

邹立维, 周天军, 吴波, 等. 2009. GAMIL CliPAS 试验对夏季西太平洋副高的预测 [J]. 大气科学, 33 (5): 959–970. Zou Liwei, Zhou Tianjun, Wu Bo, et al. 2009. The interannual variability of summertime western Pacific subtropical high hindcasted by GAMIL CliPAS experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 959–970.

GAMIL CliPAS 试验对夏季西太平洋副热带高压的预测

邹立维^{1, 2} 周天军¹ 吴波^{1, 2} 陈昊明^{1, 2} 李立娟¹

1 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

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 利用 GAMIL CliPAS “两步法” 季度预测试验, 检验了后报的 1980~1999 年北半球夏季西太平洋副热带高压 (简称副高) 的年际变化, 检查了 Seoul National University (SNU) 动力统计预测系统对 SST 预测准确度, 并讨论了影响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格点大气模式 (GAMIL) 对副高预测效果的可能原因。500 hPa 位势高度可预报性指数表明西太平洋副高具有较高可预报性。集合平均基本能再现西太平洋副高的变率特征, 但最大方差的位置和强度与观测稍有区别。观测证据显示, 副高存在 2~3 年变率和 3~5 年变率, 且 2~3 年变率比 3~5 年变率强。GAMIL 能够准确预测观测副高的 3~5 年变率, 尽管其强度要强于观测。这与试验所用的预测海温能够很好表现赤道中东太平洋 (5.5°S~5.5°N, 190.5°E~240.5°E) 海温的年际变率有关。同时, GAMIL 预测的副高 2~3 年变率较之观测显著偏弱, 这可能与 SNU 预测的海洋大陆地区 (5.5°S~0.5°N, 110.5°E~130.5°E) SST 的 2~3 年变率偏弱有关。分析表明, SNU 预测海温的这种弱点, 与 SNU 海温统计预测模式所用的历史海温 (OISST) 本身对海洋大陆地区 2~3 年变率的刻画能力较弱有关。

关键词 季度可预报性 两步法 西太平洋副热带高压 年际变率

文章编号 1006-9895 (2009) 05-0959-12

中图分类号 P424

文献标识码 A

The Interannual Variability of Summertime Western Pacific Subtropical High Hindcasted by GAMIL CliPAS Experiments

ZOU Liwei^{1, 2}, ZHOU Tianjun¹, WU Bo^{1, 2}, CHEN Haoming^{1, 2}, and LI Lijuan¹

1 State Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The Western Pacific Subtropical High (WPSH) plays an important role in the East Asian climate. The interannual variability of the summer WPSH hindcasted by the GAMIL CliPAS tier-two experiment is investigated. The results show that the Grid Atmospheric Model of State Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (GAMIL) can reproduce the climatology of the WPSH reasonably. The spatial distribution of predictability index of 500-hPa

收稿日期 2008-03-18, 2008-05-26 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40523001、40625014、40821092

作者简介 邹立维, 男, 1984 年出生, 在读博士生, 主要从事区域海气耦合、短期气候预测方面的研究。E-mail: zoulw@mail.iap.ac.cn

geopotential height shows that the WPSH has high predictability during 1980-1999. The ensemble mean reasonably reproduces the large variability center of the WPSH, although both the position and the strength of the center are slightly different from the NCEP/NCAR reanalysis results. The interannual variability of the WPSH hindcasted by GAMIL is evaluated by defining a WPSH index according to Sui et al. (2007). The observation evidence shows that the summertime WPSH exhibits significant 2-3 years and 3-5 years oscillations. The strength of 3-5 years oscillation is weaker than that of 2-3 years oscillation during 1980-1999. The GAMIL model captures the 3-5 years oscillation well except with strength stronger than that from the reanalysis. The successful reproduction of 3-5 years oscillation is attributed to the realistic SST in the equatorial central-eastern Pacific used to drive the model. The SST field predicted by Seoul National University (SNU) SST prediction system can well describe the interannual variability of Niño 3.4 SST. For the 2-3 years oscillation of the WPSH, however, the GAMIL hindcast shows poor skill. Further analysis suggests that it is partly due to the weaker variability of SST field at 2-3 years band in the maritime continent (5.5°S-0.5°N, 110.5°E-130.5°E). The quality of predicted SST in the maritime continent partly depends on the quality of historical SST, viz. OISST, which is used in the SNU statistical SST prediction system. The authors suggest that the weaker 2-3 years variability of OISST version 2 in the maritime continent should partly account for the model error.

Key words seasonal predictability, tier-two, western Pacific subtropical high, interannual variability

1 引言

随着社会经济的发展,气候预测问题受到科学界与公众愈来愈多的关注。迄今为止,基于三维环流模式的动力季度预测主要用“一步法”或“两步法”预测系统。所谓“一步法”预测系统,即直接用一个海气耦合模式进行季度气候预测;而用“两步法”做气候预测的思路,则最早由 Bengtsson et al. (1993) 提出:先由耦合模式或者统计模式得到全球的海温距平,随后用该预测好的海温强迫大气模式,进行季度预测试验。缓变边界强迫异常,尤其是海温异常,会对大气产生潜在的季度可预报性 (Shukla, 1998; Shukla et al., 2000),这是用两步法进行季度气候预测的物理基础。两步法季度预测系统最大的缺陷在于缺少了一些耦合反馈过程(如海气耦合、陆气耦合等),不过其强迫边界的气候态与观测一致,这又是两步法预测系统的优势。有研究表明,气候平均态模拟得好坏,会影响到对大气-ENSO 遥相关型的模拟,从而影响气候变率的模拟 (Turner et al., 2005)。

CliPAS 的全称为 Climate Prediction and Its Application to Society,即“气候预测及对社会的应用”计划,这是 2005 年在 APEC 气候中心 (APCC) 支持下的联合研究计划,其目标有三:(1) 在多模式集合的气候预测这个问题上,研究一系列的核心科学问题;(2) 为季节内与季节预测建

立一个经过很好验证的、多模式集合的预测系统;(3) 建立一个面向经济和社会的应用模式。该计划的重点研究方向是季节内和季度气候预测 (Wang et al., 2007)。APCC/CliPAS 是一个由 12 个研究所组成的联合研究团队,一大批来自美国、韩国、中国和澳大利亚的气候学家都参与了该计划。其中,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也加入了该计划,所用模式为格点大气环流模式 GAMIL。本文的目的之一是检验 GAMIL 模式的 CliPAS 试验预测效果。

西太平洋副热带高压(简称副高)对夏季东亚季风区天气和气候有着非常重要的作用,是东亚夏季风系统的一个重要组成部分 (Lau et al., 1984; Zhu et al., 1986; Tao et al., 1987; Huang et al., 1989; Ding, 1994; 吴国雄等, 2003)。副高西部的低空急流带来的暖湿空气,是东亚夏季风雨带的重要水汽来源;西太平洋副高的南北进退与东亚夏季风雨带的位置紧密联系 (Lau et al., 1984; 王晓春等, 1997)。中国夏季降水的分布与西太平洋副高强度、结构、位置的季节变化密切相关 (黄士松等, 1961; 黄士松, 1963; Tao et al., 1962, 1987)。除了季节变化外,西太平洋副高也存在显著的年际变率 (黄士松, 1978; Nitta, 1987; Huang et al., 1992; Lu, 2001; Lu et al., 2001)。已有研究表明,东亚季风区的干湿旱涝异常与西太平洋副高的年际

异常密切相关。张庆云等(2003)指出,夏季西太平洋副高脊线异常偏南或脊点异常偏西时,江淮流域汛期降水偏多;反之,江淮流域汛期降水偏少。Chang et al. (2000a, 2000b) 认为,西太平洋副高是联系东亚夏季降水与热带太平洋 SST 的纽带;中国东南沿海前汛期降水与同期江淮流域降水的位相关系,同西太平洋副高强度有关。Zhou et al. (2005) 通过研究与中国夏季典型异常降水型相联系的大气环流变化发现,对应长江流域降水正异常型,伴随有西太平洋副高向西南方扩展;而对应江淮流域降水正异常,伴随有西太平洋副高的西伸与北抬。副高的上述变化,直接导致两种降水异常型相对应的异常水汽输送源地不同。

鉴于西太平洋副高在季节变率和年际变率都对东亚季风区气候有着重要的影响。CliPAS 试验能否很好预测副高的季节和年际变率,是模式能否成功预测东亚夏季风雨带的关键。本文的目的是检验 GAMIL CliPAS “两步法” 试验对副高季节变率和年际变率的预测能力。本文的结果表明, GAMIL 两步法试验对副高年际变率有一定的预测能力,模式的预测偏差可以部分归因于用来强迫大气模式的 SST 的预测偏差。

本文的其它部分安排如下:第二部分扼要介绍 GAMIL 模式与 CliPAS 试验设计方案,第三部分检验 GAMIL CliPAS 试验再现的副高的气候态和年际变率,第四部分讨论模式预测误差的可能来源,最后是总结和讨论。

2 模式试验介绍及分析方法

2.1 模式试验设计

GAMIL 是中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室(LASG)发展的一个大气环流格点模式,其水平分辨率为 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$,垂直方向 26 层。模式动力框架采用半隐式有限差分方案,保证了能量守恒、质量守恒,并进行地形扣除(Wang et al., 2004)。GAMIL 物理过程大多采用 NCAR Community Atmospheric Model, Version 2 (CAM2) 中的物理方案,其中包括耦合了 NCAR 的 Community Land Model (CLM) 陆面模型。最近, Li et al. (2007a) 用 Tiedtke 方案替代原来的 Zhang 对流参数化方案,改进了模式的性能。目前, GAMIL 模式已经广泛应用于气候变率

研究中,参加了 Climate Variability and Predictability International Climate of the Twentieth Century Project (CLIVAR C20C)、IPCC AR4 等模拟试验(Zhou et al., 2006; Li et al., 2007b)。

GAMIL 的 CliPAS 试验采用“两步法”进行。强迫模式的 SST 资料来源于韩国的全球海温动力统计集合预测系统(Kug et al., 2007b)。该海温预测系统包括动力 El Niño 预测模式、滞后线性回归模式(LLR)、耦合空间型预测模式(CPPM)和海温持续性预测模式。最后,预测的海温异常由这四个模式结果集合而成。将该海温异常叠加到观测海温气候态,作为“两步法”预测的下边界强迫场。夏季气候预测试验按如下方案进行:自 1979 年起,分别利用每年的 4 月 21 日至 26 日的大气初值,积分至 10 月 31 日,这样每年夏季就有 6 组样本试验,集合平均为这 6 组样本试验的平均。

本文分析 GAMIL CliPAS 试验 1980~1999 年 6、7、8 月的结果。作为观测依据,本文使用了 NCEP/NCAR 再分析资料(Kalnay et al., 1996)。为了与模式所用的 SST 相比较,本文还使用了 Met Office Hadley Centre's SST (HadISST) (Rayner et al., 2006)、Optimum Interpolation SST version 2 (OISST v2) (Reynolds et al., 2002) 和 Improved Extended Reconstruction SST (ERSST) (Smith et al., 2004) 资料。

2.2 分析方法

为了定量地表示副高活动的强弱,国家气候中心定义了 5 个西太平洋副高指数(赵振国, 1999),这些指数计算麻烦且人为性太强,在处理 NCEP/NCAR 格点再分析资料和模式数据方面并不方便。为了适应格点资料并降低副高指数的人为误差,许多学者做了不少工作。例如,慕巧珍等(2001)和闻新宇(2007)利用国家气候中心定义的副高指数与再分析资料和模式资料作相关,结合高相关区和物理意义,定义了再分析资料和模式资料的副高指数。Lu (2002) 认为 850 hPa 位势高度更适合副高变率的研究,并定义 ($10^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$) 区域平均的 850 hPa 位势高度为副高东西向指数,定义 ($30^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$) 区域平均的 850 hPa 位势高度为副高南北向指数。陈月娟等(2001) 定义 $110^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}$ 、500 hPa 大于 5860 gpm 格点数为副高面积指数,将上述格点值减去 5850 gpm

后的累加值定义为副高强度指数。最近, Sui et al. (2007) 利用 58 年 NCEP/NCAR 资料寻找西太平洋地区 500 hPa 位势高度场 2~5 年时间尺度年际变率最大的区域, 并定义 (10°N~30°N, 120°E~140°E) 区域平均的位势高度场为新的副高指数。在下面的分析中, 我们采用 Sui et al. (2007) 的方法, 通过寻找高变率区定义副高指数。

在分析中, 我们除了使用功率谱分析外, 还采用了可预报性研究中通行的方差分析方法 (Rowell, 1996; Kang et al., 2004; 施洪波等, 2008)。主要的思路为: 根据 Rowell (1996), 可以得到 σ_{sst}^2 、 σ_{int}^2 和 σ_{tot}^2 (总方差), 内部方差 σ_{int}^2 是 1980~1999 年中每年的集合成员与集合平均之间偏差的方差平均值, 外部方差 σ_{sst}^2 是每年的集合平均与气候平均之间偏差的平方的平均值, 总方差即内部方差与外部方差之和。根据 Rowell (1996), 可以得到:

$$\sigma_{\text{int}}^2 = \frac{1}{N(n-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{En}}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{sst}}^2 = \sigma_{\text{En}}^2 - \frac{1}{n} \sigma_{\text{int}}^2, \quad (3)$$

其中, x 为变量, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}$ 是 x_{ij} 的集合平均,

$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{Nn} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n x_{ij}$ 是 x_{ij} 的集合平均的气候平均。 N 为年数, n 为集合个数。

海温强迫产生的大气可预报性可以通过外部方差和内部方差的比值加以定量估算, 即

$$r = \frac{\sigma_{\text{sst}}^2}{\sigma_{\text{int}}^2}. \quad (4)$$

当海温强迫很强、而 σ_{int}^2 很小时, r 会在 0 到 ∞ 之间变化。施洪波等 (2008) 为了方便比较, 对 r 进行标准化处理, 即

$$R = \frac{r}{1+r}. \quad (5)$$

$R=0$ 表示没有可预报性, $0 < R < 0.5$ 表示有较低的可预报性, $R > 0.5$ 说明可预报性很高。

3 结果分析

3.1 气候平均态

图 1 给出了 NCEP/NCAR 和 GAMIL CliPAS 试验集合平均的 1980~1999 年夏季 (JJA) 平均 500 hPa 位势高度场。由图 1a 可见, 观测中夏季西太平洋副高主体位于 25°N, 可以西伸至 130°E。GAMIL CliPAS 试验能够基本再现北半球夏季 500 hPa 位势高度场特征, 模拟副高的主体也位于 25°N, 与观测一致。定量计算的结果表明, 二者的空间相关系数达到 0.982, 模式模拟与再分析资料的平均偏差为 12.92 gpm, 均方根误差为 30.62 gpm。模式的主要偏差表现在副高的东西向位置, 模拟的副高要比观测明显偏东约 20 个经度。副高脊线也是检验副高的一个重要指标。我们采用刘平等 (2000) 的定义, 将所有纬度上位势高度与赤道上的位势高度差 (经向偏差) 的最大值位置定义为副高脊线位置。图 1 中的虚线表示按上述定义得到的脊线位置。由图 1a 可见, NCEP/NCAR 资料显示夏季副高脊线从中国南部上空约沿 25°N 向西。GAMIL CliPAS 试验对夏季西太平洋副高脊线年

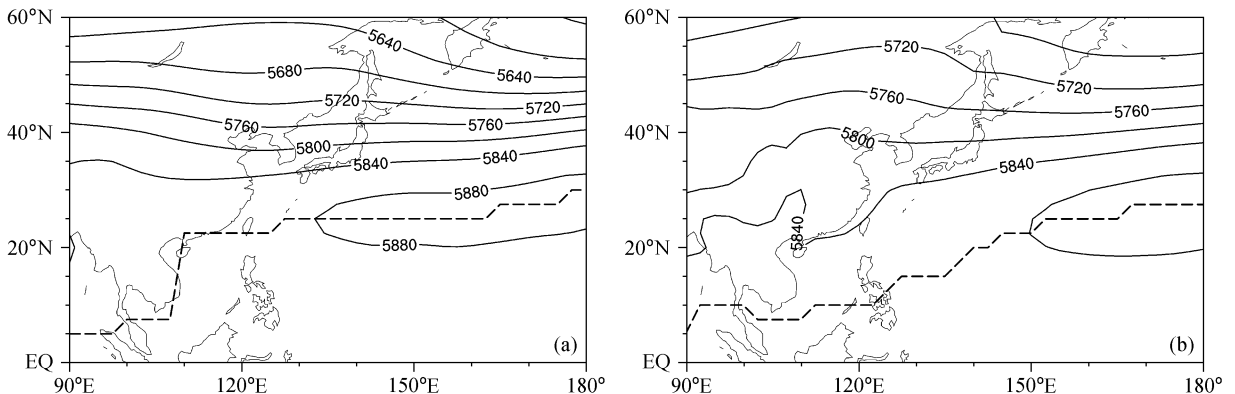


图 1 1980~1999 夏季平均 500 hPa 位势高度场: (a) NCEP/NCAR; (b) GAMIL。虚线: 副高脊线位置

Fig. 1 JJA (Jun, Jul, and Aug) mean 500-hPa geopotential height (gpm) from (a) NCEP/NCAR reanalysis and (b) GAMIL averaged over 1980-1999. Dashed lines represent the ridge lines of the Western Pacific Subtropical High (WPSH)

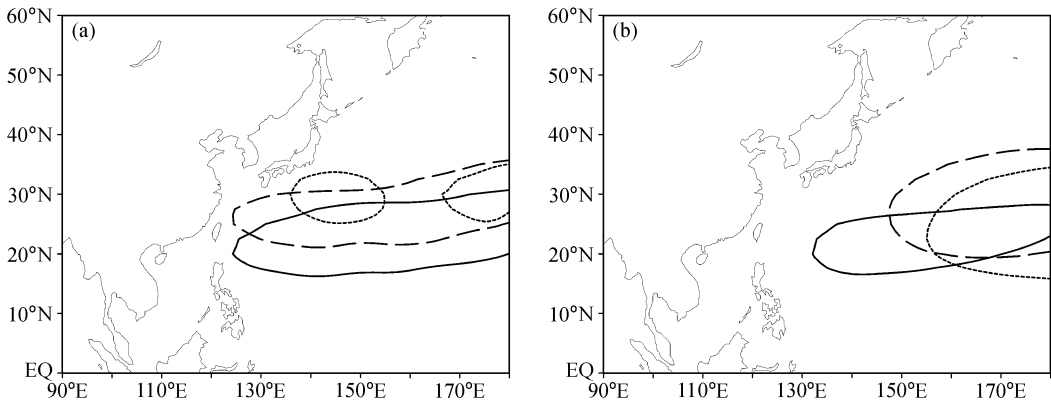


图 2 20 年平均 500 hPa 5880 gpm 线在 6 月 (实线)、7 月 (长虚线)、8 月 (短虚线) 的平均位置: (a) NCEP/NCAR; (b) GAMIL

Fig. 2 Distributions of 5880 gpm isolines of 500-hPa geopotential height from (a) NCEP/NCAR reanalysis and (b) GAMIL in Jun (solid), Jul (long dash) and Aug (short dash) averaged over 1980 – 1999

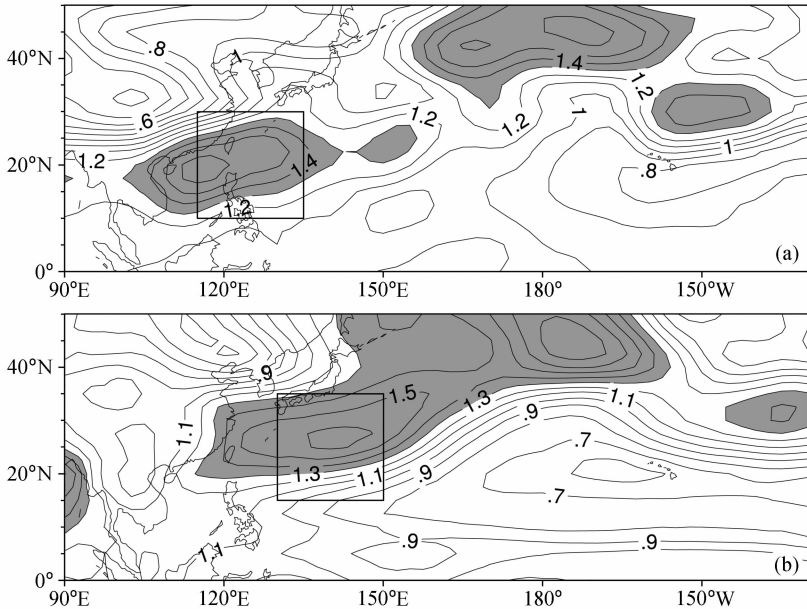


图 3 纬向平均标准化后的 500 hPa 位势高度场标准偏差: (a) NCEP/NCAR; (b) 集合平均。阴影: 大于 1.3 的区域; 矩形框: 西太平洋副高年际变率较大的区域

Fig. 3 The standard deviations of 500-hPa geopotential height normalized by their zonal mean values based on (a) NCEP/NCAR reanalysis and (b) GAMIL ensemble mean. Areas with values larger than 1.3 are shaded; the rectangular boxes denote the areas with larger interannual variability of the WPSH

平均位置的预报效果在海洋尚可, 越靠近东亚地区预报效果越差。CliPAS 试验预测的副高脊线西端位于中国南海上空, 较之观测明显偏南。

与夏季风的进退相对应, 副高的位置亦表现出明显的季节变化。图 2 给出了 20 年平均 500 hPa 5880 gpm 线 6~8 月的位置。从气候平均上看, 5 月西太平洋副高第一次北跳, 南海夏季风爆发, 华南前汛期雨季开始; 6 月, 副高第二次北跳, 江淮

梅雨季开始; 7 月副高第三次北跳, 华北雨季开始。从 NCEP/NCAR 再分析可以清楚地看出上述特征 (图 2a), 即 6~8 月副高不断北抬, 并且在 7 月份副高略有西进, 而 8 月份副高显著东退减弱。

GAMIL CliPAS 试验能够准确模拟出副高 6~7 月的北跳 (图 2b), 但是 GAMIL 模拟的副高 7 月份开始东撤, 这与观测相比提前了。观测中副高在 8 月份依然向北推进这一特征, GAMIL CliPAS 预

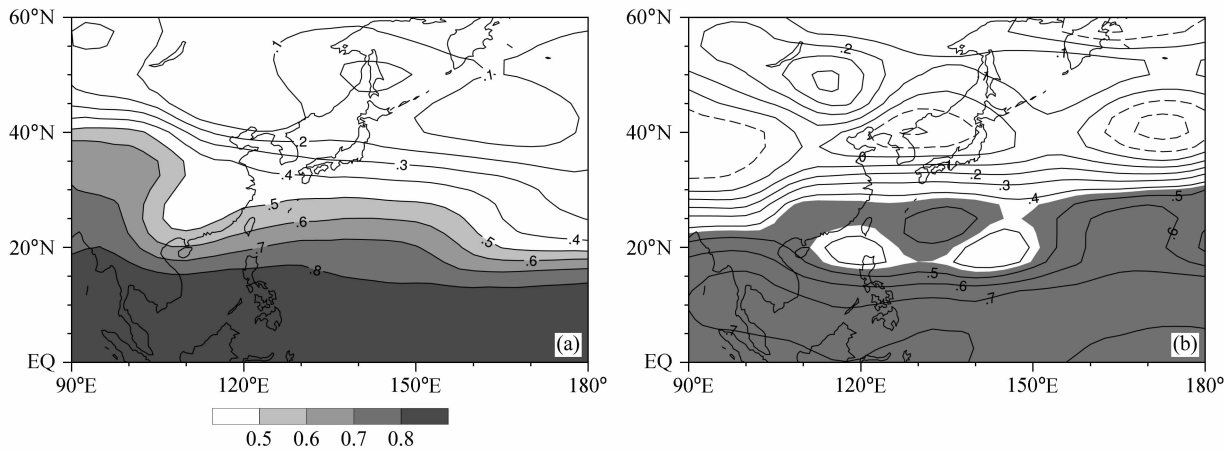


图 4 (a) GAMIL 西太平洋地区 JJA 500 hPa 位势高度可预报性指数 (阴影: 可预报性指数大于 0.5); (b) 1980~1999 年 JJA NCEP/NCAR 再分析资料与集合平均 500 hPa 位势高度相关系数 (阴影: 超过 95% 信度检验区域)

Fig. 4 (a) The spatial distribution of predictability index for JJA mean 500-hPa geopotential height of GAMIL (the areas with indices larger than 0.5 are shaded); (b) the correlation coefficient of JJA mean 500-hPa geopotential height during 1980–1999 between NCEP/NCAR data and GAMIL ensemble mean (shaded regions are statistically significant at the 95% confidence level)

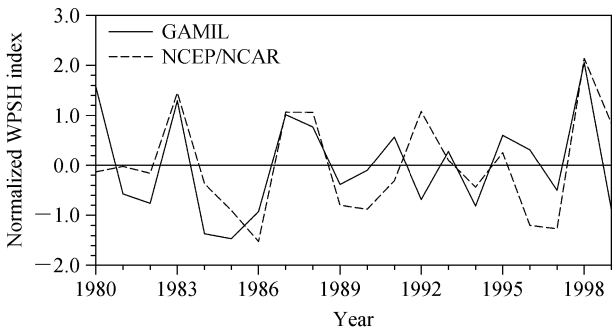


图 5 副高指数标准化时间序列。实线: NCEP/NCAR 再分析; 虚线: GAMIL CliPAS 试验集合平均

Fig. 5 Interannual variations of normalized WPSH indices during 1980–1999 for NCEP/NCAR reanalysis and ensemble average

测试验也没能表现出来。

3.2 年际变率

图 3 给出了北半球夏季 500 hPa 位势高度 NCEP/NCAR 和 GAMIL CliPAS “两步法” 试验标准偏差场。为了突出在纬向上变率较大的区域, 参照 Sui et al. (2007) 的做法, 我们将标准偏差场除以纬向平均值进行标准化。图 3 中的矩形框代表了西太平洋地区 500 hPa 位势高度高变率区, 这也是西太平洋副高活跃的区域。总体上看, 集合平均结果基本能表现出夏季西太平洋地区副高的高年际变率特征。NCEP/NCAR 资料显示副高的高变率区为 (10°N~30°N, 115°E~135°E), 集合试验则为

(15°N~35°N, 130°E~150°E)。集合平均中西太平洋副高的高年际变率区较观测偏东, 这可能与模式再现的副高气候态整体偏东 (图 1b) 有关。

西太平洋地区 500 hPa 位势高度场的可预报性指数列于图 4a。图 4a 中指数大于 0.5 的地区为 500 hPa 位势高度可预报性较高的地区。由图 4a 可见, 西太平洋地区确为可预报性较高的地区, 越往北, 可预报性越低。这说明海洋强迫对于低纬地区 500 hPa 位势高度变率是重要的, 而纬度越高, 大气内部噪音的影响越大, 500 hPa 位势高度可预报性越低。我们同样分析了 JJA 平均 500 hPa 位势高度异常预测值和再分析资料的相关系数分布 (图 4b)。对于可预报性较高的区域, 相关也较高。因此, GAMIL CliPAS 试验对热带地区夏季 500 hPa 位势高度的预测有一定技巧, 而对热带外地区 500 hPa 位势高度场的预测能力则远不如热带地区。

为进一步检验 CliPAS 试验对副高年际变率的预测能力, 根据 Sui et al. (2007) 的方法, 对西太平洋 500 hPa 副高年际变率大的区域 (如图 3 矩形框区域, 注意 NCEP/NCAR 与 GAMIL 集合平均的区域并不相同) 作区域平均, 将其定义为副高指数, 副高指数的标准化时间序列如图 5 所示, 其中实线为 NCEP/NCAR 再分析资料结果, 虚线为 GAMIL 集合平均结果。该区域是 GAMIL CliPAS 两步法试验预测效果较好的区域 (图 4)。NCEP/NCAR 与 GAMIL CliPAS 试验 1980~1999 年副高

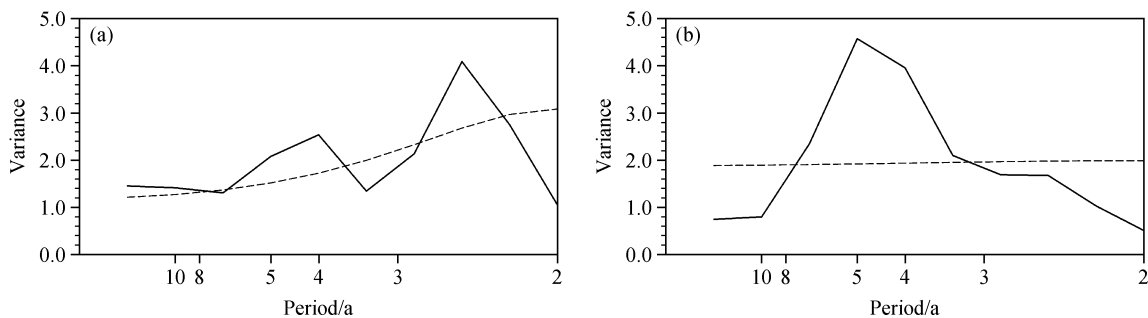


图 6 副高指数功率谱分析: (a) NCEP/NCAR; (b) GAMIL 集合平均。虚线代表 5% 的红噪声检验

Fig. 6 The power spectra of WPSH indices from (a) NCEP/NCAR reanalysis and (b) ensemble average. A spectrum with a peak above the dashed line implies it is distinguished from a red noise spectrum with a confidence level over 95%

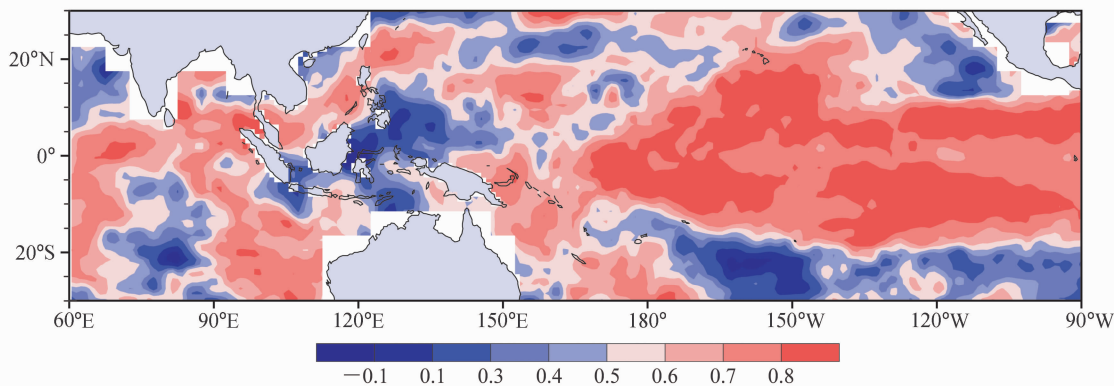


图 7 夏季 (JJA) 平均的 CliPAS SST 与 HadISST 距平场的相关系数分布

Fig. 7 Spatial pattern of the correlation coefficients between JJA CliPAS SSTA (SST anomaly) and JJA HadISST SSTA during 1980 – 1999

指数的相关系数为 0.56, 通过了 99% 的信度检验。

观测分析表明 (Sui et al., 2007), 副高年际变率的主导周期为 2.5 年和 3.6 年。为检验模式对副高年际变率的预测情况, 图 6 给出了副高指数功率谱分析结果, 这里采用的观测数据限于 1980~1999 年。结果表明, 副高指数的主周期为 2~3 年和 3~5 年, 这与 Sui et al. (2007) 用 48 年分析的结果是一致的。但在强度上, 准两年的周期要比 3~5 年低频周期强, 这说明 1980 年以后, 副高更多表现为准两年振荡。GAMIL 集合平均结果基本能预测出副高活动的 3~5 年的周期, 只是强度较观测偏强。但是, GAMIL 模式预测的副高指数难以预测出观测中副高指数的 2~3 年周期。

4 误差分析

为什么 GAMIL CliPAS 试验均能够准确预测观测中副高的 3~5 年周期变化, 却难以预测 2~3

年周期? 观测证据表明 (Sui et al., 2007), 副高指数 3~5 年低频变率可以归因于西太平洋地区局地海温异常, 而这种局地海温异常又与中东太平洋地区的海温正异常密切相关; 而 2~3 年变率则主要是由海洋大陆地区海温及对流异常激发出的异常经圈环流造成的。“两步法”气候预测的效果, 很大程度上取决于用于强迫 AGCM 的 SST 的准确度, 由于 CliPAS “两步法” SST 强迫场来自 SNU 动力-统计预测系统, 有必要检查该系统对 SST 的预测准确度。我们取与 CliPAS SST 相同分辨率的 HadISST (Met Office Hadley Centre’s SST) 为观测依据, 检验 SNU 预测海温的表现能力。

图 7 给出了夏季 (JJA) 平均的 CliPAS SST 与 HadISST 距平场的相关系数分布。蓝色区域表示相关系数小于 0.5 的区域, 说明海温预测较差; 红色区域表示相关系数大于 0.5, 说明海温预测效果较好。由图 7 可见, 中东太平洋地区相关系数皆大于 0.6, 这说明, SNU 海温预测系统对中东太平洋

地区海温预测效果是很不错的。而相关较低的区域包括西太平洋地区、海洋大陆地区和南印度洋地区,表明 SNU 预测系统对上述地区的海温变化预测效果不好。海温的预测误差可能对模式的预测能力有影响。另一方面,对应的关键区海温,即 Niño3.4 区 ($5.5^{\circ}\text{S}\sim 5.5^{\circ}\text{N}$, $190.5^{\circ}\text{E}\sim 240.5^{\circ}\text{E}$) 海温和海洋大陆地区 ($5.5^{\circ}\text{S}\sim 0.5^{\circ}\text{N}$, $110.5^{\circ}\text{E}\sim 130.5^{\circ}\text{E}$) 海温, SNU 动力统计预测系统的准确度如何呢?

图 8 为对 JJA Niño3.4 区 SST 指数距平序列及功率谱分析。预测 SST 序列的标准差为 0.665°C , HadISST 序列的标准差为 0.689°C , 这说明二者的变率强度较为一致,两时间序列的相关系数为 0.88。观测结果 (图 8c) 显示 Niño3.4 区海温主要

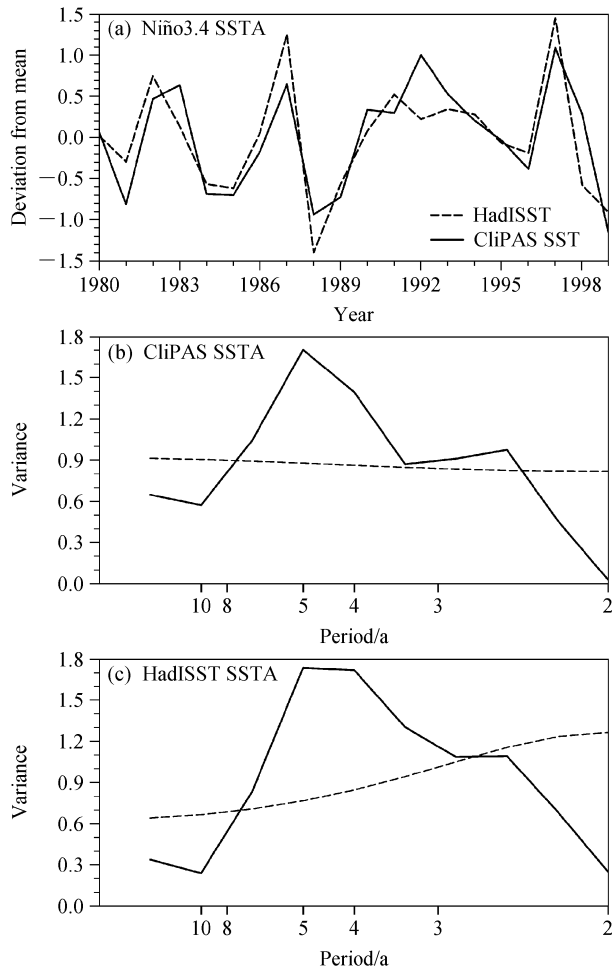


图 8 JJA Niño3.4 区 SST 指数距平序列及功率谱: (a) 时间序列; (b) CliPAS SSTA 功率谱; (c) HadISST SSTA 功率谱
Fig. 8 (a) Time series of Niño3.4 SSTA averaged over Jun – Jul – Aug during 1980 – 1999 and the associated power spectra of (b) CliPAS SSTA and (c) HadISST SSTA

表现为 5 年左右周期。对 SNU 预测的 Niño3.4 区 SST 序列进行功率谱分析 (图 8b), 发现无论是谱峰的位置还是强度都与观测比较一致, 能够表现出 5 年左右的周期。其中预测的 Niño3.4 区海温在准两年也有一个峰值, 通过了 5% 红噪声检验。因此, SNU 动力预测系统能够准确预测赤道中东太平洋 SST 的年际变率, 这为 GAMIL CliPAS 试验成功预测副高的 3~5 年变率提供了很好的基础。

观测和预测的海洋大陆地区区域平均 JJA SST 距平序列及其功率谱分析结果如图 9 所示。预测 SST 序列的标准差为 0.189°C , HadISST 序列的标准差为 0.347°C , 预测 SST 序列的变率强度要明显低于观测 SST 序列, 两序列的相关系数仅为 0.48。

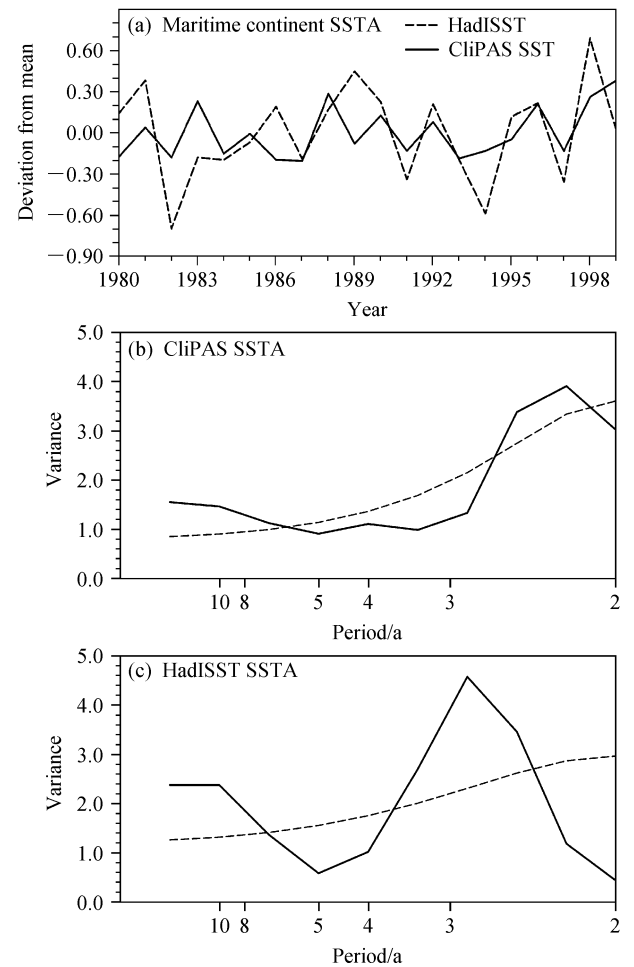


图 9 海洋大陆地区 ($5.5^{\circ}\text{S}\sim 0.5^{\circ}\text{N}$, $110.5^{\circ}\text{E}\sim 130.5^{\circ}\text{E}$) 区域平均 JJA SST 距平序列及其功率谱: (a) 时间序列; (b) CliPAS SSTA 功率谱; (c) HadISST SSTA 功率谱
Fig. 9 (a) Time series of JJA SSTA averaged over region ($5.5^{\circ}\text{S}\sim 0.5^{\circ}\text{N}$, $110.5^{\circ}\text{E}\sim 130.5^{\circ}\text{E}$) and the associated power spectra of (b) CliPAS SSTA and (c) HadISST SSTA

由图 9c 可见,观测证据显示,海洋大陆海温序列主要表现为 2~3 年变率,而 SNU 预测系统对观测中海洋大陆地区准两年变率预测效果较差(图 9b),虽然也通过了红噪声检验,但其强度要比观测弱得

多。因此,较之 Niño3.4 区, SNU 动力统计预测系统在海洋大陆地区的预测能力较差。因此,正是预测的海温在海洋大陆地区缺乏 2~3 年变率,才使得 GAMIL 难以预测副高的 2~3 年变率。

那么,为什么 SNU 动力统计预测系统对海洋大陆地区的 SST 变率预测效果较差呢? 这涉及到 SNU 预测系统在海洋大陆地区采取的预测方法。Kug et al. (2007b) 指出,动力预测系统只在区域(20°S-20°N, 130°E-85°W)起作用,在其它地区海温先由三个统计预测模式预测,最后作集合平均。三个统计预测模式包括滞后线性回归模式、空间投影模式及持续性预测模式。统计预测模式对海温的预测能力部分依赖于其所用的历史海温场(Kug et al., 2007b)。是否该系统所用的历史海温资料本身在海洋大陆区域的质量就较差呢?

SNU 海温动力-统计预测系统首先用的历史海温为 OISST^①。下面我们用 OISSTv2 (1982 年起),简单分析该资料刻画的海洋大陆区域海温变率。图 10 (图 9 时间段为 1980~1999 年) 为 1982~1999 夏季海洋大陆地区 SST 时间序列及功率谱分布。由图 10c 可见, OISST v2 本身对海洋大陆地区的 2~3 年变率就显著地比 HadISST 在强度上要低。我们也检查了 ERSST 对海洋大陆地区 SST 2~3 年变率的表现,发现 ERSST 的结果与 HadISST 很一致(图略)。因此, OISSTv2 本身对海洋大陆地区 2~3 年变率描述较差,直接影响了 SNU 动力统计预测模式该地区的性能。从图 10 可以看出, CliPAS SST 对 2~3 年变率的表现比 OISSTv2 更差。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文利用 GAMIL CliPAS “两步法” 季度预测试验,检验了模式预测的 1980~1999 年北半球夏季西太平洋副高年际变化,并检查了 SNU 动力统计预测系统对 SST 预测准确度,讨论了造成模式预测偏差的可能原因。主要结论如下:

(1) GAMIL CliPAS 试验能基本模拟出西太平洋副高的气候态特征。例如副高主体位于 25°N, 夏季副高脊线在中太平洋的位置,副高 6 月到 7 月

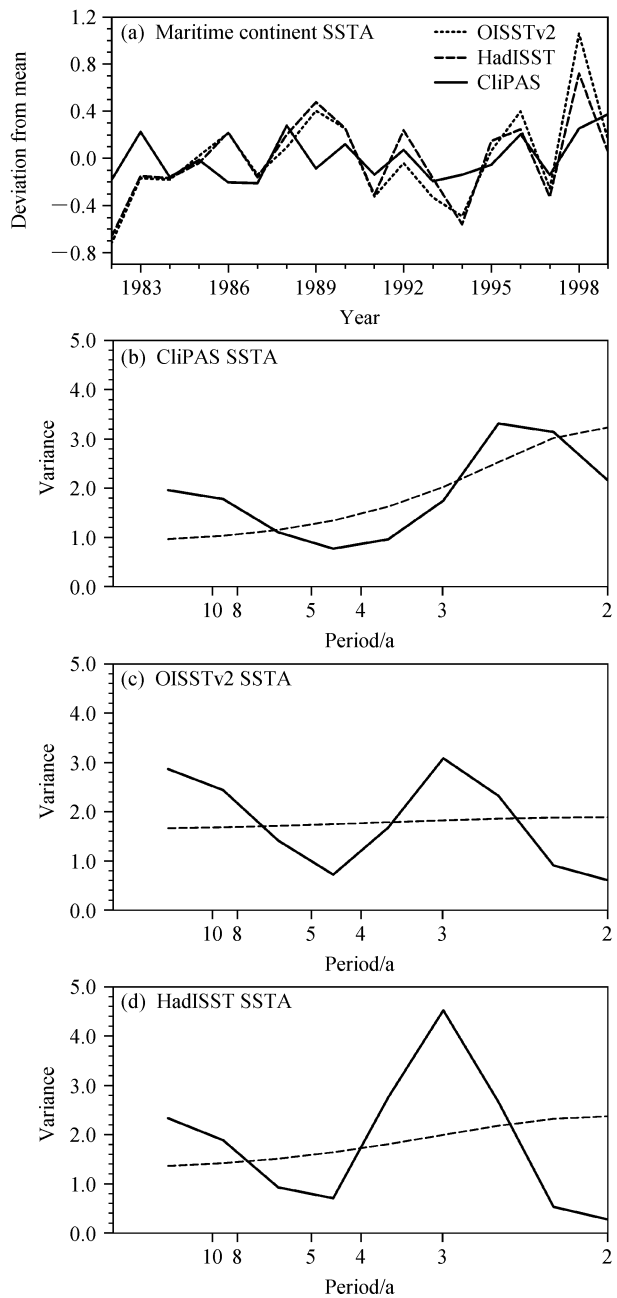


图 10 1982~1999 夏季海洋大陆地区 SST 距平序列的谱分析:
(a) 时间序列; (b) CliPAS SST; (c) OISST v2 SST; (d) HadISST SST

Fig. 10 (a) Time series of JJA SST averaged over the maritime continent region (5.5°S-0.5°N, 110.5°E-130.5°E) during 1982-1999 and the associated power spectra of (b) CliPAS SST, (c) OISST v2 SST, and (d) HadISST SST

① Kug Jong-Seong, 私人通讯。

的北抬。模式的主要偏差在于: 5880 gpm 线明显偏东, 模拟的西太平洋副高脊线在东亚地区位置较观测偏南。此外, 模拟副高东撤发生在 7 月份, 较观测提前。观测中副高 8 月份东撤的同时依然向北推进这一特征, GAMIL 也未能模拟出来。

(2) 可预报指数分布表明, 西太平洋副高区是可预报性较高的区域。纬度越高, 可预报性越低。这说明海洋强迫对于低纬地区 500 hPa 位势高度变率是重要的, 而纬度越高, 大气内部噪音的影响越大, 500 hPa 位势高度可预报性越低。

(3) GAMIL 6 组试验集合平均的结果能表现出西太平洋副高的高年际变率特征, 但其位置与强度较再分析资料略有偏差。

(4) 观测证据显示, 副高年际变率的主周期为 2~3 年与 3~5 年, 且强度上 2~3 年变率要比 3~5 年变率强。GAMIL 集合平均能较好地预测出副高活动的 3~5 年的周期, 只是强度较观测偏强。但是, GAMIL 模式难以预测出观测中副高指数的 2~3 年周期。

(5) GAMIL 能够准确预测观测副高的 3~5 年变率, 是由于 SNU 动力预测系统能够准确预测赤道中东太平洋 SST 的年际变率, 预测的 SST 在 Niño3.4 区与 HadISST 相关系数达到 0.88。GAMIL CliPAS 试验预测的副高 2~3 年年际变率较之观测偏弱, 可能与 SNU 预测的 SST 在海洋大陆地区预测效果偏差有关。预测海温的这种差异, 与其 SST 统计模式所用的历史海温 (OISST) 本身在海洋大陆地区 2~3 年变率偏弱有关。

5.2 讨论

西太平洋副高对亚洲夏季风有重要作用, 它的年际异常直接影响了亚洲夏季风区雨带的位置和强度。因此, 模式能否很好预测西太平洋副高的年际异常是模式预测好亚洲夏季风降水的前提。本文分析表明, 在 CliPAS “两步法” 季度预测试验里, GAMIL 对西太平洋副高年际变化确有一定预测能力。预测与观测结果间的差异, 部分可归因于用来强迫大气模式的 SST 预测偏差。两步法试验所用的 SST 强迫场的质量, 在很大程度上决定着 AGCM 的预测能力。本文的结果证明“两步法”对副高的预测具有一定技巧, 但这并不意味着该方法完美无缺。已有研究表明, 在夏季西太平洋季风区, 海洋与大气的关系主要表现为大气对海洋的强

迫 (Wang et al., 2005; Wu et al., 2007), 而在两步法试验中用事先预测的 SST 来强迫大气模式, 忽视了模式大气对 SST 的反馈作用, 这对模式降水的预测影响尤为显著。由于环流与降水是互相适应的, 因此“两步法”设计方案的缺陷对 GAMIL 模式预测的副高也是有影响的。从已有的研究 (Kug et al., 2007a) 看来, 在西太平洋季风区, 用包含了海气耦合过程的“一步法”系统预测的北半球夏季季度降水技巧, 要比“两步法”预测的季度降水技巧高。降水预测技巧的提高应当伴随着环流预测技巧的改进, 这一点有待未来工作加以验证。

此外, 本文只讨论了 SNU 预测海温在海洋大陆地区准两年年际变率偏弱的可能原因。注意到 SNU 预测海温在海洋大陆地区准两年谱峰与 HadISST 在位置上有偏移 (图 10), 而谱峰的偏移不能够用 OISST 本身的偏差来解释。预测海温的谱峰偏移也可能会引起模式对副高的预测偏差。这是 SNU 海温统计预测模式有待改进的地方。

本文仅考虑了外强迫对 GAMIL 两步法预测西太平洋副高 2~3 年年际变率的重要性。当然, 模式对 SST (尤其是对海洋大陆邻近地区海温) 的敏感性可能也会影响模式预测效果。若用观测海温, 如 HadISST, 是否就能合理预测副高 2~3 年变率? 这有待于将来用观测海温强迫 GAMIL 做进一步分析。

另外, 本文将 GAMIL CliPAS 对副高的预测偏差归因于用来强迫大气模式的 SST 的预测偏差。有研究表明, 陆气相互作用过程对亚洲季风年际变率亦可能有影响 (Yang and Lau, 2006)。因此, 模式对陆面过程描述的不足, 是否是影响 GAMIL 对副高年际变率预测水平的另外一个因子? 这是未来有待探讨的一个问题。

参考文献 (References)

- Bengtsson L., Schlese U., Roeckner E., et al. 1993. A two-tiered approach to long-range climate forecasting [J]. *Science*, 261: 1027–1029.
- 陈月娟, 张弘, 周任君, 等. 2001. 西太平洋副热带高压的强度和位置与亚洲地表温度之关系 [J]. *大气科学*, 25 (4): 515–522.
- Chen Y J., Zhang H., Zhou R J., et al. 2001. Relationship between the ground surface temperature in Asia and the intensity and location of subtropical high in the western Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (4): 515–522.

- Chang C P, Zhang Y, Li T. 2000a. 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: 4310–4325.
- Chang C P, Zhang Y, Li T. 2000b. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part II: Meridional structure of the monsoon [J]. *J. Climate*, 13: 4326–4340.
- Ding Y H. 1994. Monsoon over China [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 90 pp.
- Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 6: 21–32.
- Huang R H, Sun F Y. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70: 243–256.
- 黄士松, 余志豪. 1961. 副热带高压结构及其同大气环流有关若干问题的研究 [J]. *气象学报*, 31 (4): 339–359. Huang S S, Yu Z H. 1961. On the structure of the subtropical highs and some associated aspects of the general circulation of atmosphere [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 31 (4): 339–359.
- 黄士松. 1963. 副热带高压东西向移动及其预报的研究 [J]. *气象学报*, 33 (3): 320–332. Huang S S. 1963. Longitudinal movement of the subtropical anticyclone and its prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 33 (3): 320–332.
- 黄士松. 1978. 有关付热带高压活动及其预报问题的研究 [J]. *大气科学*, 2 (2): 159–168. Huang S S. 1978. Some aspects of the studies on the activities of the subtropical high and its predictions [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 2 (2): 159–168.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–472.
- Kang I S, Lee J Y, Park C K. 2004. Potential predictability of summer mean precipitation in a dynamical seasonal prediction system with systematic error correction [J]. *J. Climate*, 17 (4): 834–844.
- Kug J S, Kang I S, Choi D H. 2007a. Seasonal climate predictability with Tier-one and Tier-two prediction system [J]. *Climate Dyn.*, doi 10.1007/s00382-007-0264-7.
- Kug J S, Lee J Y, Kang I S. 2007b. Global sea surface temperature prediction using a multimodel ensemble [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135: 3239–3234.
- Lau K M, Li M T. 1984. The monsoon over East Asia and its global associations—A survey [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 65: 114–125.
- Li L J, Wang B, Wang Y Q, et al. 2007a. Improvements in climate simulation with modifications to the Tiedtke convective parameterization in the grid-point atmospheric model of IAP LASG (GAMIL) [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24: 323–335.
- Li L J, Wang B, Zhou T J. 2007b. Contributions of natural and anthropogenic forcings to the summer cooling over eastern China: An AGCM study [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L18807, doi: 10.1029/2007GL030541.
- 刘平, 吴国雄, 李伟平, 等. 2000. 副热带高压带的三维结构特征 [J]. *大气科学*, 24 (5): 577–584. Liu P, Wu G X, Li W P, et al. 2000. The three dimensional structure of subtropical high belt [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 24 (5): 577–584.
- Lu R Y. 2001. Interannual variability of the summertime North Pacific subtropical high and its relation to atmospheric convection over the warm pool [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79: 771–783.
- Lu R Y, Dong B W. 2001. Westward extension of North Pacific subtropical high in summer [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79: 1229–1241.
- Lu R Y. 2002. Indices of the summertime western North Pacific subtropical high [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19 (6): 1004–1028.
- 慕巧珍, 王绍武, 朱锦红, 等. 2001. 近百年夏季西太平洋副热带高压的变化 [J]. *大气科学*, 25 (6): 787–797. Mu Q Z, Wang S W, Zhu J H, et al. 2001. Variations of western Pacific subtropical high in summer during the last hundred years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 25 (6): 787–797.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65: 373–390.
- Rayner N A, Brohan P, Parker D E, et al. 2006. Improved analyses of changes and uncertainties in sea surface temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: The HadSST2 Dataset [J]. *J. Climate*, 19: 446–469.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate [J]. *J. Climate*, 15: 1609–1625.
- Rowell D P. 1996. Reply to comments by Y. C. Sud and W. K. - M. Lau on 'Variability of summer rainfall over tropical North Africa (1906–92): Observations and modelling' by D. P. Rowell, C. K. Folland, K. Maskell, and M. N. Ward (April A, 1995, 121, 669–704) Further analysis of simulated interdecadal and interannual variability of summer rainfall over tropical North Africa [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122: 1007–1013.
- 施洪波, 周天军, 万慧, 等. 2008. SMIP2 试验对亚洲夏季风的模拟能力及其可预报性的分析 [J]. *大气科学*, 32 (1): 36–52. Shi H B, Zhou T J, Wan H, et al. 2008. SMIP2 experiment-based analysis on the simulation and potential predictability of Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (1): 36–52.
- Shukla J. 1998. Predictability in the midst of chaos: A scientific basis for climate forecasting [J]. *Science*, 282: 728–731.
- Shukla J, Anderson J, Baumhefner D, et al. 2000. Dynamical seasonal prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81: 2593–2606.

- Smith T M, Reynolds R W. 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854–1997) [J]. *J. Climate*, 17: 2466–2477.
- Sui C H, Chung P H, Li T. 2007. Interannual and interdecadal variability of the summertime western North Pacific subtropical high [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L11701, doi: 10.1029/2006GL029204.
- Tao S Y, Xu S Y. 1962. Circulation characteristics in association with persistent summer drought and flood in the Yangtze-Huaihe River reaches [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 32 (1): 1–18.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]//Chang C P, Krishnamurti T N. *Monsoon Meteorology*. London: Oxford University Press, 353 pp.
- Turner A G, Inness P M, Slingo J M. 2005. The role of the basic state in the ENSO–monsoon relationship and implications for predictability [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131: 781–804.
- Wang B, Wan H, Ji Z Z, et al. 2004. Design of a new dynamical core for global atmospheric models based on some efficient numerical methods [J]. *Science in China (Ser. A)*, 47 (Suppl.): 4–21.
- Wang, B, Ding Q, Fu X, et al. 2005. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L15711, doi: 10.1029/2005GL022734.
- Wang B, Lee J Y, Shukla J, et al. 2007. Advance and prospectus of seasonal prediction; Assessment of APCC/ChIPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980–2004) [J]. *Climate Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-008-0460-0.
- 王晓春, 吴国雄. 1997. 中国夏季降水异常空间模与副热带高压的关系 [J]. *大气科学*, 21 (2): 161–169. Wang X C, Wu G X. 1997. The analysis of the relationship between the spatial modes of summer precipitation anomalies over China and the general circulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 21 (2): 161–169.
- 闻新宇. 2007. 1870–2000 年夏季副热带高压、阻塞高压和南亚高压气候变率的诊断分析与模拟研究 [D]. 北京大学博士学位论文.
- Wen X Y. 2007. Diagnostic and modeling studies of summertime variabilities of western North Pacific subtropical high, blocking high and South Asia high from 1870 to 2000 [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Peking University.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2003. 副热带高压研究进展及展望 [J]. *大气科学*, 27 (4): 503–517. Wu G X, Chou J F, Liu Y M, et al. 2003. Review and prospect of the study on the subtropical anticyclone [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (4): 503–517.
- Wu R, Kirtman B. 2007. Regimes of seasonal air-sea interaction and implications for performance of forced simulation [J]. *Climate Dyn.*, 29: 393–410.
- Yang S, Lau K M. 2006. Interannual variability of the Asian monsoon [M]//Wang Bin. *The Asian Monsoon*. Praxis: Springer, 276 pp.
- 张庆云, 陶诗言. 2003. 夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大气环流特征 [J]. *大气科学*, 37 (3): 369–380. Zhang Q Y, Tao S Y. 2003. The anomalous subtropical anticyclone in western Pacific and their association with circulation over East Asia during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (3): 369–380.
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场 [M]. 北京: 气象出版社, 45pp. Zhao Z G. 1999. Summertime Floods and Droughts in China and the Associated Circulations (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 45pp.
- Zhou T J, Yu R C. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D08104, doi: 10.1029/2004JD005413.
- Zhou T J, Yu R C. 2006. Twentieth century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models [J]. *J. Climate*, 19 (22): 5843–5858.
- Zhu Q G, He J H, Wang P X. 1986. A study of circulation differences between East Asian and Indian summer monsoon with their interaction [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 3: 466–477.