真值以及预报的 EOF 时间系数,随后利用真值计算 3 组试验预报的时间系数的 RMSE。图 3 分别给出了 3 组试验预报的北太平洋和北大西洋年平均 SSTA 前 3 个 EOF 模态时间系数的 RMSE 随预报时间(年)的演变。图 3 还同时给出了“持续性预报”的结果。持续性预报把每一

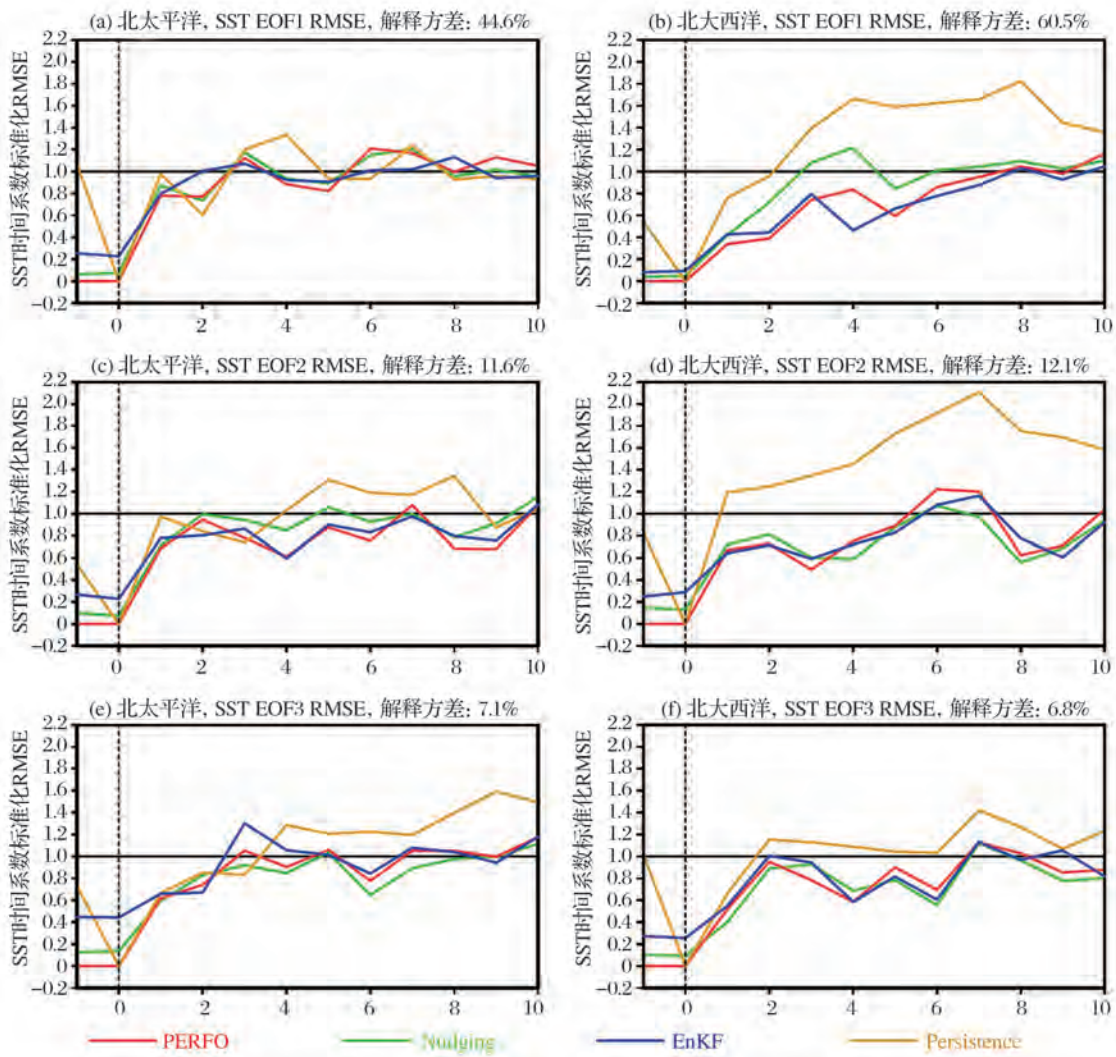


图 3 北太平洋和北大西洋年平均 SSTA 前 3 个 EOF 模态时间系数的 RMSE 随预报时间(年)的变化

Fig. 3 RMSE of the temporal coefficients of the first three EOF modes for North Pacific and North Atlantic SSTA

EOF 分解的区域同图 1;左列为北太平洋结果,右列为北大西洋的结果;从上往下分别代表 EOF 的第一、第二、第三模态;

红色线为 PERFO 预报,绿色和蓝色线分别代表 Nudging 和 EnKF 预报,黄色线为持续性预报;图中横坐标为预报

时间,0 表示预报前一年平均异常(同化结果);图中右上角数字表示各个 EOF 模态的解释方差

The areas of EOF decomposition are same as Fig. 1; The left and right panels are the results of North Pacific and the North Atlantic, respectively.

From top to bottom; The first, second and third EOF mode. The red, green, blue and yellow lines denote the PERFO, Nudging,

EnKF and persistence forecasts, respectively. The abscissa represents the forecast time, and the value at time zero is the annual

mean calculated by the previous year's SSTA (assimilation result). The number shown on the upper right corner

of each panel represents the explained variance of each EOF mode

年的预报都取为起报点前一年平均的真值距平,其预报技巧可作为一种参考基准。若动力预报技巧低于持续性预报,则认为动力预报技巧无价值。由图3可见,PERFO 预报(红色)的北太平洋年平均 SSTA 前3个 EOF 模态的时间系数的 RMSE 不超过3年即达到饱和,这3个模态的方差贡献总共达到63%,表明北太平洋年平均 SSTA 在年代际尺度上的可预报性较弱。在北大西洋,年平均 SSTA 第一和第二 EOF 模态可预报时间分别达到了8年和6年,但第三模态的 RMSE 在2年左右即达到饱和。需要注意的是前2个模态的方差贡献达到72%,而第三模态方差贡献仅为7%,因此可以认为,北大西洋 SST 的年平均异常在年代际尺度上是具有较高可预报性的。PERFO 试验的动力预报所揭示的 SST 的预报技巧与图2所示的统计方法得到的结果是一致的。一般认为,北太平洋 SSTA 的 EOF 第一模态与 PDO 相联系,而北大西洋 SST 的第一模态则对应于 AMO,许多研究已经揭示 AMO 具有较高的年代际可预报性^[8],这与本文的结果相符。可以发现,Nudging 预报和 EnKF 预报也显示了和 PERFO 比较相似的预报技巧,进一步验证了北太平洋和北大西

洋不同的年代际可预报性。可以发现,Nudging 方法预报的北大西洋 EOF 第一模态的 RMSE 在第3年即达到饱和,这可能和 Nudging 方法同化的北大西洋上层海洋热容量误差较大有关(图1b)。同时可以看到,无论是北太平洋还是北大西洋,“持续性预报”的预报技巧总表现为最低。

4 SST 年代际可预报性与预报技巧的季节依赖性

上一节基于统计方法和动力预报方法的结果表明,北太平洋年平均的 SSTA 的年代际可预报性以及预报技巧是比较低的,而北大西洋的相对较高。本节将分季节讨论季节平均的 SSTA 的可预报性以及预报技巧。

4.1 SST 年代际可预报性的季节依赖性

图4给出了统计方法估计的模式控制试验模拟的季节平均 SSTA 年代际潜在可预报性(DPP)分布。由图4可见,北太平洋 SST 的年代际可预报性具有显著的季节依赖性。其中,北太平洋中西部(130°E~160°W,30°~60°N)冬季平均 SST 具有较高的年代际可预报性,其量值和北大西洋相当;而在

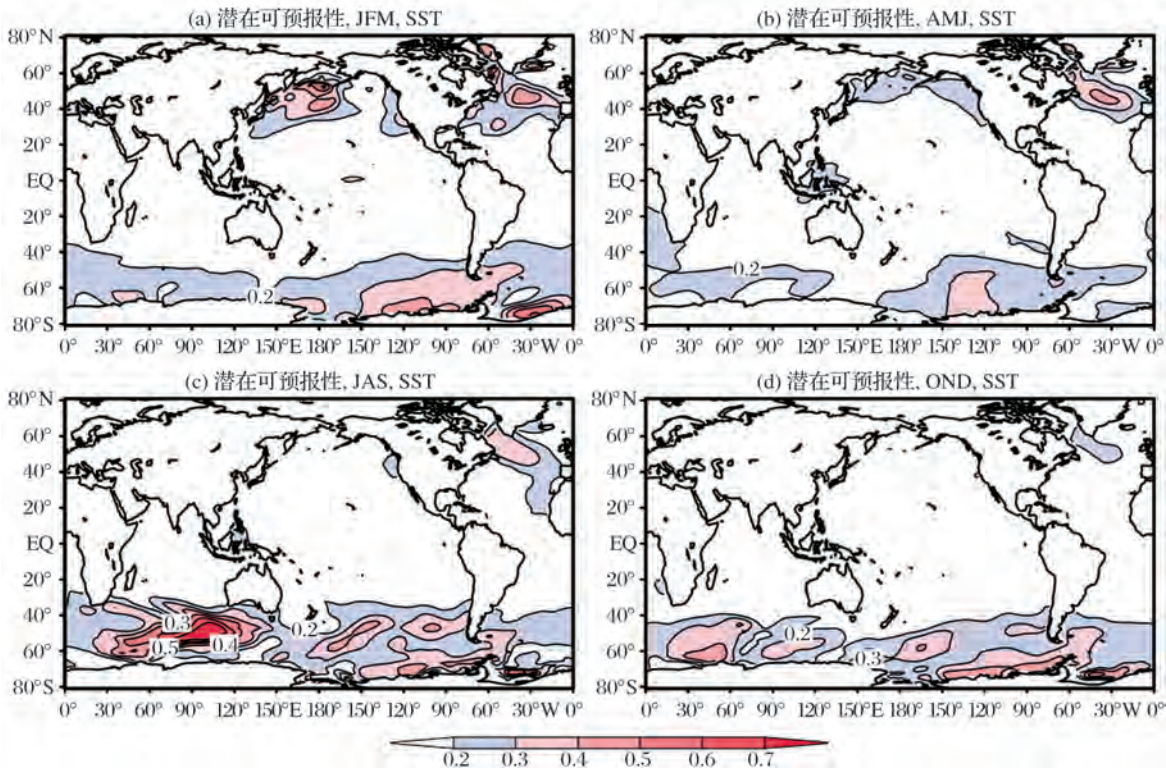


图4 控制试验模拟的季节平均的 SSTA 异常的年代际潜在可预报性分布

Fig.4 Decadal potential predictability of the seasonal mean SSTA derived from control run

(a) 冬季(JFM);(b) 春季(AMJ);(c) 夏季(JAS);(d) 秋季(OND)

(a) Winter (JFM); (b) Spring (AMJ); (c) Summer (JAS); (d) Autumn (OND)

其他季节, SST 的年代际可预报性明显低于北大西洋。这一结果表明, 尽管北太平洋年平均 SST 异常显示了较低的可预报性与预报技巧, 但是如果我们关注季节平均的预报, 而非年平均预报, 那么在某些季节北太平洋 SST 的预报可能会具有较高的预报技巧。在北大西洋, 除了秋季稍弱外, 其他季节的可预报性均较高, 而且不同季节之间 DPP 量值差别不明显, 这也预示北大西洋 SST 不同季节平均的 SSTA 的预报技巧差别可能不显著。为了验证上述推论, 下一小节将分析北太平洋和北大西洋区域平均 SSTA 在不同季节的预报技巧。选取北太平洋 ($165^{\circ}\text{E} \sim 165^{\circ}\text{W}, 40^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{N}$) 和北大西洋 ($60^{\circ} \sim 20^{\circ}\text{W}, 40^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{N}$) 这 2 个可预报性最高的区域来进行分析。

4.2 不同季节平均的 SST 异常的预报技巧

图 5 给出了年平均以及不同季节平均的北太平

洋 SSTA 的 RMSE 随预报时间演变的时间序列, 同时给出 4 种预报方法的结果。一个最为显著的特征是, 4 种方法预报的冬季平均 SSTA 的预报技巧相较于其他季节以及年平均都表现为最高 (RMSE 最小)。特别是 PERFO 预报, 冬季平均误差在所有预报时间上均最小, 而且直至预报第 10 年误差仍未饱和和 (图 5a), 表明模式中北太平洋冬季平均 SSTA 在年代际尺度上具有很高的可预报性。在其他季节, RMSE 在预报的第一年误差快速增长, 在第 3~4 年即达到饱和, 年平均 SSTA 的误差大致处于冬季和其他 3 个季节之间。上述结果与图 4 基于统计方法得到的年代际可预报性的特征一致。可以看到, Nudging 方法可以达到与 PERFO 相当的预报技巧, 表明 Nudging 方法对北太平洋 SST 的预报可能具有一定的适用性。此外, EnKF 方法预报的 RMSE 随

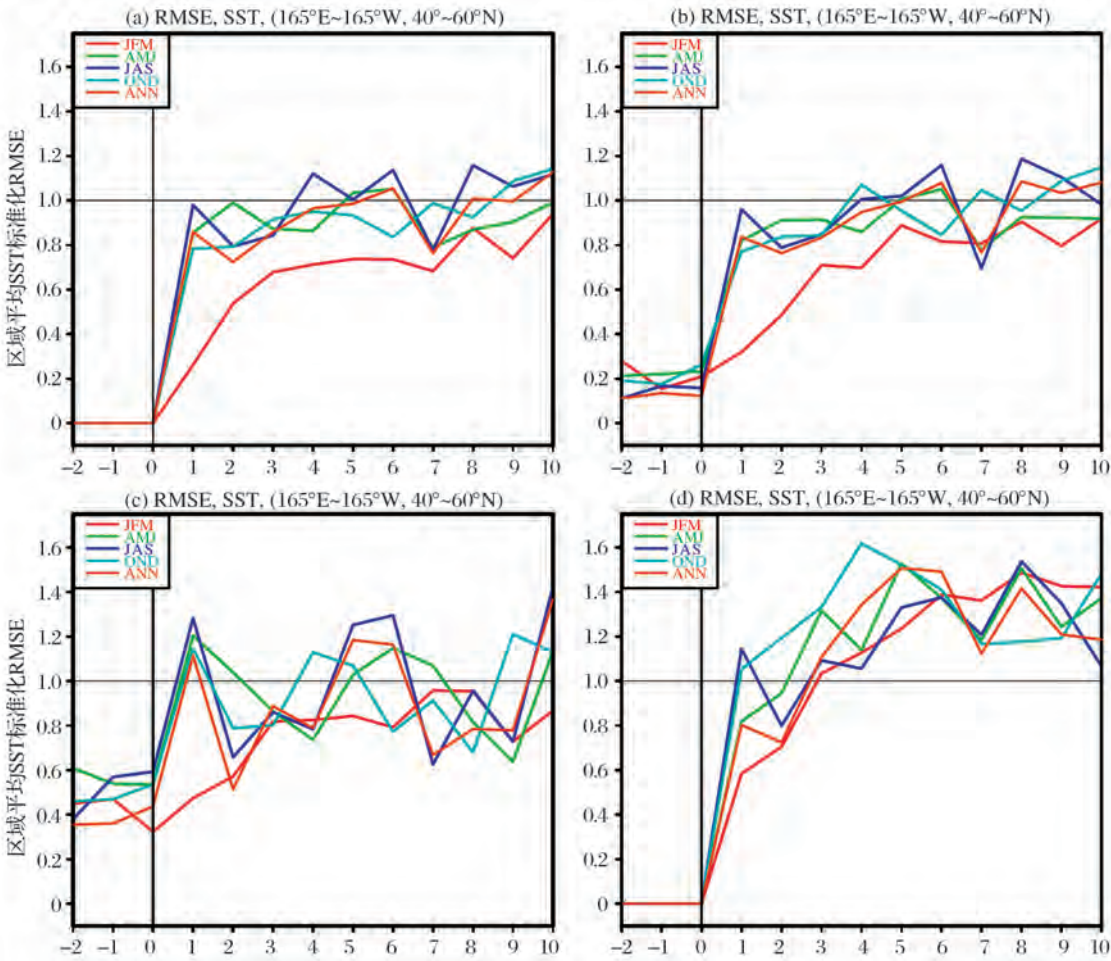


图 5 年平均以及不同季节平均的北太平洋 SSTA 的 RMSE 随预报时间的变化
Fig. 5 Temporal evolution of the RMSE of the annual mean and seasonal mean SSTA averaged over the North Pacific region

(a) PERFO 预报; (b) Nudging 预报; (c) EnKF 预报; (d) 持续性预报
(a) PERFO forecast; (b) Nudging forecast; (c) EnKF forecast; (d) Persistence forecast

着预报时间存在振荡的现象,比如除冬季外其他季节以及年平均 RMSE 在第一年迅速超过饱和线,而在第 2~4 年又回落至饱和线以下,随后反复上升回落。导致 EnKF 预报的 RMSE 随预报时间振荡的原因可能是北太平洋 SSTA 的年际分量较强(对年代际预报而言是噪音),加之 EnKF 预报的个数仅为 10 个,导致计算的 RMSE 存在较大的样本误差,因此 RMSE 的变化曲线不如 PERFO 以及 Nudging 预报的平滑。总而言之,图 5 的结果表明,FOAM 模式中北太平洋 SSTA 的年代际可预报性与预报技巧表现出了显著的季节依赖性,其中冬季平均 SSTA 的年代际可预报性和预报技巧明显高于其他季节,具有和北大西洋相当的预报技巧。

图 6 给出了北大西洋年平均以及不同季节平均 SSTA 的预报结果。可以发现,北大西洋 SSTA 的预

报技巧也存在随季节变化的特征。对应于图 4 中秋季较低的可预报性,秋季平均 SSTA 的预报技巧相较其他季节也是最低,这一特征在 3 组动力预报以及持续性预报中均有表现。其中 PERFO 预报的秋季平均 SSTA 的 RMSE 在 6~8 年即达到饱和,而其他季节的饱和时间约为 10 年。和北太平洋类似,北大西洋 SSTA 的预报技巧在冬季最高,但不同的是其与春季和夏季以及年平均的差别不如北太平洋明显,这一点和图 4 估计的年代际可预报性一致。整体上,北大西洋 SSTA 的预报技巧要高于北太平洋,这和已有的研究结果相符。可以发现,在北大西洋 EnKF 的预报技巧较 Nudging 高,如前所述,这是由于 EnKF 采用温盐协方差同化 400 m 以上的温盐场使得其上层海洋热容量的分析误差较 Nudging 方法小(图 1b),从而有利于预报技巧的提高。我们进

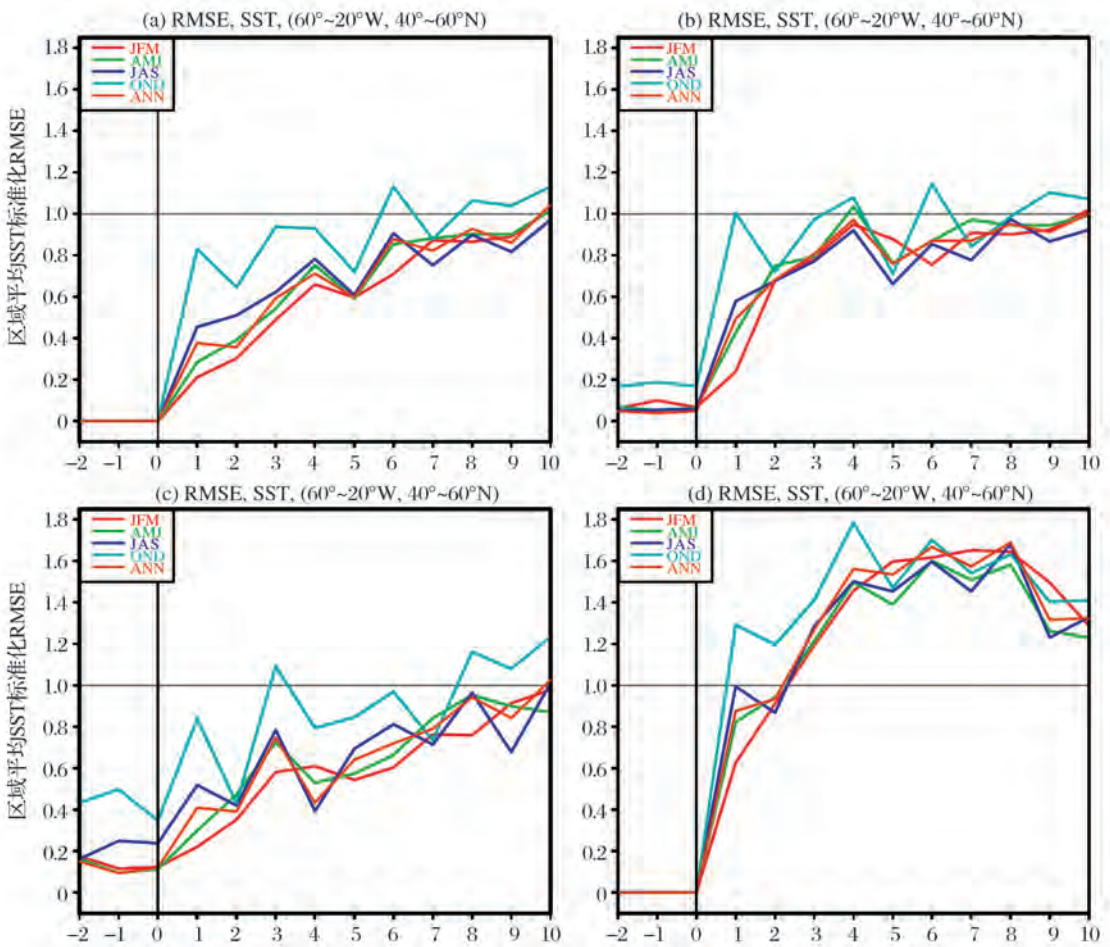


图 6 年平均以及不同季节平均的北大西洋 SSTA 的 RMSE 随预报时间的变化
Fig. 6 Temporal evolution of the RMSE of the annual mean and seasonal mean SSTA averaged over the North Atlantic region

(a) PERFO 预报; (b) Nudging 预报; (c) EnKF 预报; (d) 持续性预报
(a) PERFO forecast; (b) Nudging forecast; (c) EnKF forecast; (d) Persistence forecast

行了一组不同化 SSS 观测的 EnKF 预报试验,结果显示上层海洋热容量的同化误差增大、预报技巧降低,表明了同化上层盐度对北大西洋 SSTA 预报技巧的重要性。

4.3 SST 年代际预报技巧季节依赖性的成因

为什么北太平洋和北大西洋 SSTA 的年代际可预报性和预报技巧存在季节依赖性?其背后的物理机制分别是什么?为了回答这个问题,我们首先分析北太平洋和北大西洋 SSTA 的持续性。图 7 分别给出了控制试验模拟的北太平洋和北大西洋年平均和季节平均 SSTA 自相关系数随滞后时间(年)的变化。由图 7a 可见,北太平洋冬季平均 SSTA 的持续性在所有滞后时间上均明显高于其他季节。冬季平均 SSTA 滞后 1 年的相关系数超过 0.5,而其他季节

在第 1 年则迅速下降,特别是夏、秋两季第 1 年已降至 0.1 以下,之后一直低于 0.05。SSTA 持续性与可预报性和预报技巧在季节依赖上是相对应的;高(低)SSTA 持续性对应于高(低)可预报性和预报技巧,表明北太平洋 SSTA 可预报性与预报技巧的季节依赖性源于其持续性的季节依赖性。北大西洋 SSTA 持续性的季节依赖性与可预报性和预报技巧也有存在对应关系(图 7b)。在预报技巧最低的秋季,持续性也是最低,而其他季节包括年平均之间 SSTA 持续性的差别不大。可以发现,北大西洋海温持续性总体上要高于北太平洋,即使在北太平洋持续性最高的冬季,其相关系数也弱于北大西洋的春、夏、冬 3 个季节,这解释了为什么北大西洋的预报技巧(图 6)高于北太平洋(图 5)。

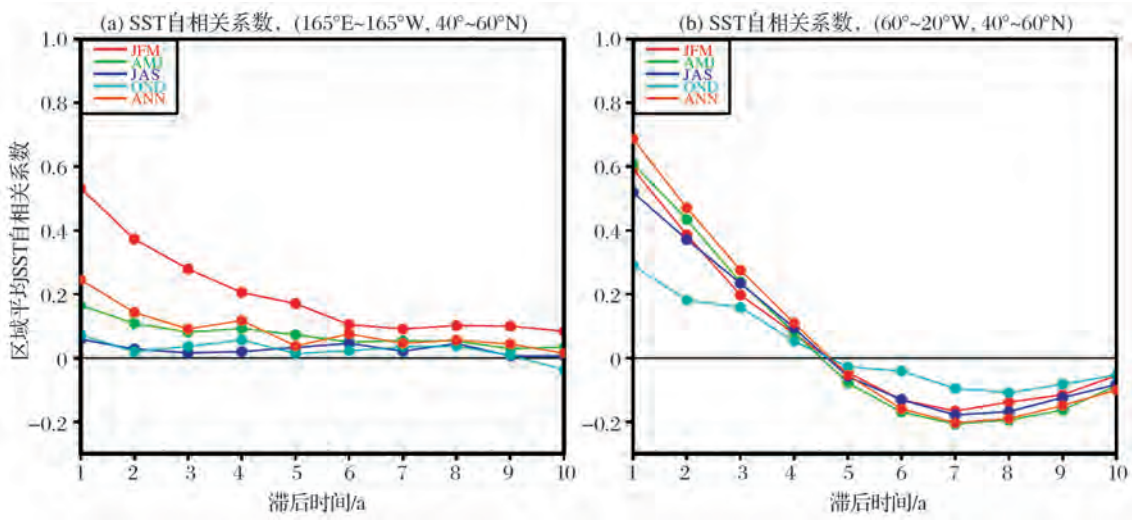


图 7 年平均以及季节平均的区域平均 SSTA 的超前滞后相关系数

Fig. 7 Lead-lag correlation coefficients of the annual mean and seasonal mean SSTA averaged over different regions

(a) 北太平洋区域; (b) 北大西洋区域; 横坐标为滞后时间(年)

(a) The North Pacific region; (b) The North Atlantic region. The abscissa represents the lag time (years)

为什么北太平洋 SSTA 在冬季的持续性明显高于其他季节?一种可能机制是北太平洋 SSTA 的再现机制。在北太平洋冬季,大气风场对海洋的混合作用最强,导致海洋混合层加深,因此冬季形成的海温异常可以扩展到很深的深度(100~200 m);而从春末开始,风场混合作用减弱,海洋混合层变浅(20~30 m),海温容易受表面通量影响,此时冬季形成的海温异常与大气隔绝处于夏季混合层之下;到了下一年冬季混合层再次加深,位于次表层的上一年冬季形成的海温异常将重新卷入混合层,从而影响到下一年冬季的 SST 异常。为了验证这一机制,我们分别计算了各个季节平均的 SSTA 和温度异常的

相关系数随超前—滞后时间(月)以及深度的变化(图 8)。由图 8a 可见,北太平洋冬季 SSTA 的再现机制在 FOAM 模式中表现得尤为明显。冬季平均 SSTA 和各个深度的海温有非常显著的正相关,这一正相关在所有季节都非常显著,而且可以延伸到 150 m 以下。从春末开始直到秋季,表层 50 m 以上的海温和冬季 SSTA 的相关性明显减弱,但到了第 2 年冬季,与表层海温的正相关又重新建立。表层海温的再现过程持续到第 4 年左右开始减弱,而与次表层海温的相关到 6~7 年仍然比较显著,显示了明显的 SSTA 再现机制。然而,北太平洋其他季节平均 SSTA 和海温的相关仅仅存在明显的同时性相

关,且其显著区域局限在 50 m 以上。海温相关随深度—季节的变化特征与混合层深度的季节变化是相联系的。如图 9a 所示,模式中混合层深度最深出现在 1~4 月,对应了表层 SSTA 正相关以及最大可预报性出现的时间。和观测相比,两者的季节变化特征是一致的,但 FOAM 模拟的混合层深度相较观测

要深一些。利用了 SODA2.1.6 资料^[38]进行了同样的计算,结果也显示了冬末春初的再现机制最强,但和 SSTA 显著正相关的区域向下延伸的范围比 FOAM 模拟的浅,持续时间也要短 2 年左右,这可能是因为 FOAM 模拟的混合层深度相较观测要深,因此其再现机制要强于观测。

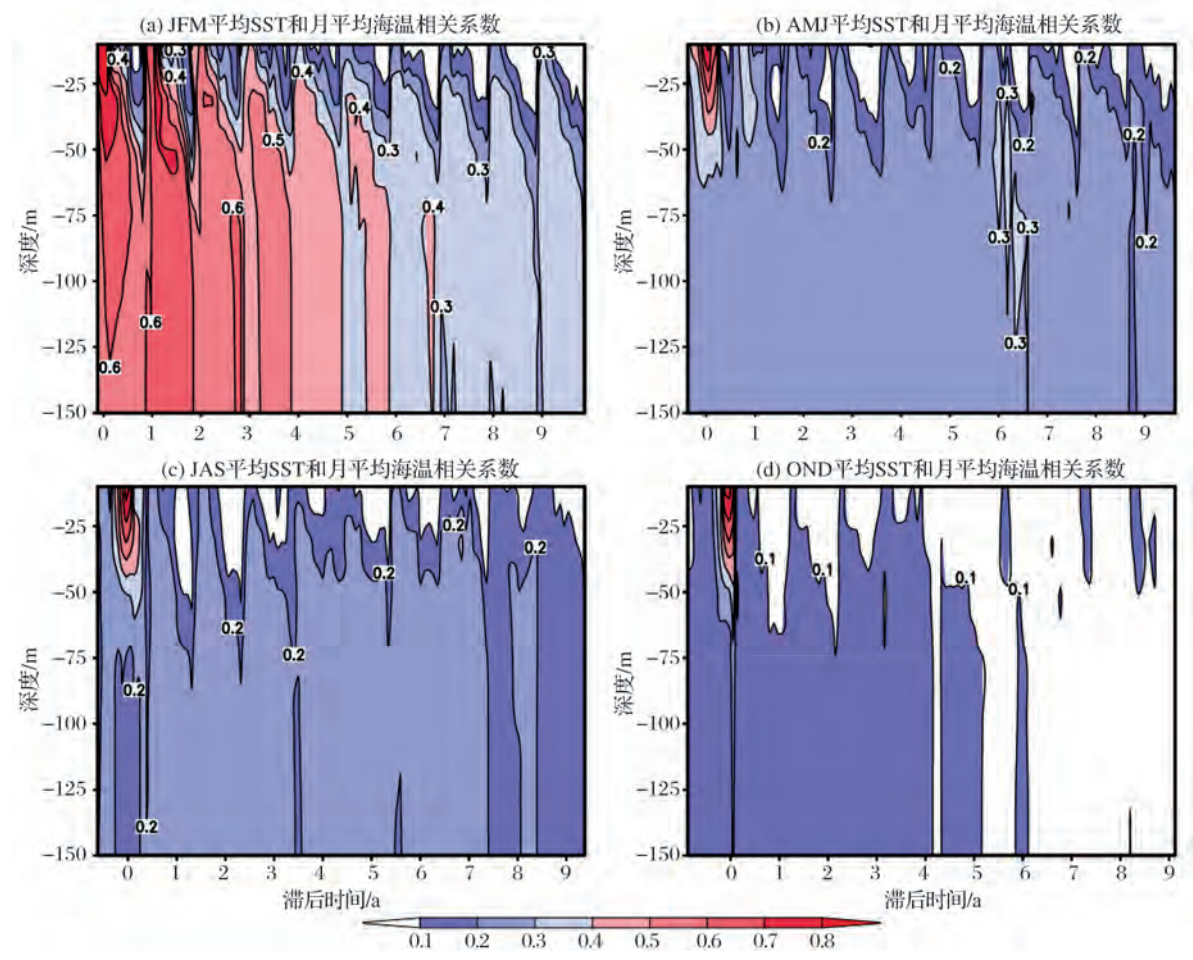


图 8 北太平洋季节平均 SSTA 和温度异常的相关系数随超前—滞后时间以及深度的变化
Fig. 8 Time-depth section of the lead-lag correlation coefficients between the seasonal mean and monthly mean SSTA averaged over the North Pacific region

(a) 冬季 (JFM); (b) 春季 (AMJ); (c) 夏季 (JAS); (d) 秋季 (OND); 零表示对应季节的中间月份, 正值表示温度滞后 SSTA
(a) Winter (JFM); (b) Spring (AMJ); (c) Summer (JAS); (d) Autumn (OND). The abscissa represents the lag time (years), zero indicates the middle month of the corresponding season and a positive value indicates the temperature lags the SSTA

图 10 给了各个季节北大西洋区域平均 SSTA 和每个超前—滞后月份以及各深度的温度异常的相关系数。图 10 显示了如下几个特点:①各个季节的平均 SSTA 和各深度的温度相关均较北太平洋高,尤其是前 5 年;②和北太平洋相比,4 个季节平均 SSTA 和各超前—滞后月份表层温度的相关均较高,不存在某些季节快速下降而后恢复上升的特征;③秋季平均 SSTA 与各层温度的相关系数平均而言较

其他 3 个季节低,同时其他 3 个季节和秋季表层温度之间的相关也存在较弱的降低,对应了秋季较低的可预报性和预报技巧;④从混合层深度的季节变化来看(图 9b),在混合层最浅的夏季,相关系数并未出现快速下降。上述特征表明 FOAM 模式中北大西洋 SSTA 的再现机制不明显,其 SSTA 可预报性和预报技巧的季节依赖性可能更多与其他过程(如 AMO)的季节变化有关。

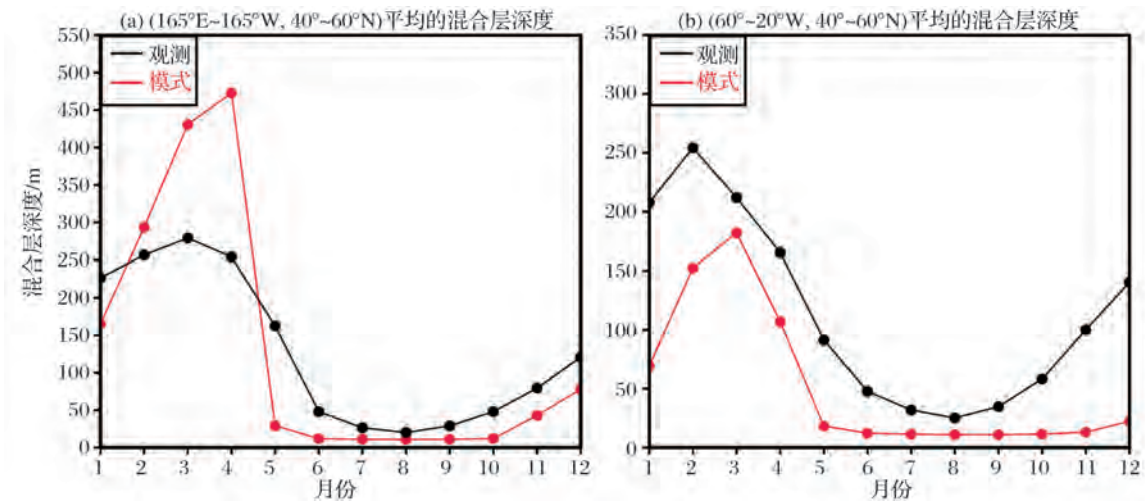


图 9 模式控制试验模拟 (红色) 和观测 (黑色) 的 (a) 北太平洋和 (b) 北大西洋区域平均的混合层深度 (单位:m) 的季节变化 (观测资料取自参考文献[37])

Fig. 9 Seasonal variation of the mixed layer depth (unit: m) averaged over (a) the North Pacific and (b) North Atlantic regions from control run (red) and observations (black) (The observations are taken from reference [37])

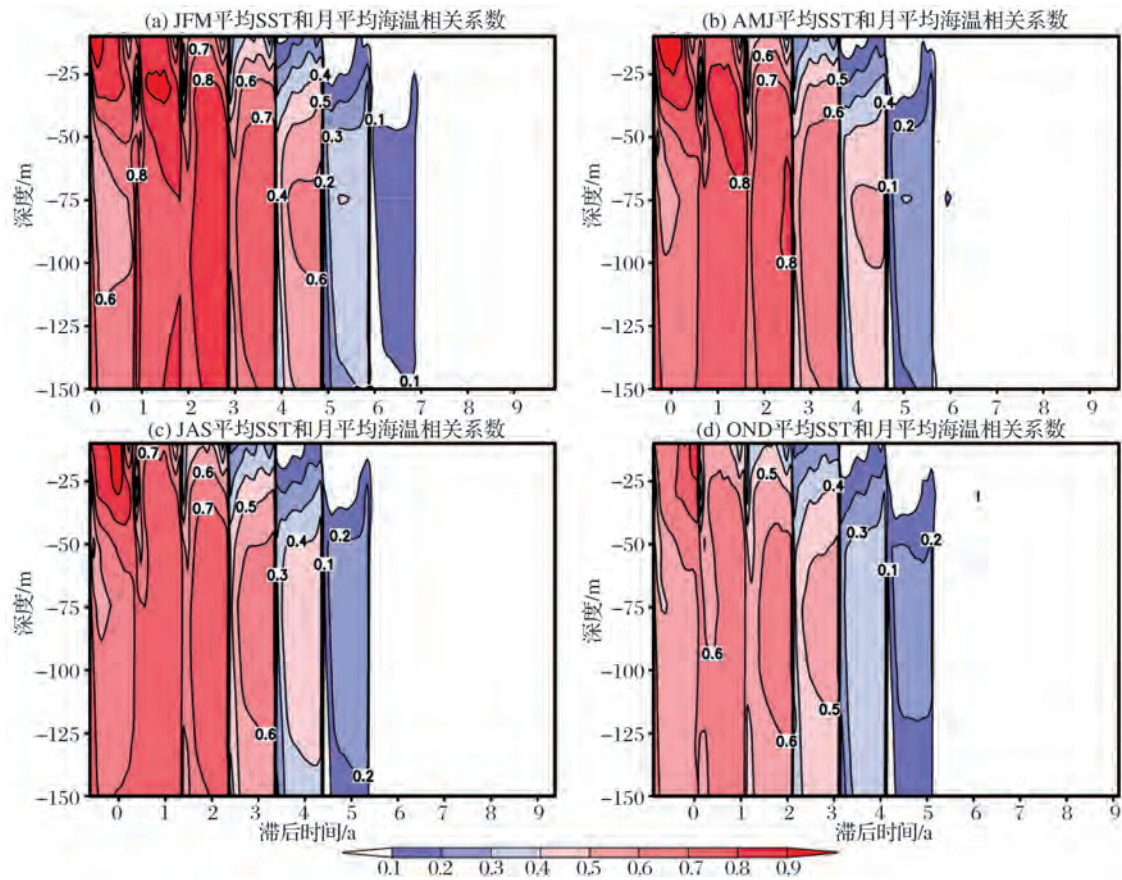


图 10 北大西洋季节平均的 SSTA 和温度异常的相关系数随超前—滞后时间以及深度的变化

Fig. 10 Time-depth section of the lead-lag correlation coefficients between the seasonal mean and monthly mean SSTA averaged over the North Atlantic region

(a) 冬季(JFM);(b) 春季(AMJ);(c) 夏季(JAS);(d) 秋季(OND);图中横坐标为滞后时间(年),零表示对应季节的中间月份,正值表示温度滞后 SSTA

(a) Winter (JFM); (b) Spring (AMJ); (c) Summer (JAS); (d) Autumn (OND). The abscissa represents the lag time (years), zero indicates the middle month of the corresponding season and a positive value indicates the temperature lags the SSTA

5 结论和讨论

本文基于一个全球耦合环流模式进行了长期控制试验,首先利用统计方法分析了模式年平均 SSTA 的年代际可预报性,并在理想模式框架下进行了3组动力预报试验,研究了北太平洋和北大西洋年平均海表面温度异常的年代际可预报性和预报技巧。统计方法的结果显示模式年代际可预报性较高的区域主要位于中高纬度北大西洋以及南大洋中高纬的南极绕极流区域,而在北太平洋的可预报性与北大西洋相比较弱。动力预报的结果验证了统计方法的结果。模式预报的北太平洋年平均 SSTA 的前3个 EOF 模态的时间系数的 RMSE 在3年左右即达到饱和,而北大西洋年平均 SSTA 的 EOF 第一和第二模态的可预报时间分别达到了8年和6年,表明北太平洋年平均 SSTA 在年代际尺度上的可预报性较低,显著弱于北大西洋。

基于控制试验和动力预报试验结果,进一步研究了北太平洋和北大西洋 SSTA 年代际可预报性与预报技巧的季节依赖性。统计方法的结果表明,北太平洋中西部区域($130^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{W}$, $30^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{N}$)冬季平均 SSTA 具有较高的年代际可预报性,其量值和北大西洋相当;而在其他季节平均 SSTA 的年代际可预报性明显低于北大西洋。动力预报的结果也表明冬季平均 SSTA 的预报技巧相较于其他季节均表现为最高,显示了和北大西洋相当的预报技巧;而在其他季节,预报误差在第3~4年即达到饱和,与年平均异常的预报技巧接近。这一结果表明,尽管已有研究指出北太平洋年平均 SSTA 在年代际尺度上的可预报性与预报技巧较低,但如果我们关注季节平均的预报,那么北太平洋某些季节平均 SSTA 的预报可能会具有和北大西洋相当的预报技巧。北大西洋 SSTA 的可预报性和预报技巧也显示了随季节变化的特征。统计方法和动力预报的结果均表明模式中北大西洋秋季平均 SSTA 与其他季节相比可预报性和预报技巧均是最低;虽然冬季平均表现为最高,但与春、夏季以及年平均相比无显著差别。

进一步分析结果表明,北太平洋 SSTA 年代际可预报性和预报技巧的季节依赖性归因于北太平洋冬季 SSTA 的再现机制,而这一再现机制源于北太平洋混合层显著的季节变化。由于北太平洋夏季混合层较浅,之前冬季形成的海温异常被隔绝在夏季混合层之下,并在随后的冬季重新被卷入混合层,使得年与年之间的冬季海温具有较高的持续性,因而

提供了较高的可预报性。北大西洋 SSTA 的可预报性和预报技巧的季节依赖性更多可能与其他过程(如 AMO)的季节变化有关。由于 AMO 是北大西洋 SST 变化的最主要模态,其变化与大西洋经向翻转流的变化密切相关,而北大西洋高盐水的形成是大西洋经向翻转流的驱动力之一,因此大西洋不同季节海表温度与各层海温超前一滞后的相关性可能和北大西洋高盐水潜沉有关,这一问题值得深入研究。

本文的试验结果表明,对于年代际气候预报,如果考虑所关注指标的季节平均的预报,而不仅仅是年平均,那么可能在某些季节会获得比年平均更高的预报技巧。尽管本文只是基于理想模式试验,但其背后的物理机制与观测具有一定的可比性,因此对实际预报具有一定的参考意义。理论上本文所采用的方法可以推广到实际观测,但由于实际的 SSTA 时间序列包含了温室气体如 CO_2 的影响导致的趋势,如何从观测的 SST 中有效提取 CO_2 的影响还需要进一步研究。

参考文献(References):

- [1] Meehl G A, Goddard L, Murphy J, *et al.* Decadal prediction: Can it be skillful? [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(10): 1 467-1 485.
- [2] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, *et al.* A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78 (6): 1 069-1 079.
- [3] Power S, Casey T, Folland C, *et al.* Interdecadal modulation of the impact of ENSO on Australia[J]. *Climate Dynamics*, 1999, 15 (5): 319-324.
- [4] Kushnir Y. Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions[J]. *Journal of Climate*, 1994, 7(1): 141-157.
- [5] Delworth T L, Mann M E. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere[J]. *Climate Dynamics*, 2000, 16(9): 661-676.
- [6] Boer G. A study of atmosphere-ocean predictability on long time scales[J]. *Climate Dynamics*, 2000, 16(6): 469-477.
- [7] Boer G. Long time-scale potential predictability in an ensemble of coupled climate models[J]. *Climate Dynamics*, 2004, 23(1): 29-44.
- [8] Griffies S M, Bryan K. A predictability study of simulated North Atlantic multidecadal variability[J]. *Climate Dynamics*, 1997, 13 (7/8): 459-487.
- [9] Collins M. Climate predictability on interannual to decadal time scales: The initial value problem[J]. *Climate Dynamics*, 2002, 1(8): 671-692.
- [10] Kumar A, Peng P, Chen M. Is there a relationship between po-

- tential and actual skill? [J]. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(6): 2 220-2 227.
- [11] Smith D, Cusack S, Colman A, *et al.* Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global circulation model[J]. *Science*, 2007, 317(5 839): 796-799.
- [12] Keenlyside N, Latif M, Jungclauss J, *et al.* Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector[J]. *Nature*, 2008, 453(7 191): 84-88.
- [13] Newman M. An empirical benchmark for decadal forecasts of global surface temperature anomalies[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(14): 5 260-5 269.
- [14] Torrence C, Webster P J. The annual cycle of persistence in the El Niño/Southern Oscillation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1998, 124(550): 1 985-2 004.
- [15] Mu M, Duan W S, Wang B. Season-dependent dynamics of non-linear optimal error growth and El Niño-Southern Oscillation predictability in a theoretical model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D10113, doi:10.1029/2005JD006981.
- [16] Duan W S, Wei C. The “spring predictability barrier” for ENSO predictions and its possible mechanism: Results from a fully coupled model[J]. *International Journal of Climatology*, 2012, 33(5): 1 280-1 292.
- [17] Namias J, Born R M. Temporal coherence in North Pacific sea surface temperature patterns[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(30): 5 952-5 955.
- [18] Namias J, Born R M. Further studies of temporal coherence in North Pacific sea surface temperature patterns[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(6): 797-798.
- [19] Deser C, Phillips A S, Hurrell J W. Pacific interdecadal climate variability: Linkages between the tropics and North Pacific in boreal winter since 1990[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(16): 3 109-3 124.
- [20] An S I, Wang B. The forced and intrinsic low-frequency modes in the North Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(6): 876-885, doi:10.1175/JCLI-3298.1.
- [21] Ding R Q, Li J P. Decadal and seasonal dependence of North Pacific SST persistence[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D01105, doi: 10.1029/2008JD010723.
- [22] Watanabe M, Kimoto M. On the persistence of decadal SST anomalies in the North Atlantic[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(16): 3 017-3 028.
- [23] Timlin M S, Alexander M A, Deser C. On the reemergence of North Atlantic SST anomalies[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(181): 2 707-2 712.
- [24] Alexander M A, Deser C. A mechanism for the recurrence of wintertime midlatitude SST anomalies[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1995, 25(1): 122-137.
- [25] Wen C H, Xue Y, Kumar A. Seasonal Prediction of North Pacific SSTs and PDO in the NCEP CFS Hindcasts[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(171): 5 689-5 710.
- [26] Duan W S, Wu Y J. Season-dependent predictability and error growth dynamics of Pacific Decadal Oscillation-related sea surface temperature anomalies[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 44(314): 1 053-1 072, doi: 10.1007/s00382-014-2364-5.
- [27] Wu Y, Duan W, Rong X. Seasonal predictability of sea surface temperature anomalies over the Kuroshio-Oyashio extension: Low in summer and high in winter[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121(9), doi:10.1002/2016JC011887.
- [28] Jacob R. Low Frequency Variability in A Simulated Atmosphere ocean System[D]. Wisconsin, USA: University of Wisconsin, 1997.
- [29] Tobis M, Schafer C, Foster I, *et al.* FOAM: Expanding the horizons of climate modeling[C] // Supercomputing, ACM/IEEE 1997 Conference, Supercomputing, ACM/IEEE 1997 Conference. 1997.
- [30] Liu Z, Kutzbach J, Wu L. Modeling climate shift of El Niño variability in the Holocene[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(15): 2 265-2 268.
- [31] Wu L, Liu Z, Gallimore R, *et al.* Pacific decadal variability: The tropical mode and the North Pacific mode[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(8): 1 101-1 120.
- [32] Liu Z, Liu Y, Wu L, *et al.* Seasonal and long-term atmospheric responses to reemerging North Pacific Ocean variability: A combined dynamical and statistical assessment[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(6): 955-980.
- [33] Liu Y, Liu Z, Zhang S, *et al.* Ensemble-based parameter estimation in a coupled GCM using the adaptive spatial average method[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(11): 4 002-4 014.
- [34] Lu F, Liu Z, Liu Y, *et al.* Understanding the control of extratropical atmospheric variability on ENSO using a coupled data assimilation approach[J]. *Climate Dynamics*, 2016, doi: 10.1007/s00382-016-3256-7.
- [35] Anderson J L. An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation[J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(12): 2 884-2 903.
- [36] Anderson J L. A local least squares framework for ensemble filtering[J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(4): 634-642.
- [37] White W B. Design of a global observing system for gyrescale upper ocean temperature variability[J]. *Progress in Oceanography*, 1995, 36(3): 169-217.
- [38] Carton J A, Giese B S. A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA)[J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(8): 2 999-3 017.

Seasonal Dependence of the North Pacific and North Atlantic SST Predictability and Forecast Skill^{*}

Rong Xinyao¹, Liu Zhengyu^{2,3}, Liu Yun², Duan Wansuo⁴

(1. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Center for Climatic Research, University of Wisconsin-Madison, Madison Wisconsin, USA*; 3. *Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*; 4. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: In this paper, the decadal predictability and forecast skill of the Sea Surface Temperature Anomalies (SSTA) in the North Pacific and North Atlantic Ocean were investigated by conducting three sets of perfect model forecast experiments using a global coupled general circulation model. The results show that the annual mean SSTA in the North Pacific is less predictable on decadal time scale, with the forecast skill notably weaker than that of the North Atlantic. By analyzing the predictability and forecast skill of seasonal mean SSTA, it is found that the decadal predictability and forecast skill of the winter mean (JFM) SSTA in the central and western North Pacific are significantly higher than those of other seasons, and the magnitude is comparable with that of the North Atlantic. The predictability and forecast skill of the North Atlantic SSTA also show seasonal variations. Further analysis indicates that the seasonal dependence of the SSTA decadal predictability and forecast skill in the North Pacific is due to the winter-to-winter reemergence mechanism of SSTA in the North Pacific, which results from the seasonal variation of the mixed layer depth of the North Pacific Ocean. While the seasonal dependence of the North Atlantic SSTA predictability and forecast skill might be related to seasonal variations of other processes, such as the Atlantic Decadal Oscillation. The results of this paper suggest that for decadal climate prediction, if the forecast skill of the seasonal mean is taken into account, we might obtain higher than annual mean forecast skill for some seasons.

Key words: North Pacific; North Atlantic; Decadal prediction; Seasonal dependence; Coupled GCM.

^{*} **Foundation item:** Project supported by the R&D Special Fund for Public Welfare Industry (Meteorology) “Development and research of ensemble decadal climate prediction system based on global climate models FGOALS-s, CAMS and CESM” (No. GYHY201506012); The National Basic Research Program of China (No. 2012CB955201).

First author: Rong Xinyao (1979-), male, Sanya City, Hainan Province, Associate professor. Research areas include climate numerical simulation and prediction. **E-mail:** rongur@camsma.cn