

# 延伸期预报中大气初值与海温边值的相对作用<sup>\* 1</sup>

汪栩加<sup>1</sup> 郑志海<sup>2</sup> 封国林<sup>2,3</sup> 顾伯辉<sup>1</sup> 赵玉衡<sup>1,2</sup>WANG Xujia<sup>1</sup> ZHENG Zhihai<sup>2</sup> FENG Guolin<sup>2,3</sup> GU Bohui<sup>1</sup> ZHAO Yuheng<sup>1,2</sup>

1. 兰州大学大气科学学院, 兰州, 730000
2. 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京, 100081
3. 珠海区域气候-环境-生态预测预警协同创新中心, 珠海, 519087

1. *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*2. *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*3. *Zhuhai Joint Innovative Center for Climate-Environment-Ecosystem, Zhuhai Key Laboratory of Dynamics Urban Climate and Ecology, Future Earth Research Institute, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China*

2015-10-23 收稿, 2016-10-08 改回.

汪栩加, 郑志海, 封国林, 顾伯辉, 赵玉衡. 2017. 延伸期预报中大气初值与海温边值的相对作用. 气象学报, 75(1):111-122

**Wang Xujia, Zheng Zhihai, Feng Guolin, Gu Bohui, Zhao Yuheng. 2017. The relative roles of initial atmospheric condition and lower boundary condition of SST for extended forecast. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(1):111-122**

**Abstract** The initial condition and lower boundary forcing are the main sources of the predictability in extended range, and they play different roles in different time scales and different regions. Using the latest version of BCC\_AGCM, four experiments with different combinations of atmospheric initial condition and sea surface temperature (SST) boundary forcing are designed in this study to investigate the roles of atmospheric initial condition and SST boundary forcing in the extended prediction over different regions around globe. Results show that the skills in extended prediction are strongly dependent on initial condition at lead times less than three weeks, and different initial conditions with the same boundary conditions lead to significant differences in the prediction skills at sub-monthly time scales. However, the initial condition can still provide some useful information for the prediction exceeding monthly time scales. From a global perspective, SST boundary forcing affects the prediction skill at lead times of more than one week. It will take roughly four to five pentads for boundary conditions to have the same effect as initial conditions have on the predictability of geopotential height at 850 hPa in the tropics, and this lag time will be longer in other regions. Similar results can also be found in the geopotential height prediction at 500 hPa except that the lag time is 5 pentads in the northern hemisphere and 6 pentads in other regions, which means the above effects in the upper atmosphere lag behind that in the lower atmosphere by one to two pentads. In the region of East Asia, the contribution of boundary forcing to the prediction skill appears on the second pentad accompanied with significant improvements in forecast at this time. As for the extended forecast, impacts of the lower boundary forcing are concentrated in low-latitude regions, and are more stably shown in the forecast of geopotential height at 500 hPa. Significant improvements caused by the boundary forcing are shown in the forecast after the 5th pentad. The results indicate that both initial conditions and boundary conditions are very important in extended forecast, and understanding the relative roles of initial and boundary conditions in the extended prediction is the basis to improve forecast skills.

**Key words** Extended range forecast, Initial conditions, Boundary conditions, BCC\_AGCM

\* 资助课题: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB430204)、国家自然科学基金项目(41475096、41530531)、国家科技支撑计划项目(2015BAC03B04)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306021)。

作者简介: 汪栩加, 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, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: zhengzh@cma.gov.cn

**摘要** 初始条件记忆和下垫面条件是延伸期可预报性的主要来源,它们在不同时段、不同区域的相对作用存在明显不同。利用中国国家气候中心最新一代大气环流模式 BCC\_AGCM,设计了由 4 组不同大气初值与海温边值构成的组合试验,研究了(大气)初值与(海温)边值对全球不同区域延伸期预报的相对作用。结果显示,模式预测技巧在 3 周以内强烈依赖于初值。在相同的边值条件强迫下,不同初值在月内尺度上的预测技巧差异非常明显,且在更长的时间尺度上,初值仍然能够提供一定的预测信息。从全球来看,边值强迫对预测技巧的影响从一周左右开始。在低层的 850 hPa 高度场上,边值的作用在热带地区于第 4—5 候与初值相当,其他区域的边值影响达到与初值相当的时间滞后于热带地区;在北半球 500 hPa 高度场上,边值的作用在热带地区第 5 候前后达到与初值作用相当,其他区域这个时间则推迟至第 6 候前后,比对低层的影响时间滞后 1—2 候;对于东亚地区而言,边值的贡献在第 2 候就已显现,对预测技巧产生了明显的改进。在延伸期尺度上,边值强迫主要作用的区域为低纬度区域,且对 500 hPa 高度场的影响更为稳定,在该区域第 5 候以后有较为明显的改进。初值与边值对延伸期预报都具有相当重要的作用,认识初、边值条件的相对作用能够为延伸期预报的改进奠定基础。

**关键词** 延伸期预报, 初值, 边值, BCC\_AGCM

**中图法分类号** P435

## 1 引言

大气状态取决于大气内部的自然变率以及外部强迫的变化。尽管大气是一个非常复杂的非线性系统,其内部存在随机性,但是依然存在一定的可预报性。气候预测实际上是初值和边值的问题,根据误差来源的不同,Lorenz(1975)划分了两类可预报性问题,第 1 类是初始误差随时间增长,造成预报结果的不确定。这类可预报性由于大气系统的不稳定,通过非线性相互作用使得初始场微小的扰动将随着时间而放大,导致预报失败,逐日的天气预报属于此类问题;第 2 类则是大气系统对于边界条件响应的问题,这类可预报性问题中初始场的信息已基本消失,而大气状态又不完全由边界条件决定,短期气候预测通常属于此类问题。

延伸期预报处于天气预报与短期气候预测之间,这时大气的初值信息不断衰减,而外强迫的作用逐渐显现,其可预报性来源于初值与边值的共同作用(Huang, et al, 1992, 1993; 郑志海等, 2009, 2012; Zheng, et al, 2013; Feng, et al, 2013; 杨秋明, 2016)。月动力延伸预报不仅要考虑初值的影响,同时边值(海温等外强迫因子)也需要考虑(Mo, et al, 1991; Hall, et al, 2001; Roads, et al, 2001)。Mo 等(1991)利用气候海温与观测海温分别驱动大气模式发现,当海温驱动大气为主时,海温异常对于预测结果的贡献为正,当大气强迫海温为主时,海温异常对预测的贡献为负,就总体而言,海表温度(SST)产生的预测技巧与初值产生的预测技巧对月平均环流的贡献相当。Reichler 等(2005a, 2005b)将所用模式假设为完美模式,分析了大气初值与陆面及海洋

边值对热带地区月平均预测的相对作用,通过给定不同初值与边值组合试验,发现大气初值在 3 周以下占据主导作用且其至少持续至 8 周;当预报时间超过 3 周时,在热带地区,可预报性的主要贡献来自下边界强迫。同时,对不同地区而言,初值与边值对可预报性影响也不相同。对热带地区, Kang 等(2010)通过数值试验发现,利用海-气耦合模式对 MJO(Madden-Julian Oscillation)的预测技巧优于单独的大气模式,并进一步通过改进初值集合预报方案提高了对 MJO 的模拟能力; Abhilash 等(2014)和 Liu 等(2014)评估了印度季风区以及全球主要季风区的次季节预测技巧,发现实际预测技巧与季风的大尺度特征密切相关, Liu 等(2015)进一步评估了亚洲季风区夏季的季节内降水的预测技巧,发现模式技巧存在明显的区域性差异,且在海洋上的预测技巧优于陆地。DeMott 等(2014)使用多个版本的海-气耦合模式与大气模式进行比较也同样验证了耦合模式具有更好的季节内振荡(ISO)模拟能力; Charlton 等(2004)使用一个高分辨率的数值天气预报模式进行了数值试验,发现当对流层的大气初值相同而平流层的大气初值不同时,北极涛动(AO)的结构会发生显著的改变, Stockdale 等(2015)研究发现他们对北极涛动模拟技巧主要来自于大气初值信息,而边值的影响主要集中在冬季; Chang 等(2000)利用 GEOS-2 GCM 研究了初值和边值对北半球冬季预测技巧的影响,发现边值强迫对太平洋-北美型(PNA)遥相关地区的预测技巧有显著的提高能力。

作为延伸期可预报性的主要来源,初始条件记忆和海-气相互作用在不同时段、不同区域的相对作

用存在明显不同。虽然初始条件的影响随着预报时效的延长会不断衰减,但由于其不同纬度、不同区域衰减的速度存在不同,对延伸期预报的作用也存在差异;同时,缓变的海表温度在通过大气环流影响其他区域时,大气系统的响应需要一定的时间,这种响应时间也存在明显的地区差异。因此,理解大气初始条件在延伸期预报的相对作用仍然是延伸期预报中的一个重要问题,虽然已经利用模式对不同时间尺度大气初始条件的敏感程度以及在不同时段及区域的作用进行了大量的研究,但是研究主要集中在热带等区域或季节以上尺度,针对中国业务预测模式对于东亚地区延伸期预测的研究较少。本研究利用中国国家气候中心最新的大气环流模式 BCC\_AGCM,根据初值与边值的不同配置设计了 4 组试验方案,在新的模式条件下分析和对比初、边值条件对延伸期预报的相对贡献,并特别对东亚地区的相对贡献进行了分析,考虑到理想试验结果在实际业务中是否具有实用性的问题,将试验的结果和实际观测进行对比,分析模式潜在的可预报性工作将另文展开。

## 2 预报模式及数据

### 2.1 BCC\_AGCM 模式简介

BCC\_AGCM 是由中国国家气候中心开发的全球大气环流谱模式,为中国国家气候中心新一代气候系统模式 BCC\_CSM(Wu, et al, 2013; 汪栩加等, 2015) 的大气分量,该模式的动力框架以 NCAR CAM3 模式为基础,水平分辨率为 T106 波,垂直方向分为 26 层,预报时效延长至 50 d。中国国家气候中心自 2005 年起开始发展第 2 代大气环流谱模式,该模式引入参考大气和参考面气压,改进了对流参数化等物理过程(Zhang, et al, 2005; Wu, et al, 2008),并对模式边界层进行了处理,加入了新的感热和潜热通量计算方案(董敏等, 2009),采用了 Wu 等(2004)提出的雪盖参数化方案。其他模式物理参数化方案,如辐射过程传输、陆面过程、边界层过程等与 CAM3.0 相同(颀卫华等, 2010)。有关模式动力框架的详细介绍参见(Wu, et al, 2008, 2010)。

研究表明, BCC\_AGCM 对天气尺度的演变过程具有 4—7 d 的预报能力(颀卫华等, 2010); 董敏等(2009)的研究表明该模式对热带大气季节内振荡有较强的预测能力,比 CAM3.0 模式有明显改进;

Dong 等(2012)发现该模式对极端温度事件及其趋势变化也具有较强的预测能力。BCC\_AGCM 能够很好地再现与观测一致的平流层纬向平均风场、温度场的分布特征和季节变化过程(陆春晖等, 2014),能够较好地整体上反映出欧亚区域冬季气温的变化趋势,抓住东亚冬季风区气温年际变化的主要空间模态,对该区域冬季气温具有一定的预测技巧(王皓等, 2014)。

### 2.2 试验方案及数据方法

试验选取时段为 1991—2000 年,以每年的 12 月 15 日为起报时间,每次试验积分至次年的 1 月 31 日。集合预报方案为滞后平均方案(LAF, Lag average forecasting),大气初始条件采用了 13 个集合预报成员,即 12 月 12—14 日每日 4 时次(00、06、12、18 时,世界时,下同)及 15 日 00 时的初值。大气初始场取自美国国家环境预报中心(NCEP)第 2 套一日 4 次再分析资料,包括地面气压和多层次的大气温度、风场,水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ,垂直 1000—10 hPa 分为 17 层,将这些资料插值到模式的网格点和层次上。海表温度强迫场采用 NOAA 最优插值海表温度资料 OISST。设计了 4 组对比试验(表 1): (1) IOBO 方案,大气初值、海温边值均采用观测值; (2) IOBC 方案,大气初值采用观测值,海温边值采用气候值; (3) ICBO 方案,大气初值采用气候值,海温边值采用观测值; (4) ICBC 方案,大气初值、海温边值均采用气候值。

为了对试验结果进行对比分析,采用 NCEP 第 2 套再分析数据与模式结果进行对比。模式输出结果分辨率约为  $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ ,并用双线性差值将模式结果插值到再分析数据同等分辨率( $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ )。

为了分析初值集合预报对预测技巧存在的影响,从 IOBO 方案结果中选取 1991 年 12 月 15 日起报的该组试验,该试验包含了 13 个集合成员,计算集合预报与各个集合成员全球 500 hPa 距平相关系数(ACC)时间演变特征(图略)。集合成员前 10 d 以前预测技巧相对较为理想,但预测技巧衰减很快,而集合预报的预测技巧相对于集合中单个成员更为稳定,尤其在 10 d 以后,集合预报有效地抑制了预测技巧的衰减。总体来说集合预报方案对于逐日的预测技巧存在明显提高,下文主要围绕各组试验的集合预报结果来进行分析。

### 3 结果分析

#### 3.1 500 hPa 高度场逐日预测技巧

为了分析初值和边值对不同区域在不同时间尺度、不同层次的相对作用,首先给出了4种试验方案在各区域平均的500 hPa高度场逐日预报与实况的距平相关系数(图1),检验分为5个区域,分别为全球、热带外北半球地区( $20^{\circ}$ — $90^{\circ}$  N,  $0^{\circ}$  E— $180^{\circ}$ — $0^{\circ}$  W)、热带外南半球地区( $20^{\circ}$ — $90^{\circ}$  S,  $0^{\circ}$  E— $180^{\circ}$ — $0^{\circ}$  W)、热带地区( $20^{\circ}$  N— $20^{\circ}$  S,  $0^{\circ}$  E— $180^{\circ}$ — $0^{\circ}$  W)和东亚地区( $4^{\circ}$ — $53^{\circ}$  N,  $73^{\circ}$ — $150^{\circ}$  E)。从全球来看(图1a),对于两周以下的预报 IOBO 与 IOBC 方案在全球表现一致,具有较高的预测技巧,而 ICBO 与 ICBC 方案则几乎没有表现出技巧。这说明此时初值对于模式的逐日天气预测技巧起决定性的作用,而海温的作用并未体现;而对于超过两周的预报,

IOBO 与 IOBC 方案都表现出一定的预测技巧,但超过两周的逐日预报的技巧变化较不稳定且实际意义不大。因此,在下文将进行候平均结果的具体分析。从不同区域来看,一周以下的逐日预报在热带外地区皆表现出较高的预测技巧,南、北半球(图1c、d)之间也表现出一定的差异,但热带地区(图1b)的预测技巧要低于热带外地区,这一方面与低纬度地区的低频波特征有关,其振幅一般较小,且与热带地区对流活动较强也有一定关系,另一方面很大程度上也与海洋(陆地)面积有关;对于超过一周的预报,热带地区表现出比其他区域更高的预测技巧;东亚地区(图1e)10 d以下的预报技巧衰减速度最快,10 d以上的预报技巧变化极不稳定,说明了东亚地区预报的难度以及研究的必要性。

均方根误差(RMSE)反映了预报误差的大小,图2给出了各区域500 hPa高度场逐日预报与观测

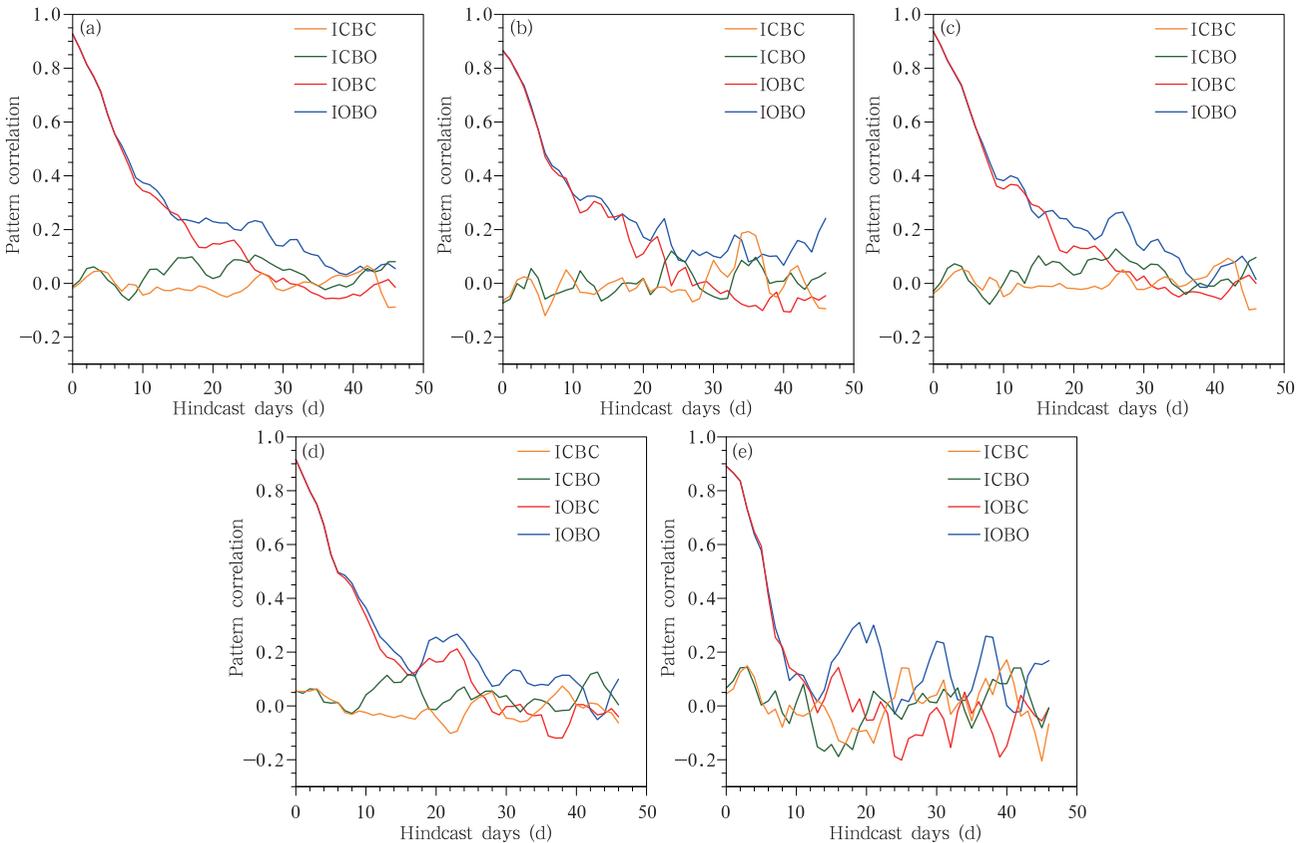


图1 500 hPa 高度场逐日距平相关系数(10 a 平均)

(a. 全球, b. 热带, c. 北半球热带外, d. 南半球热带外, e. 东亚)

Fig. 1 Anomaly correlations of daily 500 hPa height (10 a average)

(a. globe, b. tropics, c. northern hemisphere, d. southern hemisphere, e. East Asia)

的均方根误差,可以看出,不同方案在不同区域的误差演变特征有所不同,但基本都在 10 d 左右增长到饱和。对于一周以下的预报,误差快速增长,IOBO 与 IOBC 方案在不同区域的均方根误差都基本一致,ICBO 与 ICBC 方案的均方根误差也较为一致,但相对前两种方案误差偏大,接近饱和,这与距平相关系数的结果较为一致。由于初始误差的快速增长,预测技巧也快速衰减,表明此时的预测技巧主要来自于初值的贡献;对于超过一周的预报,误差继续增长至 10 d 左右接近饱和,不同方案间的误差差距也逐渐变小,趋于一致。从全球尺度来看,一方面大气初值为观测值的两组试验的预报误差上限小于于大

气初值为气候值的两组试验,这说明准确初值的信息可以减少预报误差;另一方面,边值为观测值的两组试验的预报误差上限分别小于对应初值相同而边值为气候值的两组试验,表明在确定的初始条件下,准确的边值可以减少预报误差。在 10—30 d 的尺度上,在热带外区域,IOBO 方案的均方根误差总体皆要小于 IOBC,在热带地区尤为明显,这也与距平相关系数的结果较为一致。从空间上来看,热带地区的均方根误差远小于其他区域,预报误差最大的区域为北半球。东亚地区误差增长迅速,在一周后达到第 1 次峰值,但其后误差变化幅度仍然较大,导致了东亚地区逐日预报技巧不稳定。

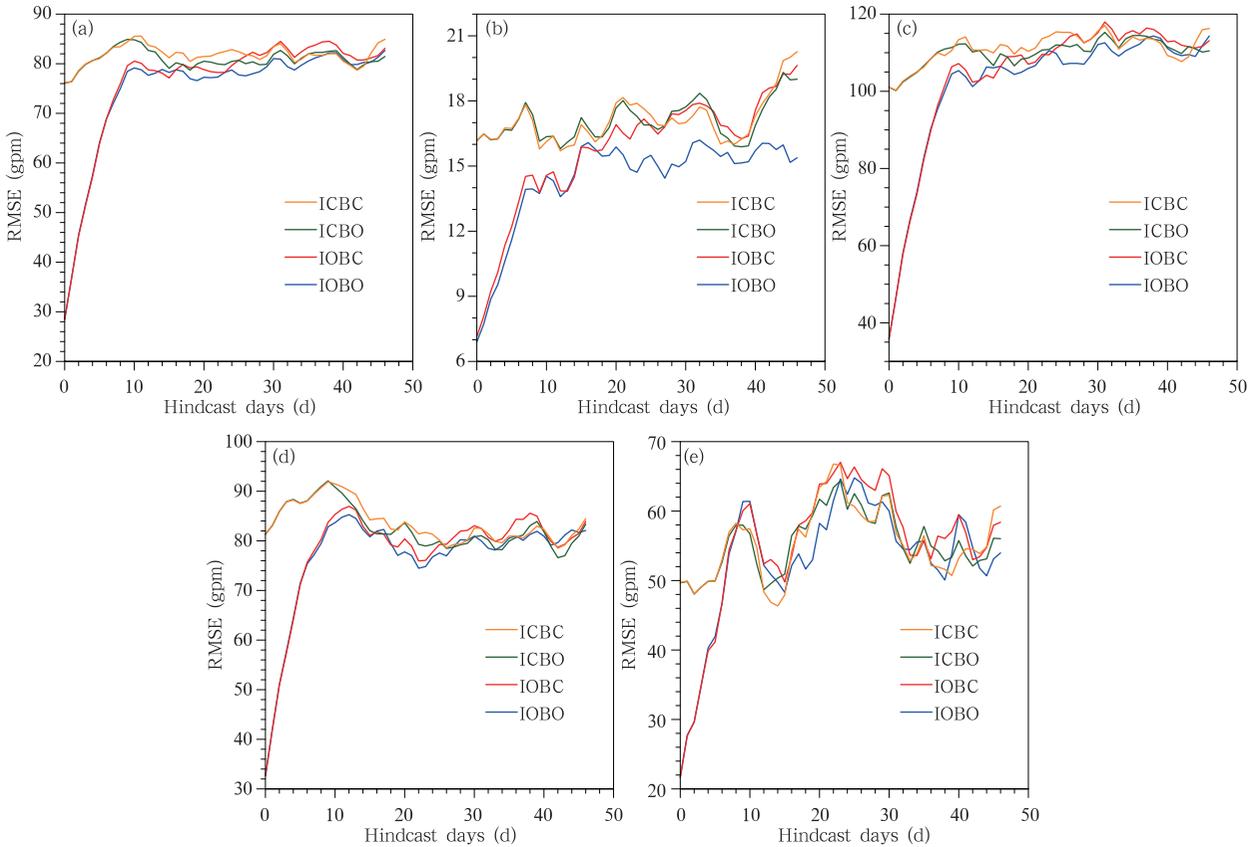


图 2 同图 1 但为均方根误差(10 a 平均)

Fig. 2 Same as Fig. 1 but for RMSE (10 a average)

### 3.2 不同层次高度场候平均预测技巧

前文给出了大气初值及海温边值对 500 hPa 高度场逐日预测技巧的影响,但是逐日预报包含了大量的天气尺度的高频信息,而延伸期预报关注的重点是尺度相对更大的低频信息。对于延伸期预报来说,海温提供了一个相对低频的外强迫信号,其对不

同层次大气的作用也有所不同,因此,首先分析海温强迫对低层 850 hPa 高度场的候平均预测技巧的相对作用。图 3、4 分别为各区域平均的 850 hPa 高度场 1—9 候逐候预测与观测的距平相关系数、均方根误差,逐候的预测技巧演化特征基本与逐日的演化类似,但在滤去天气尺度的信息后,预测技巧优于逐

日的结果,而预测误差的减小有效地抑制了预测技巧的快速衰减。IOBO 与 IOBC 方案在第 1—2 候的预测技巧基本一致,此后可以看到海温对预报技巧的贡献开始显现,导致 IOBC 方案预测技巧的衰减速度大于前者,这说明 IOBO 方案在第 2—9 候预测技巧优势主要来自于海温的贡献,这与 Reichler 等 (2003) 的结果基本一致;不同的是,对比 IOBC 与 ICBO 方案可以发现,海温的相对贡献在 3 周左右北半球就已超过初值的相对贡献,相比 Reichler 等 (2003) 的结果提前了 1 周左右;从 ICBO 与 ICBC 方案结果可以更为清楚地看出海温的相对贡献在第 2 候就已显现。在热带外地区,比较 ICBO 与 ICBC 方案结果也能发现类似的特点,而热带地区在第 2 候海温的作用就已显现,这表明热带地区大气受海温强迫的影响更为明显。从东亚地区来看,IOBO 方案在第 2 候开始对预测技巧产生了比较明显的提高,这表明中国国家气候中心针对东亚地区对业务模式的改进工作 (Zhang, et al, 2005; Wu, et al,

2008) 较为成功。从均方根误差的对比可以看到,一方面相较逐日的预测误差,逐候的预测误差变化趋势类似,但相对较小且预测误差增长至饱和的时间变长;另一方面可以看到,对比 IOBO 与 IOBC、ICBO、ICBC 方案,可以明显地看到海温的相对贡献降低了预测误差。图 5、6 分别为各区域平均的 500 hPa 高度场 1—9 候逐候预测结果与观测的距平相关系数、均方根误差,与 850 hPa 高度场对比来看,不同方案间的差异在热带外区域基本类似。海温强迫对不同高度作用最大差异出现在热带地区,一方面在低层的 850 hPa 高度场,海温强迫的作用在第 1 候开始显现,在 500 hPa 高度场海温强迫的作用在第 2—3 候开始显现;另一方面海温强迫的作用在 850 hPa 高度场在第 4 候前后逐渐超过初值的作用,在 500 hPa 高度场于第 6 候前后逐渐超过初值的作用。从东亚地区来看,海温对 850 hPa 预测技巧的改进更为稳定。总体来说,从候平均的结果来看,海温对低频大气的作用更加明显,且大气低频分量前

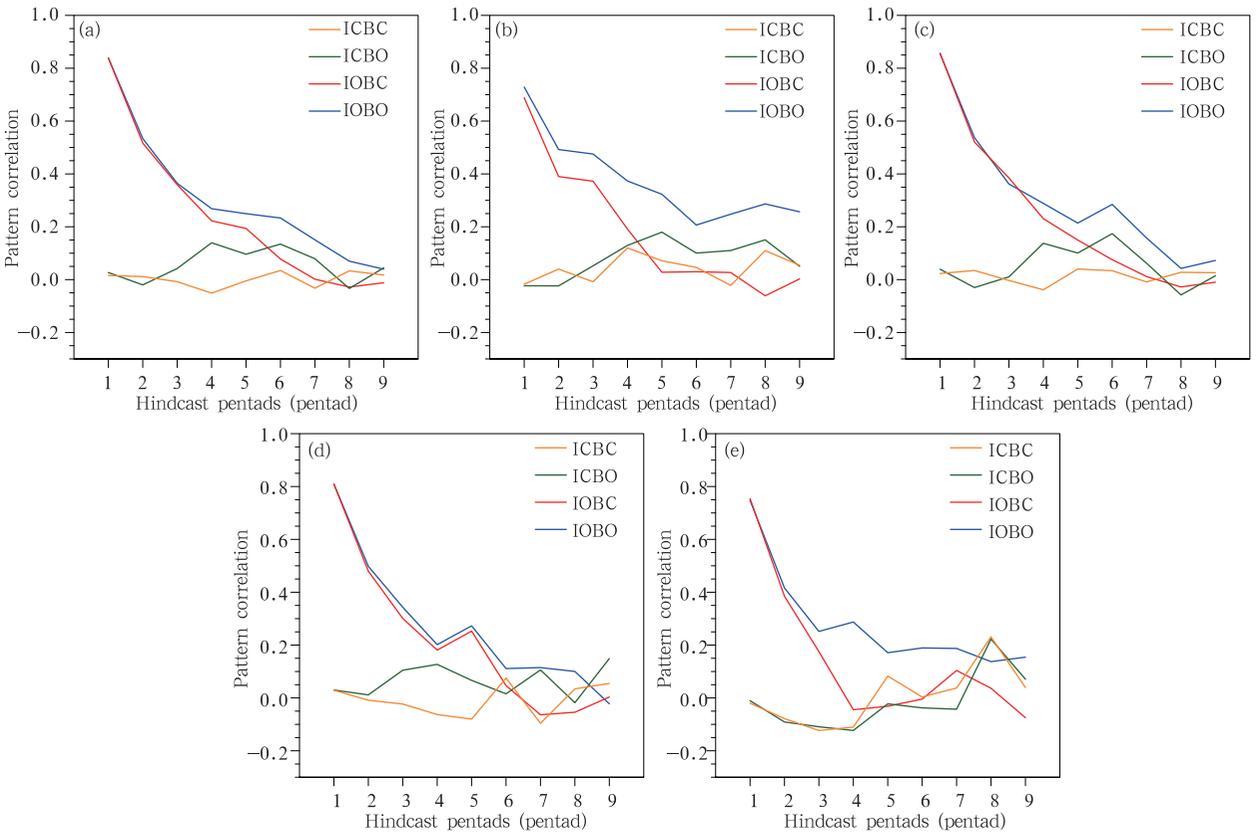


图 3 同图 1, 但为 850 hPa 候平均的结果 (10 a 平均)

Fig. 3 Same as Fig. 1 but for 850 hPa pentad means (10 a average)

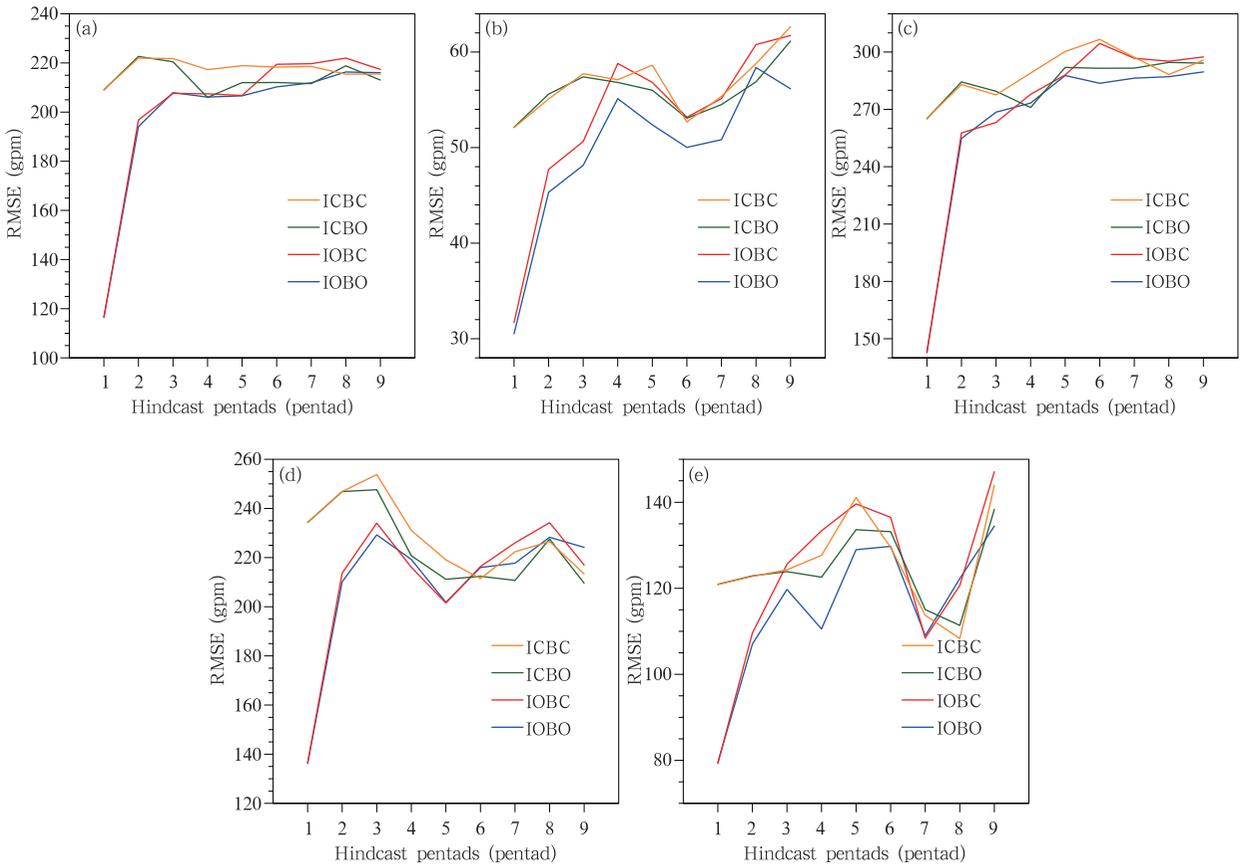


图4 同图2,但为850 hPa候平均的结果(10 a平均)

Fig. 4 Same as Fig. 2 but for 850 hPa pentad means (10 a average)

期的预测技巧同样主要来自于初值的贡献,并且初值的贡献随着时间衰减的速率慢于逐日预测;这个过程中,边值的作用逐渐凸显超过初值的贡献,不同的地区预测技巧的演变特征有所不同;由于不同层次大气环流动力学特征具有一定的差异,海温对不同层次大气的作用也有所不同。

### 3.3 海温异常强迫对预测误差影响的时空特征

由上述分析可知,不同层次大气的特性有所不同,因此,海温对不同层次大气的贡献与大气内部动力过程存在一定的关系。这意味着有必要研究大气从哪些层次、哪些区域先开始响应海温异常以及演化特征。图7a—i给出了IOBO与IOBC方案间第1—9候850 hPa高度场逐候全球平均均方根误差技巧评分(MSSS, Mean root mean square error skill score)分布,MSSS评分反映了IOBO方案相对于IOBC方案的平均方差技巧评分。因此,图7的MSSS评分的大小代表了海温异常对大气强迫程度。从图中可以看出海温异常最先影响低层大气的区域(图7a、b)为低纬度地区。第3候以后(图

7c—i),海温异常对大气的影 响区域继续向高纬度区域扩展,且海温异常影响最为明显的区域位于低纬度地区,且这些地区主要分布在海洋上空。与此同时,海温异常对部分区域影响较小,即观测海温对预测技巧没有明显贡献,甚至在部分区域出现误差增大的情况,这说明海温异常对不同区域的大气的影响有所不同,且模式在不同区域的预测技巧存在一定的差异,较大的模式误差在部分区域掩盖了海温强迫对大气的影 响也是一个重要原因。对于500 hPa高度场,海温异常最先(图8a)影响的区域与850 hPa高度场类似,出现在低纬度地区,但是影响空间范围比后者大。海温异常对500 hPa高度场的作用在第2候(图8b)与第1候相当,影响的区域在太平洋区域向中高纬度扩展;而在第3—4候(图8c、d)由于误差增长逐渐饱和,而海温的作用还未完全显现,导致在该时段海温的作用不明显,出现部分区域海温异常影响被误差掩盖;到了第5候(图8e—i)以后,海温的作用在整个热带地区逐渐稳定,有效地减小了这些地区的预测误差,相较850 hPa

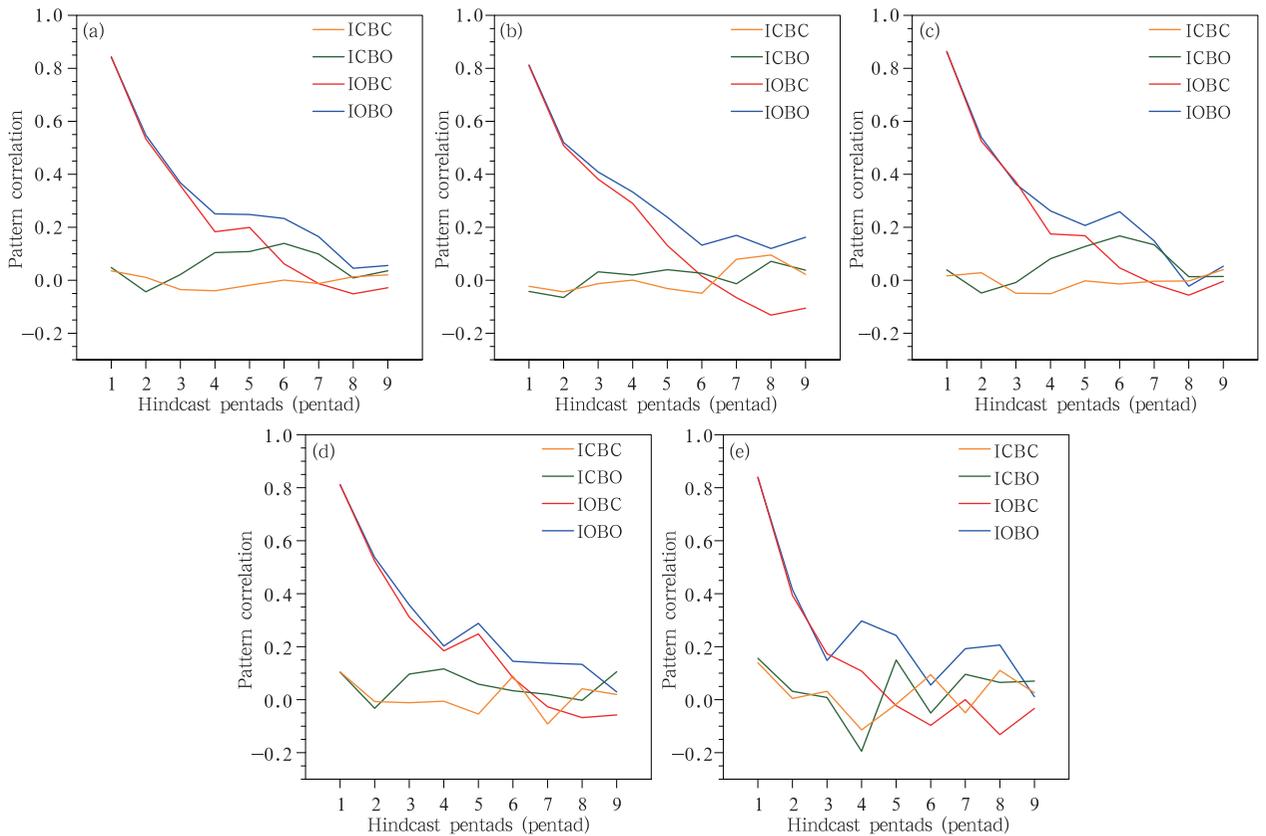


图5 同图3, 但为500 hPa的结果(10 a平均)

Fig. 5 Same as Fig. 3 but for 500 hPa height (10 a average)

高度场海温异常作用更加明显。可以看出, 由于500 hPa高度场热带地区误差增长至饱和和时间较快, 而低层的850 hPa高度场误差增长较慢, 导致海温的作用在第3—4候低层较为明显, 此后由于海温异常在500 hPa高度场的作用逐渐稳定, 导致高层海温异常对于预测技巧的贡献优于低层, 这表明500 hPa高度场大尺度可预报性优于850 hPa高度场。

#### 4 结论和讨论

利用中国国家气候中心新一代动力延伸模式BCC\_AGCM2.2设计了一系列由不同初值与边值组合构成的试验, 试验中初值集合预报方案为LAF方案, 进行了10年的数值试验, 每年从12月31日起报至次年1月31日结束, 并结合NCEP再分析数据, 分析了大气初值和边值在延伸期尺度上的相对作用。

在全球尺度上, 从气候海温驱动观测大气初值

的试验来看, 由于大气内部的不稳定性和非线性作用, 大气初值的记忆性为一个月左右, 此后预报技巧与气候海温驱动气候大气初值方案的技巧相当, 而大气边值的作用在一周左右开始显现。在同一边值强迫下, 观测大气初值与气候大气初值预测技巧在一个月以前差异明显, 此后观测大气初值相对气候大气初值的预测技巧还是存在一定的提高, 这表明大气初值也可以为大尺度低频分量提供一定的预测技巧。总体来看, 在不同时间尺度上预报误差最小的方案均是观测大气初值与观测海温组合的方案。可以看到, 当预报时效较短时, 此时模式的误差相对较小, 大气初值对预测技巧起非常重要的作用。大气初值对超过逐日尺度预测的作用依赖于预报时效、预测尺度、区域、层次等因素。大气初值的相对作用同样依赖于海温强迫的强度, 有观测海温驱动时, 大气初值的相对作用更为凸出。因此, 对于延伸期预报来说, 对于不同尺度、区域、层次的大气环流, 其特性有所不同, 导致同样海温影响也有所不同。因此, 大气初值与海温边值的共同作用是非常重要的。

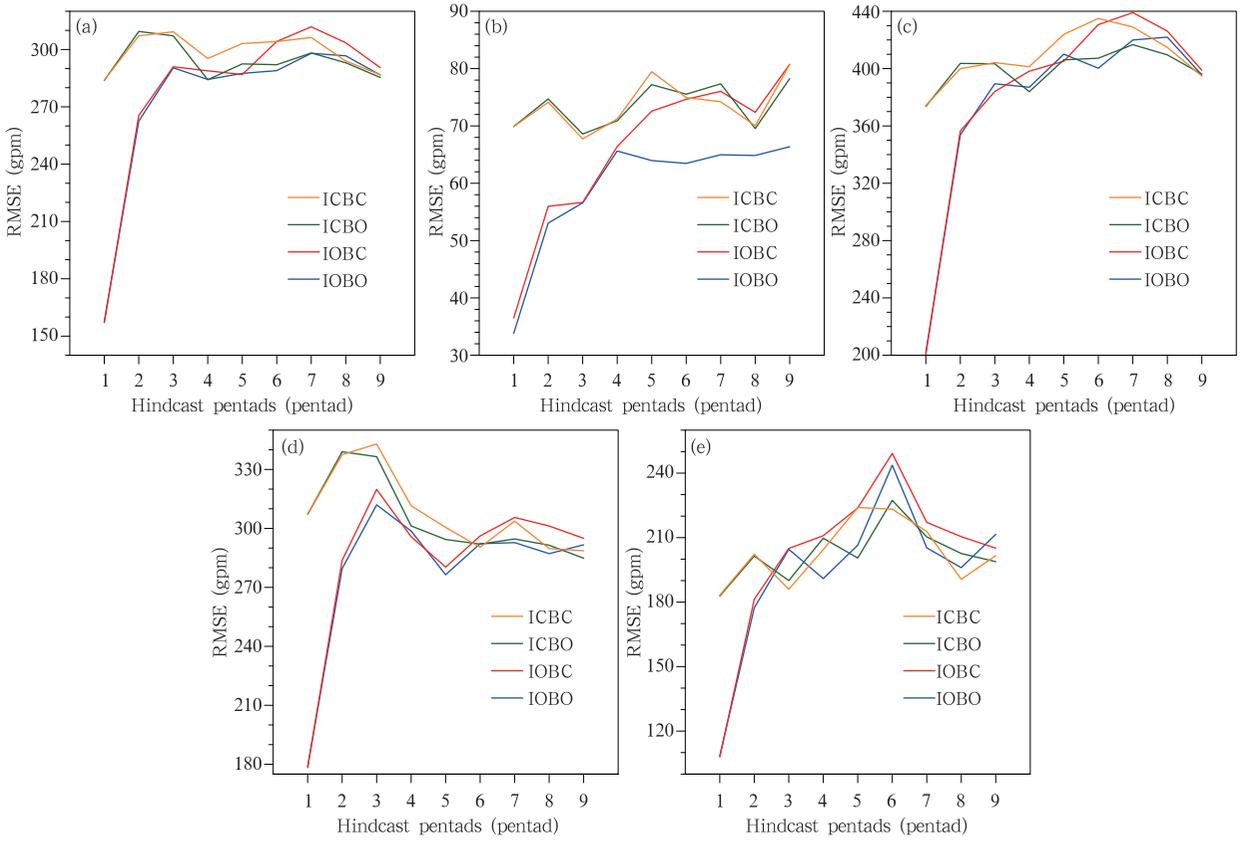


图6 同图4,但为500 hPa的结果

Fig. 6 Same as Fig. 4 but for 500 hPa height (10 a average)

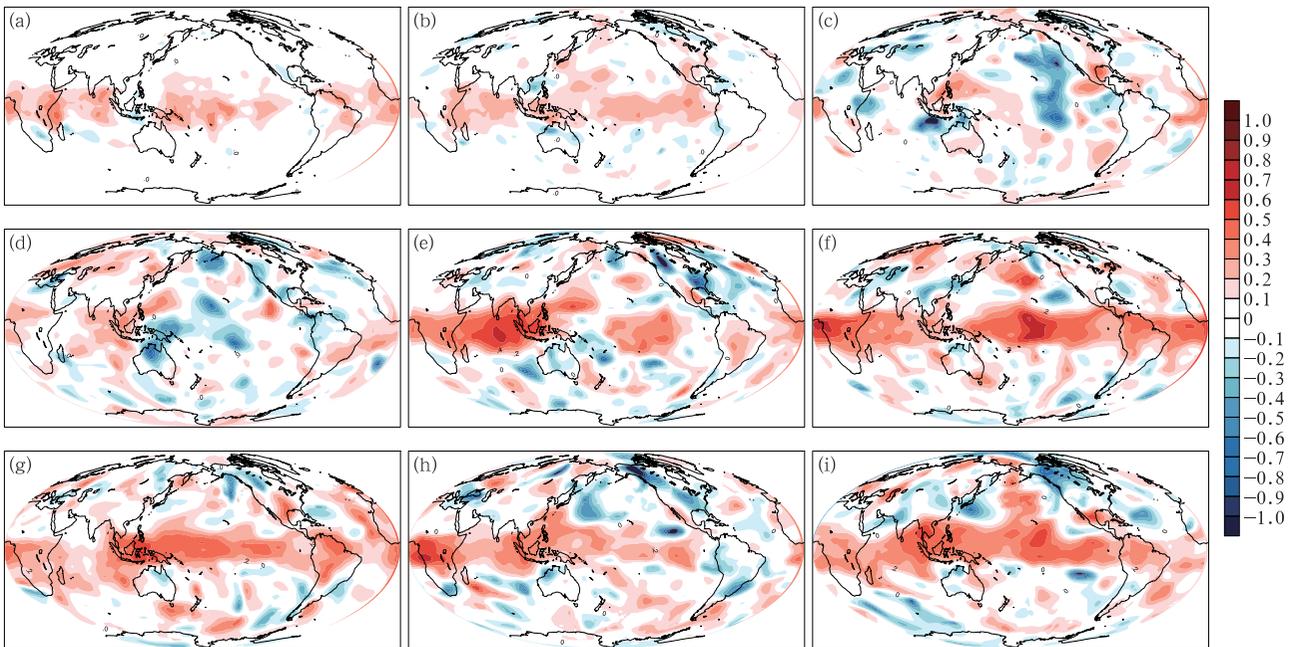


图7 IOBO与IOBC方案逐候500 hPa高度场MSSS评分分布(a-i,第1-9候)

Fig. 7 MSSS of 500 heights between IOBO and IOBC (a-i, First to ninth pentad)

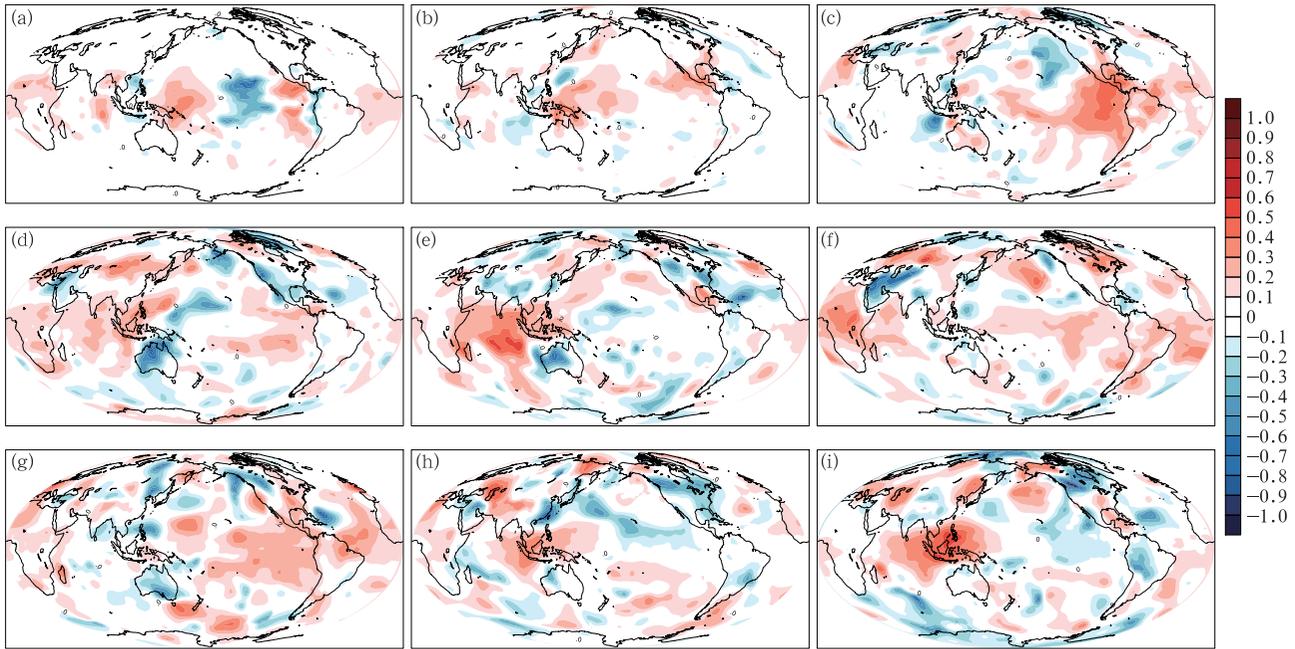


图 8 同图 7, 但为 850 hPa 结果

Fig. 8 Same as Fig. 7 but for 850 hPa heights

与此同时, 预报技巧存在明显的区域性差异, 在热带地区, 第 4 候前后海温的相对作用在 850 hPa 高度场上与大气初值的相对作用相当, 并逐渐超过大气初值的作用。对于延伸期预报来说, 第 4 候正处于一个关键的时间尺度, 一方面大气初值的作用虽然十分重要, 但其对于更长时间尺度上的预测技巧作用十分有限; 另一方面, 海温的作用已经体现, 但其对于 4 候以内的预测技巧改进相对来说不是很明显。在热带外地区, 大气初值的作用更为明显, 海温的相对作用相对较弱。在热带外北半球地区, 第 5 候前后大气边值的相对作用逐渐在低层与海温的作用相当; 海温在热带外南半球的作用相对较小, 在低层海温达到与大气初值作用相当的时间滞后于热带外北半球地区一候左右; 在东亚地区低层环流场初值与边值的共同作用十分明显。对于 500 hPa 高度场, 相较于低层来说, 大气初值与海温总体的相对作用与后者类似, 但大气初值的贡献在 500 hPa 高度场延伸期前两候较为凸出, 而海温的贡献在该层次第 5 候以后较为凸出。

海温强迫对低纬度地区的作用最为明显, 低纬度地区的下垫面主要是海洋, Liu 等 (2015) 指出局地的大气对不同下垫面强迫的响应有所不同, 是导致海洋上的预测技巧明显高于陆地的一个重要因

素。在给定观测大气初值时, 海温强迫 (观测海温相对于气候海温) 首先在低纬度海洋上空区域有效地减小了高度场预测误差; 在第 3—4 候, 模式在热带 500 hPa 高度场地区的误差逐渐增长接近饱和, 而此时海温的作用相对大气初值还不明显, 因此, 海温强迫对大气的作用十分有限; 第 5 候之后, 海温强迫的作用逐渐稳定, 且主要集中在整个低纬度区域。可以看到, 一方面由于大气初值与海温本身存在误差, 另一方面目前的数值模式也存在短期内难以克服的缺陷, 导致一部分大气初值与海温在延伸期的相对作用被模式误差所掩盖, 但是从中可以看出大气初值与海温对延伸期实际可预报性与预报技巧具有十分显著的影响, 并且各自的作用具有十分明显的时空特征。

可以看出, 一方面在实际预测中大气初值对延伸期预报的作用主要集中在 3 周以前, 在更长的时间尺度上大气初值的作用小于海温, 即海温的作用对于 3 周以前的小尺度预测有一定的影响但作用不明显; 另一方面, 大气初值与海温的作用相互影响, 很多情况下难以真正分离各自的影响。因此, 对于延伸期预报来说准确的大气初值与海温是影响预报效果最重要且最为关键的因素。

本研究从实际的预测出发, 仅仅研究了大气初

值与海温对延伸期实际可预报性的影响,因此,下一步工作将进行大气初值与海温对延伸期预报潜在可预报性相对作用的研究工作,以期对延伸期预报提供一定的科学基础。

## 参考文献

- 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. *气象学报*, 67(6): 912-922. Dong M, Wu T W, Wang Z Z, et al. 2009. Simulations of the tropical intraseasonal oscillations by the AGCM of the Beijing climate center. *Acta Meteor Sinica*, 67(6): 912-922 (in Chinese)
- 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. *大气科学*, 34(5): 962-978. Jie W H, Wu T W. 2010. Hindcast for the 1998 summer heavy precipitation in the Yangtze and Huaihe River valley using BBC\_AGCM2.0.1 model. *Chinese J Atmos Sci*, 34(5): 962-978 (in Chinese)
- 陆春晖,丁一汇,张莉. 2014. BCC\_AGCM2.1 模式对平流层环流变化特征的数值模拟及其模式评估. *气象学报*, 72(1): 49-61. Lu C H, Ding Y H, Zhang L. 2014. Validation of BCC\_AGCM2.1 model in simulating variations of the stratospheric circulations. *Acta Meteor Sinica*, 72(1): 49-61 (in Chinese)
- 王皓,郑志海,于海鹏等. 2014. 国家气候中心大气环流模式冬季模式误差特征分析. *物理学报*, 63(9): 099202. Wang H, Zheng Z H, Yu H P, et al. 2014. Characteristics of forecast errors in the National Climate Center atmospheric general circulation model in winter. *Acta Phys Sinica*, 63(9): 099202 (in Chinese)
- 汪栩加,郑志海,封国林等. 2015. BCC\_CSM 模式夏季关键区海温回报评估. *大气科学*, 39(2): 271-288. Wang X J, Zheng Z H, Feng G L, et al. 2015. Summer prediction of sea surface temperatures in key areas in BCC\_CSM model. *Chinese J Atmos Sci*, 39(2): 271-288 (in Chinese)
- 杨秋明. 2016. 长江下游地区降水 50—80 d 低频分量的次季节预测研究. *气象学报*, 74(4): 491-509. Yang Q M. 2016. A study on the subseasonal forecast of low frequency rainfall over the lower reaches of Yangtze River Valley based on the 50—80 d oscillation. *Acta Meteor Sinica*, 74(4): 491-509 (in Chinese)
- 郑志海,任宏利,黄建平. 2009. 基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值实验. *物理学报*, 58(10): 7359-7367. Zheng Z H, Ren H L, Huang J P. 2009. Analogue correction of errors based on seasonal climatic predictable components and numerical experiments. *Acta Phys Sinica*, 58(10): 7359-7367 (in Chinese)
- 郑志海,封国林,黄建平. 2012. 基于延伸期可预报性的集合预报方法和数值试验. *物理学报*, 61(19): 199203. Zheng Z H, Feng G L, Huang J P, et al. 2012. Predictability-based extended-range ensemble prediction method and numerical experiments. *Acta Phys Sinica*, 61(19): 199203 (in Chinese)
- Abhilash S, Sahai A K, Borah N, et al. 2014. Prediction and monitoring of monsoon intraseasonal oscillations over Indian monsoon region in an ensemble prediction system using CFSv2. *Climate Dyn*, 42(9-10): 2801-2815
- Chang Y H, Schubert S D, Suarez M J. 2000. Boreal winter predictions with the GEOS-2 GCM: The role of boundary forcing and initial conditions. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126(567): 2293-2321
- Charlton A J, O'neill A, Lahoz W A, et al. 2004. Sensitivity of tropospheric forecasts to stratospheric initial conditions. *Quart J Roy Meteor Soc*, 130(600): 1771-1792
- DeMott C A, Stan C, Randall D A, et al. 2014. Intraseasonal variability in coupled GCMs: The roles of ocean feedbacks and model physics. *J Climate*, 27(13): 4970-4995
- Dong M, Wu T W, Wang Z Z, et al. 2012. A simulation study on the extreme temperature events of the 20th century by using the BCC\_AGCM. *Acta Meteor Sinica*, 26(4): 489-507
- Feng G L, Sun S P, Zhao J H. 2013. Analysis of stable components for extended-range (10—30 days) weather forecast: A case study of continuous overcast-rainy process in early 2009 over the mid-lower reaches of the Yangtze River. *Sci China Earth Sci*, 56(9): 1576-1587
- Hall N M J, Lin H, Derome J. 2001. The extratropical signal generated by a midlatitude SST anomaly. Part II: Influence on seasonal forecasts. *J Climate*, 14(12): 2696-2709
- Huang J P, Wang S W. 1992. The experiments of seasonal prediction using the analogy-dynamical model. *Sci China (B)*, 35(2): 207-216
- Huang J P, Yi Y H, Wang S W, et al. 1993. An analogue-dynamical long-range numerical weather prediction system incorporating historical evolution. *Quart J Roy Meteor Soc*, 119(511): 547-565
- Kang I S, Kim H M. 2010. Assessment of MJO predictability for boreal winter with various statistical and dynamical models. *J Climate*, 23(9): 2368-2378
- Liu X W, Yang S, Li Q P, et al. 2014. Subseasonal forecast skills and biases of global summer monsoons in the NCEP Climate Forecast System version 2. *Climate Dyn*, 42(5-6): 1487-1508
- Liu X W, Yang S, Li J L, et al. 2015. Subseasonal predictions of regional summer monsoon rainfall over tropical Asian oceans and land. *J Climate*, 28(24): 9583-9605
- Lorenz E N. 1975. Climate predictability: The physical basis of climate and climate modeling. WMO, GARP Pub Ser, 16(1): 132-136
- Mo K C, Kalnay E. 1991. Impact of sea surface temperature anomalies on the skill of monthly forecasts. *Mon Wea Rev*, 119(12): 2771-2793
- Reichler T, Roads J O. 2005a. Long-range predictability in the tropics. Part I: Monthly averages. *J Climate*, 18(5): 619-633

- Reichler T, Roads J O. 2005b. Long-range predictability in the tropics. Part II : 30-60-day variability. *J Climate*, 18(5): 634-650
- Reichler T J, Roads J O. 2003. The role of boundary and initial conditions for dynamical seasonal predictability. *Nonlin Process Geophys*, 10(3): 211-232
- Roads J O, Chen S C, Fujioka F. 2001. ECPC's weekly to seasonal global forecasts. *Bull Amer Meteor Soc*, 82(4): 639-658
- Stockdale T N, Molteni F, Ferranti L. 2015. Atmospheric initial conditions and the predictability of the Arctic Oscillation. *Geophys Res Lett*, 42(4): 1173-1179
- Wu T W, Wu G X. 2004. An empirical formula to compute snow cover fraction in GCMs. *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 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. *Climate Dyn*, 34(1): 123-147
- Wu T W, Li W P, Ji J J, et al. 2013. Global carbon budgets simulated by the Beijing Climate Center climate system model for the last century. *J Geophys Res Atmos*, 118(10): 4326-4347
- Zhang G J, Mu M Q. 2005. Effects of modifications 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 Geophys Res*, 110(D9): D09109
- Zheng Z H, Huang J P, Feng G L. 2013. Forecast scheme and strategy for extended-range predictable components. *Sci China Earth Sci*, 56(5): 878-889