

文章编号: 1674-2184(2021)02-0115-10

三个气候系统模式对 500hPa 高度场预报的检验对比分析

郑嘉雯^{1,2}, 蔡宏珂^{2*}, 吴捷³, 衡志炜⁴, 曾琳¹

(1. 广州市气象台, 广州 511430; 2. 成都信息工程大学大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225; 3. 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室/CMA-NJU 气候预测研究联合实验室, 北京 100081; 4. 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072)

摘要: 基于 BCC_CSM1.1m, NCEP_CFSv2 和 ECMWF_System5 模式的历史回报和中国全球大气再分析系统资料, 对 500hPa 位势高度和西太平洋副热带高压进行预报性能评估和可预报性分析。结果表明: 三个模式在热带地区均具有较高的预报能力, BCC 模式表现最为突出, EC 模式预报稳定性最好, NCEP 模式预报技巧最低; 三个模式预报的距平相关系数均表现出明显的年际变化, 并且在超过中等强度的厄尔尼诺事件后, 预报技巧有所提高, 进一步证实 ENSO 是各模式对 500hPa 位势高度季节性尺度的可预测源; 模式对西太副高脊线指数的预报技巧最高, 其次是强度指数, 再次是面积指数, 对脊点指数的预报表现最差。

关键词: 500hPa 位势高度; 季节预测; 预报技巧; 西太平洋副热带高压; 气候系统模式

中图分类号: P456.7

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2184.2021.02.014

引言

全球变暖引起气候异常事件频发, 给经济、社会带来严重损失, 因此, 短期气候预测日益成为科研人员和社会大众关注的焦点问题。20 世纪 90 年代开始, 随着动力季节预报迅速发展, 不少国家都建立了自己的季节预报模式, 并逐渐成为季节预报的主要工具^[1-2]。目前的研究表明, 水气耦合动力模式预测系统的发展使得季节可预测性研究取得了重要的进展^[1,3-4]。由于单模式预报能力的诸多局限, 多模式集合 (Multi-model ensemble, MME) 在气候预测上扮演了越来越重要的角色^[5-13]。MME 能通过集合不同模式的预报结果来降低模式误差和随机误差, 从而提供比单模式更加准确的预报结果。据此, 北京气候中心 (Beijing Climate Center, BCC) 发展了一个多模式降尺度集合预报系统 (Multi-model Downscaling Ensemble Prediction System, MODES)。基于 MME 和统计降尺度技术, MODES 收集和处理了一些领先的气候模式, 提供月季尺度的预报产品。

500hPa 是对流层中层的代表层, 该层的模拟结果能够代表对流层一些重要天气气候系统 (如东亚大槽和西太平洋热带辐合带高压) 的模拟能力。因此,

该层的评估结果是模式能否用于气候研究的一个重要指标。而在季节预测中, 选择或定义合适的、高度可预测的、直接影响短期气候预测水平的指数尤为重要。西太平洋副热带高压 (简称西太副高) 是影响东亚天气气候最重要的大气环流系统之一, 其范围一般采用 500hPa 高度场上日界线以西 5880gpm 等值线所包围的区域来衡量, 其西部的高压脊在夏季可伸入东亚陆地区域, 对我国夏季降水和台风活动有重要影响^[14-20]。西太副高具有很强的年循环特征, 西太副高的季节内变化决定着我国东部雨带的几次北推, 其年际变化决定我国东部旱涝的出现^[21-22], 西太副高从冬到夏的两次北跳与中国夏季雨带的位置密切相关^[23-24]。

鉴于西太副高与南亚高压两大环流系统对我国天气气候的显著影响, 对其强度和位置进行预报预测就显得尤其重要。国内外学者对副高的预测已有大量研究, 并取得了长足进步。西太副高预报预测主要有统计方法和动力方法。在夏季西太副高的气候预测方面, 一是通过发展物理统计模型, 即主要基于前期海温和环流指数等因子的多元回归预测模型, 所选预报因子建立在科学分析基础上, 具有相对明确的物理含义^[25]。二是采用动力学预测方法, 基于动力学模型重构的概念和改进的自记忆原理, 开发了一种新的

收稿日期: 2021-03-25

资助项目: 国家重点研发计划项目课题 (2018YFC1505702); 国家自然科学基金项目 (42075087, U20A2097); 四川省中央引导地方科技发展专项 (2020ZYD032)

作者简介: 郑嘉雯, 助理工程师, 主要从事集合预报后处理研究和评估工作。E-mail: 546575108@qq.com

通讯作者: 蔡宏珂, 副教授, 主要从事大气物理与卫星遥感研究。E-mail: caihk@cuit.edu.cn

西太副高脊线指数动态预测模型,该改进模型取得了令人满意的长期预报效果^[26]。而且该预报西太副高脊线和夏季风的非线性动力模型表明,马斯克林冷高压的增强和崩溃将导致西太副高北跳,从而导致“空梅”的现象^[27]。Li 等^[28-30]的评估研究指出,副高季节预测水平呈现年代际变化,目前海气耦合模式可以相当好地预测副高异常,即使是在没有明显 ENSO 信号时的预测准确率依然比较高。Liu 等^[31]对 CMIP5 的 26 个气候耦合模式进行西太副高的预报检验,结果表明,大多数模式能够捕获西亚热带太平洋 500hPa 位势高度和纬向风场的空间分布和变异性,但是低估了西太副高的平均强度。Zhou 等^[32]评估了现今业务上运行的模式,即 BCC_CSM1.1(m), NCEP_CFSv2 和 ECMWF_System5 对东亚主要环流系统的季节尺度可预报性,指出 ENSO 是可预报性的重要来源。

基于三个季节模式数据,本文将着重于对 500hPa 高度场和西太副高指数季节尺度预报效果进行对比分析,为季节模式的开发和应用提供参考。

1 数据和方法

1.1 模式资料和西太副高指数介绍

本文所用的季节预测的后报数据来自于 BCC 的 MODES,包括三种海气动力耦合模式:北京气候中心第一代季节气候预测模式系统 BCC_CSM1.1(m)、美国国家环境预报中心第二代气候预报系统 NCEP CF-Sv2、欧洲中心天气预测中心季节预报系统 ECMWF_System5。三个模式的水平分辨率均为 $1^\circ \times 1^\circ$,而预报时效分别为 12 个月、9 个月和 6 个月,本文采用了 1992 年 1 月~2018 年 12 月全球逐月预报数据。观测数据采用中国第一代全球大气/陆面再分析系统产品 (CRA),水平分辨率为 34km,为了方便分析,将其通过双线性插值处理成和模式相同的水平网格。

本文利用模式 500hPa 高度场的预报数据,对西太副高进行了位置和强度的全面评估,所用到的指数分别是:副高强度、面积、脊线位置和西伸脊点指数,其计算方法参照刘芸芸等^[33]的研究:

(1) 副高面积指数: 10°N 以北, $110^\circ\sim 180^\circ\text{E}$ 范围内, 500hPa 位势高度场上所有位势高度不小于 588dagpm 的格点围成的面积,称为副高面积指数;

(2) 副高强度指数: 10°N 以北, $110^\circ\sim 180^\circ\text{E}$ 范围内, 500hPa 高度场上每格点高度值减去 587dagpm 差值与面积指数的乘积的总和,称为副高强度指数;

(3) 副高脊线指数: 10°N 以北, $110^\circ\sim 150^\circ\text{E}$ 范围内, 588dagpm 等值线所包围的副热带高压体内纬向风 $u=0$ 且 $\frac{\partial u}{\partial y} > 0$ 的特征线所在纬度的平均值。如果不存在 588 线,则可以降低标准至 584dagpm。如果不存在 584 线,则以当月历史最小值代替;

(4) 副高西伸脊点指数: $90^\circ\sim 180^\circ\text{E}$ 范围内, 最西格点所在的经度。若在 90°E 以西则统一计为 90°E 。

1.2 评估方法

本文主要考察的是 BCC 的 MODES 下三个海气动力耦合模式月季尺度预报产品,对对流层中层的预报效果进行对比分析,所以首先将对此三个模式 500hPa 高度场集合平均的确定性预报性能进行评估。

令 $x_{i,j}$ 代表观测值, $f_{i,j}$ 代表预测值,其中 $i=1,2,3,\dots,M$ 代表评价区域的格点数, $j=1,2,3,\dots,N$ 代表时间序列。

空间距平相关系数 (Anomaly Correlation Coefficient, 简称 ACC), 主要反映出预报与观测异常场空间型的相似程度,也可称为空间相似系数,计算公式如下:

$$ACC_j = \frac{\sum_{i=1}^M (\Delta x_{i,j} - \overline{\Delta x_j}) \times (\Delta f_{i,j} - \overline{\Delta f_j})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (\Delta x_{i,j} - \overline{\Delta x_j})^2 \times \sum_{i=1}^M (\Delta f_{i,j} - \overline{\Delta f_j})^2}} \quad (1)$$

其中 $\overline{\Delta x_j}$ 和 $\overline{\Delta f_j}$ 分别代表观测和预测区域所有格点时间距平的空间平均值。

与 ACC 不同,时间距平相关系数 (Temporal Correlation Coefficient, 简称 TCC) 能够表征模式在每个格点的预报能力,得到预报技巧的空间分布。其计算公式如下:

$$TCC_i = \frac{\sum_{j=1}^N (x_{i,j} - \overline{x_j}) \times (f_{i,j} - \overline{f_j})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (x_{i,j} - \overline{x_j})^2 \times \sum_{j=1}^N (f_{i,j} - \overline{f_j})^2}} \quad (2)$$

ACC 和 TCC 的取值范围均在 $[-1, 1]$, 越接近于 1 代表预报技巧越高。

2 500hPa 位势高度月尺度预报评估

对于月尺度预报模式的使用,预报员通常通过其对整个环流形势的把握,特别是对西太副高的预报技巧,来判断该模式对未来降水、气温、风等要素的可预报性,因此,本文将对三个月尺度预报模式 500hPa 位势高度的预报效果进行检验评估,定量地给出模式对环流形势的预报能力。

2.1 500hPa 位势高度时间距平相关系数

首先对模式预报技巧的空间分布进行对比分析。图 1 给出 BCC 模式在不同提前预报月份下,对 500hPa 位势高度预报的时间距平相关系数的空间分布。可以看出,在大部分地区, BCC 模式对 500hPa 位势高度的预报技巧都超过 0.5, 其中对热带地区的预报技巧远高于其他地区,且具有很好的持续性,这主要是由于热带的自然内部变率较低且大气能直接对 SST 的变化产生合理的响应^[34]。而对于热带外地区,

BCC 模式对初值很敏感, 随着提前预报月份的延长, 模式的预报性能显著下降, 但对北半球预报的相关要高于南半球。具体来看, 在中纬度地区, 模式预报技巧较高的区域呈现出波列状分布, 其分布特征与欧亚-太平洋(EU)型和太平洋-北美(PNA)型等遥相关型类

似。对我们更为关注的东亚地区而言, BCC 模式预报的位势高度异常在东亚大陆和西北太平洋副热带高压地区也有较高的相关, 说明 BCC 模式对副高的把握能力较高, 但是对我国东北部地区的位势高度场预报技巧较低。

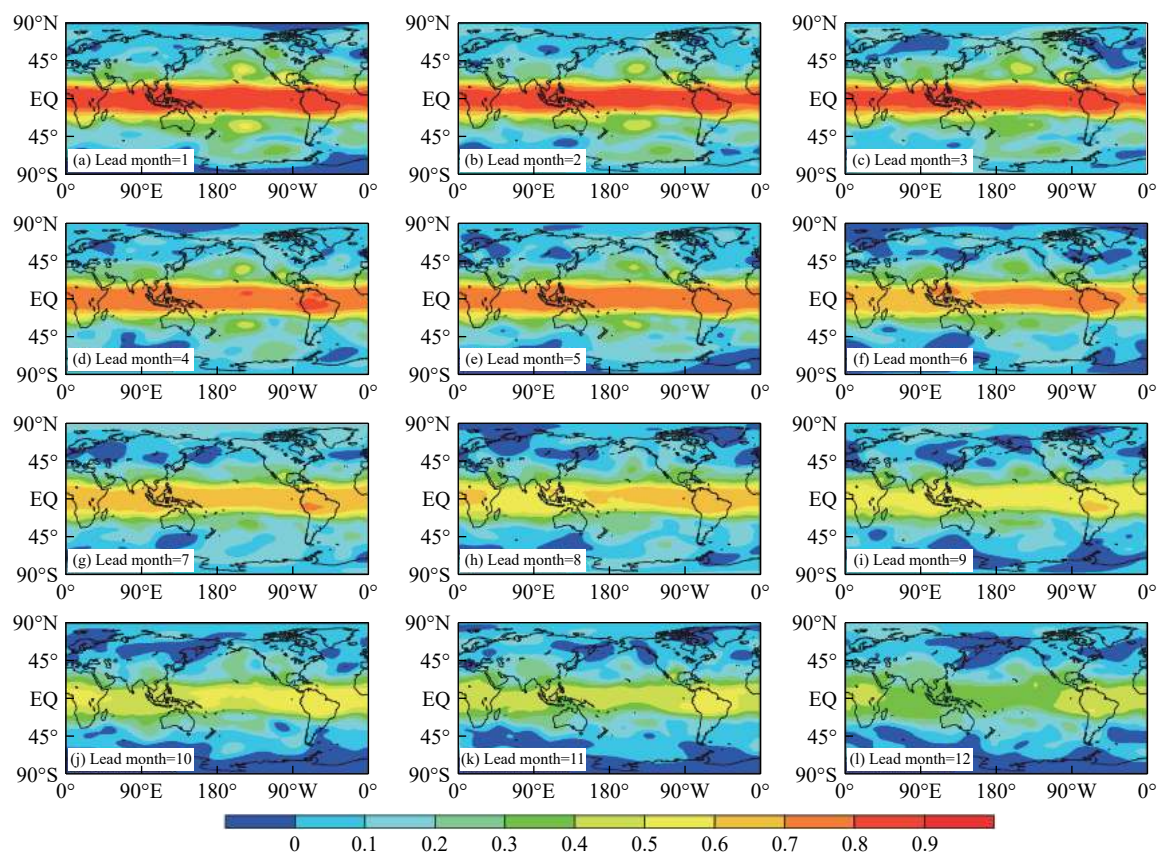


图 1 BCC 模式 500hPa 位势高度时间距平相关系数

EC 月尺度预报模式的预报时效较短, 仅有 6 个月。从整体上看, 其预报效果和 BCC 模式相比略差, 但对大部分地区的预报技巧也都超过 0.5, 对热带地区的预报技巧也要高于其他地区(图 2)。值得注意的是, EC 模式虽然预报时效较短, 但可以看出其模式稳定性较好, 即其预报相关系数随提前预报月份的延长无明显的下降趋势。另外, 具体来看, EC 模式对海洋性大陆区域(Maritime Continent, 简称 MC) 500hPa 位势高度的预报相关系数要高于其他模式, 其持续性在三个模式里面表现也是最突出的。作为驱动全球大气环流运动能量的关键区, MC 区域是各种天气、气候系统的关键区, EC 模式对 MC 区域中层环流预报技巧的突出表现, 从侧面反映出该模式对全球环流及气候系统预报可信度高的特点。

跟 EC 和 BCC 模式类似, NCEP 模式对 500hPa 位势高度的预报也在热带地区呈现较高的预报技巧, 但是其预报技巧整体在三个模式里面最低, 模式对中高

纬的预报稳定性也比较差(图 3)。具体来看, NCEP 模式即便是对预报技巧最高的热带地区, 其预报相关系数和预报持续性也远比 BCC 和 EC 模式差。

2.2 500hPa 位势高度空间距平相关系数

TCC 是比较模式预测在同一格点历史序列与观测结果, 体现的是时间序列的位相相似性, 而空间距平相关系数(ACC)则是体现模式预测在同一空间下的空间型和观测的相似程度, 也是短期气候预测中最常用的检验方法之一, 更着重表现模式是否能预测要素场空间分布的特征, 从而反映模式的总体预测性能。本文分别计算了不同季节, 不同提前预报月份的空间距平相关系数的长时间序列, 讨论三个模式对不同季节 500hPa 位势高度距平预报空间模态的把握能力和对初值的敏感性。

从不同提前预报月份 BCC 模式对不同季节 500hPa 位势高度预报的 ACC 时间序列(图 4)来看, BCC 模式对 500hPa 位势高度空间分布特征的把握能力较好,

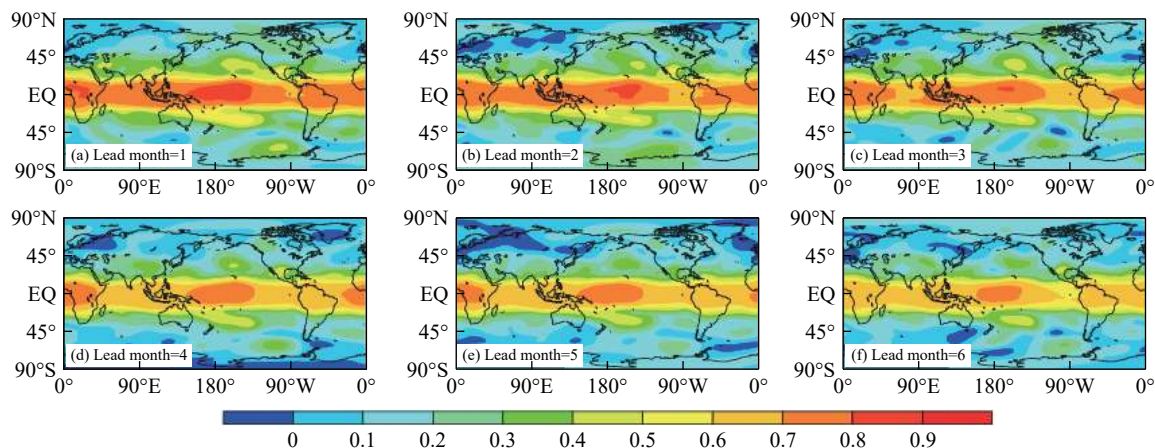


图2 同图1, 但为 EC 模式

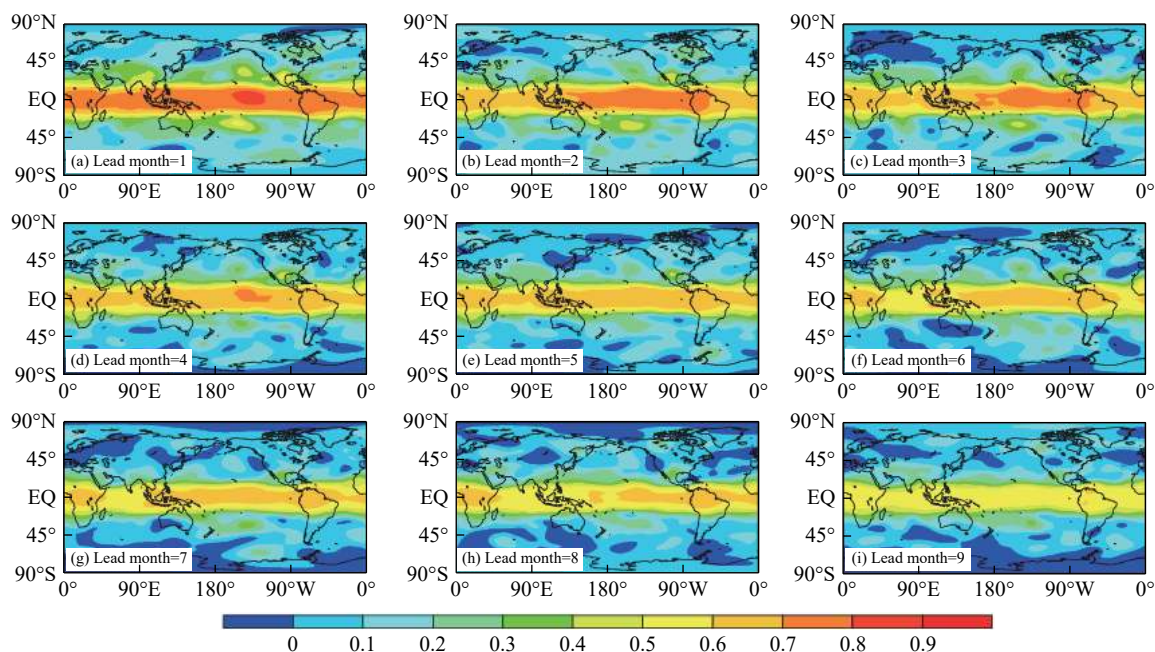


图3 同图1, 但为 NCEP 模式

但预报相关系数的年际变化较大。整体来看,不同提前预报月份下相关系数多年平均都为正,但随着提前预报月份的减小,预报相关系数增加的不明显。仔细来看,BCC模式对500hPa位势高度空间分布特征预测的相关系数在1992年1月、1997年11月和2009年12月较高,其中春夏秋冬对1992年中等强度中部型厄尔尼诺较敏感,春夏季对2010年中等强度东部型厄尔尼诺较为敏感,而对于1997年的超强厄尔尼诺,四个季节均对其较为敏感,在此三个厄尔尼诺年间,BCC模式对500hPa高度场预报的ACC均达到0.3左右,随后相关系数高值持续约半年。可看出BCC模式对500hPa高度场预报的相关系数与中等强度以上厄尔尼诺事件峰值发生的时间有较好的相关性,即在中等强度以上厄尔尼诺事件达到峰值之后,BCC模式对500hPa高度场预报的空间分布把握能力

有所提升,但也从侧面反映出,BCC月尺度模式利用厄尔尼诺事件进行自我调整的能力较高。

整体而言,EC的月尺度模式对500hPa位势高度空间分布的把握能力和BCC月尺度模式类似,不同提前预报月份下的相关系数多年平均都为正,并且EC模式的预报相关系数年际变化较小,年际间预报稳定性较高(图5)。同样,在1992年和2010年中等强度中部型厄尔尼诺事件峰值前后,EC模式对春夏秋冬三季500hPa位势高度空间分布的把握能力较高;在1997年超强东部型厄尔尼诺事件峰值前后,EC模式对四个季节500hPa位势高度空间分布的把握能力都比较高,其预报技巧在这两个时段甚至高于BCC模式,相关系数达到0.3以上。仔细来看,与BCC模式不同的是,对于较为敏感的季节里,EC模式在1992年、1997年和2010年厄尔尼诺事件发生期间,对500hPa

高度场预报的相关系数有上升的变化趋势,也就是说,EC 模式对中等强度以上的东部型厄尔尼诺事件的响应时间和 BCC 模式相比较短,模式对厄尔尼诺事件的自我调节能力较高。

和 BCC 模式类似,NCEP 模式对 500hPa 位势高度的可预报性较高,整体来看 ACC 多年平均在 0 以上,不过预报相关系数的年际变化较大(图 6)。另外,在不同预报时效下,预报相关系数差别不大,也就是随预报

时效的延长,预报效果没有明显的下降。具体来看,NCEP 模式除了秋冬季对 1997~1998 年超强厄尔尼诺事件有所响应外,对其他厄尔尼诺事件的敏感度较低,即模式根据厄尔尼诺气候事件变化的自我调节能力较差。

3 西太副高指数的月尺度预报评估

在南北半球的副热带地区,存在着副热带高压带,由于海陆的影响,常断裂成若干个高压单体,这些单

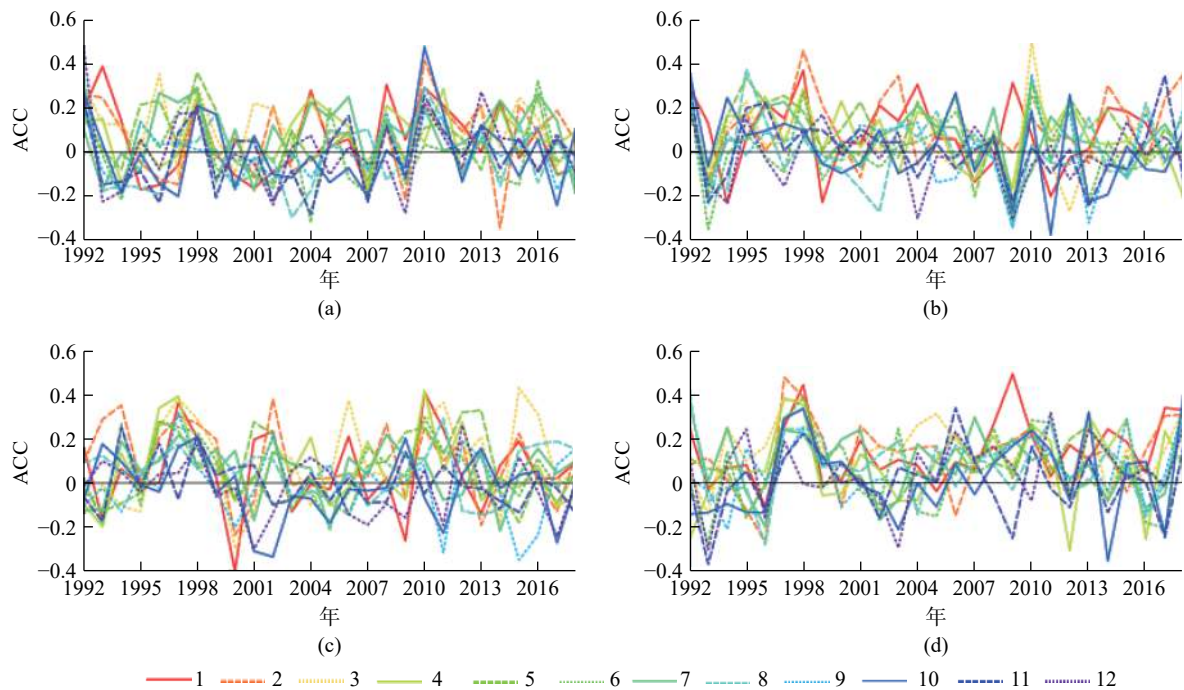


图 4 各季 BCC 模式 500hPa 位势高度空间距平相关系数 (a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季)

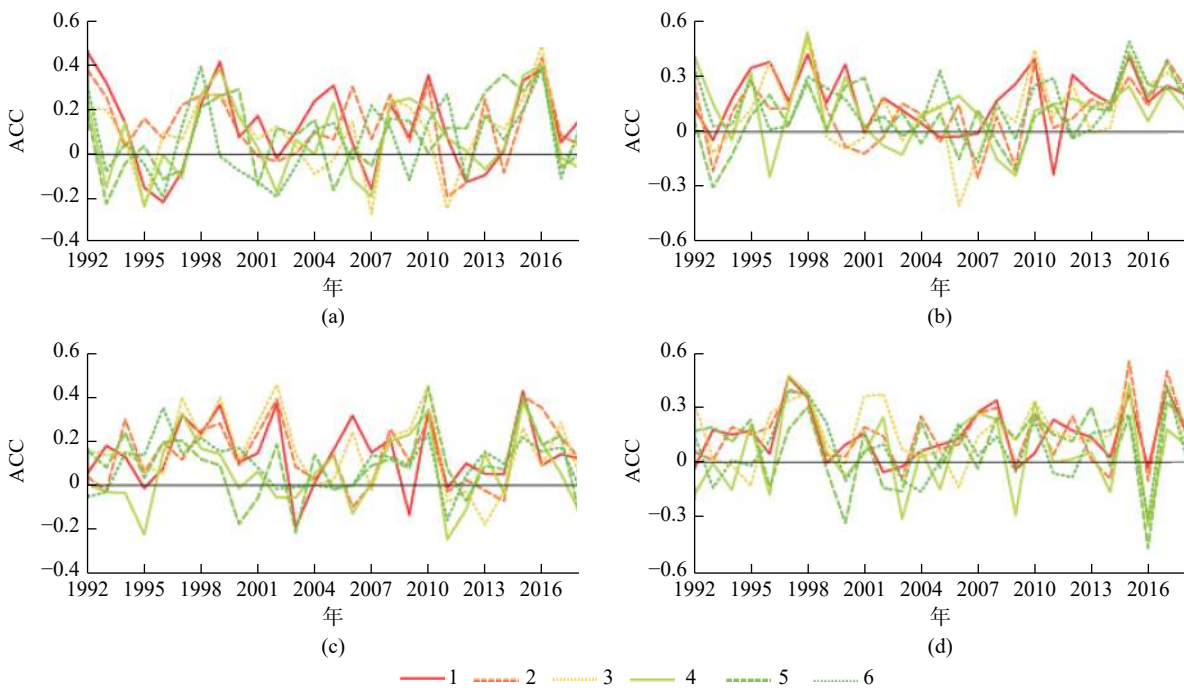


图 5 同图 4, 但为 EC 模式

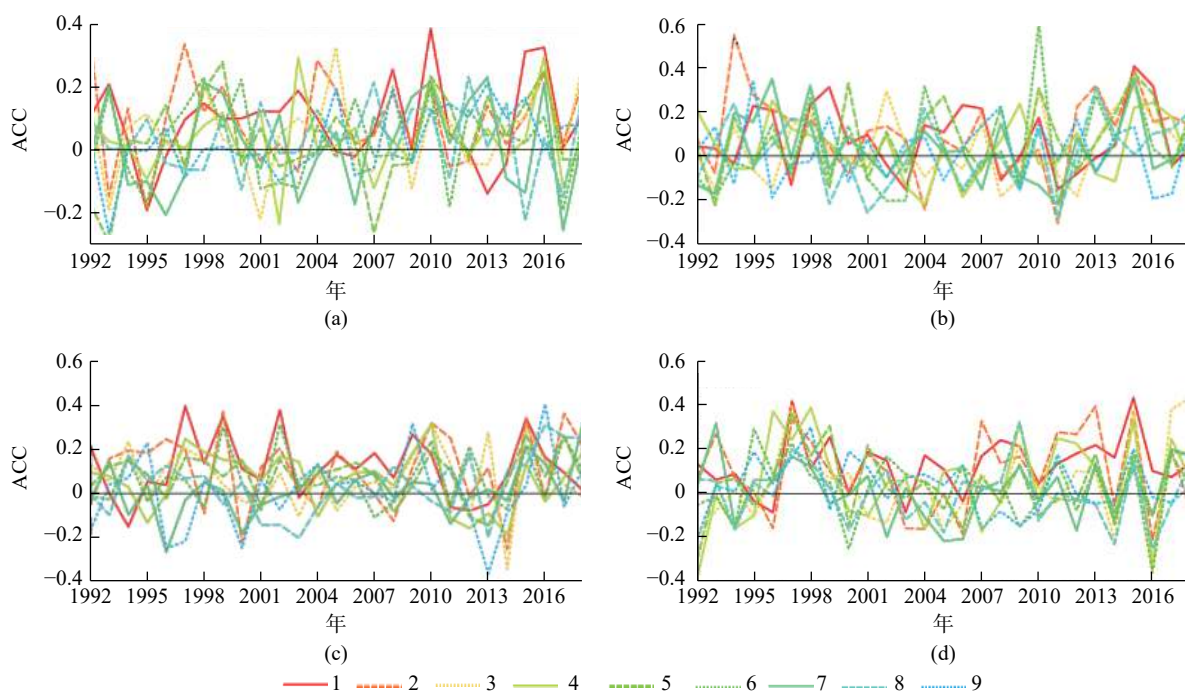


图 6 同图 4, 但为 NCEP 模式

体统称为副热带高压。在北半球, 它主要出现在太平洋、印度洋、大西洋和北非大陆上。出现在西北太平洋上的副热带高压称为西太副高 (Western Pacific Subtropical High, WPSH), 是一个在太平洋上空的永久性高压环流系统, 范围一般采用 500hPa 高度图上西太平洋地区 (180°E 以西) 5880gpm 线包围的区域为代表。其西部的高压脊早夏季可伸入我国大陆, 对我国夏季降水和台风活动有重要影响。西太副高具有很强的年循环特征, 从西太副高的季节变化来看, 从冬到夏副高存在两次北跳, 与中国夏季雨带位置密切相关 [14, 18~20, 22, 35~37]。西太副高与我国天气关系密切, 影响我国大部分地区的温度与降水 [38~39], 当热带西太平洋变暖时, 西太副高异常向北移动, 中国长江和淮河流域夏季季风降水减少。可见西太副高对我国部分地区的温度和降水都有显著的调节作用, 所以精确预报西太副高的位置、强度对我国地区的降水、温度以及极端天气预报有重要的指示意义。接下来本文将利用各月季节模式预报的和 CRA 再分析的 500hPa 位势高度资料, 参照刘芸芸等 [33] 对副高指数的定义, 对西太副高强度指数、面积指数、脊线指数和脊点指数进行计算, 从而检验各模式对我国高影响环流系统-西太副高的预报情况。

3.1 西太副高指数年际变化对比分析

西太副高指数中最明显的特征为图 7a 中副高脊线的季节循环, 即夏季副高北进, 冬季副高南撤。三个模式均能较好地预报这种季节循环特征。除了季节循环之外, 副高活动也有明显的年际变化, 这种年

际变化在三个模式中也得到了较好地预报。但是, 三个模式对副高脊线指数的预报也表现出显著的差异。具体而言, BCC 模式预报的脊线指数与 CRA 的量级最接近, 表明该模式能较好的还原副高的南-北移动。而 ECMWF 模式预报的副高脊线指数略小于 CRA 的量级, 这一系统性预报偏差表明该模式预报的副高位置较观测略偏南。NCEP 对副高脊线指数的预报偏差在三个模式中最大, 表明该模式预报的副高位置较观测严重偏南。

如图 7b 所示, 相对副高脊线而言, 副高脊点指数的季节循环特征不明显, 表明副高的东-西向移动受冬夏季之间气候差异的影响较小。而副高脊点的年际变率更显著, 其可能受到 ENSO 等年际信号的调控。除了年际变率之外, 副高脊点指数也有较强的季节内变率, 这个时间尺度的变率可能受到季节内振荡如 MJO 的影响。与副高脊线相比, 三个模式对于副高脊点的预报都比较好。其中, BCC 预报的变率较大, ECMWF 和 NCEP 的预报变率均较小。但总体上来说, BCC 模式预报的脊点较好, 而 ECMWF 和 NCEP 模式对副高脊点的预报都存在系统偏差, 即预报的副高位置较观测偏东。

如图 7c 所示, 与副高脊线指数一样, 副高面积指数也表现出很强的季节循环特征, 即夏季副高偏强, 冬季副高较弱。除了季节循环特征之外, 副高面积也表现出较强的年际变率和季节内变率。三个模式均能较好地预报副高面积指数的演变, 但均存在一定的系统偏差。具体表现为三个模式均过低估计了副高

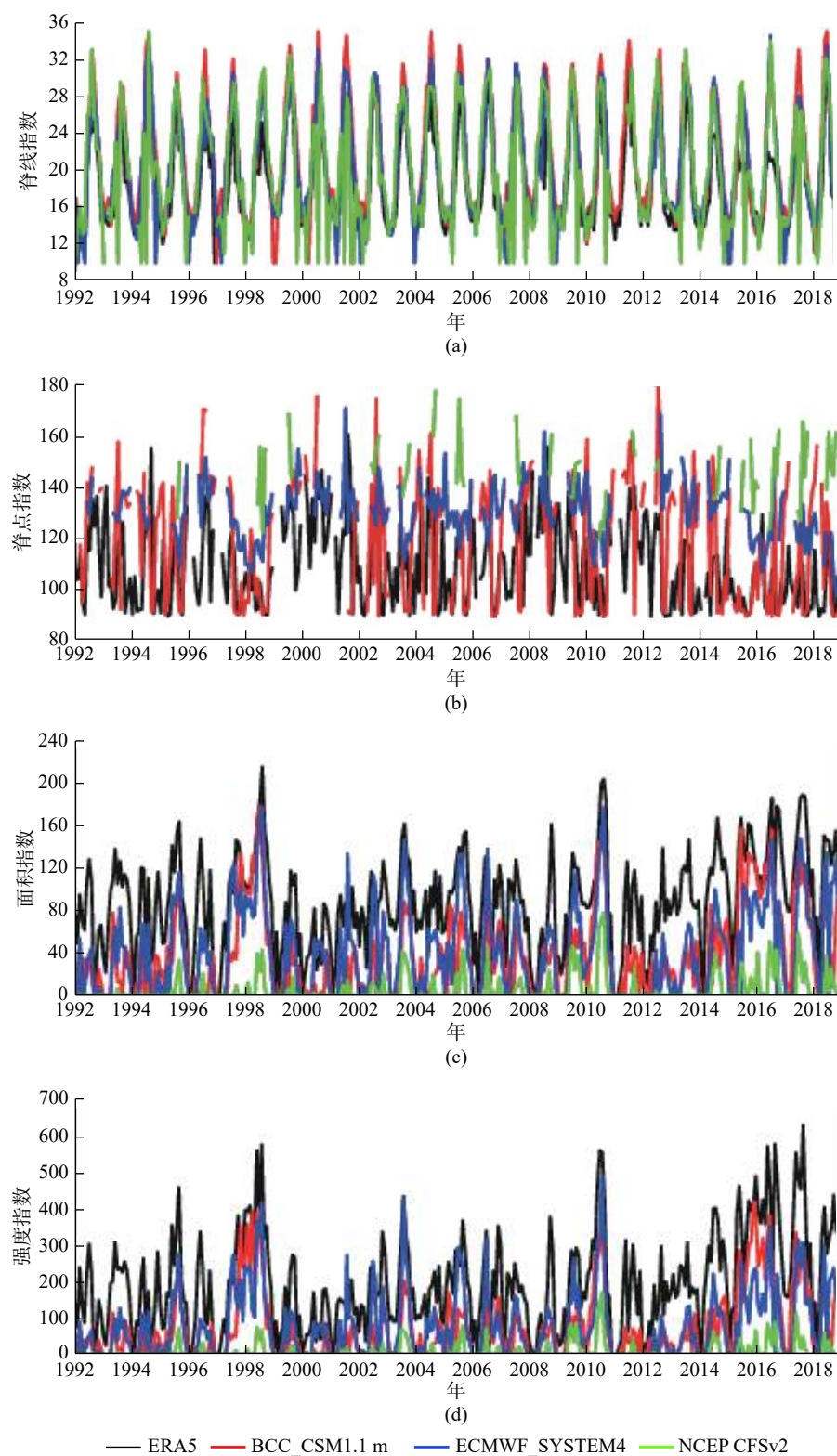


图 7 观测数据和模式模拟的西太副高指数时间序列 (a. 脊线指数, b. 脊点指数, c. 面积指数, d. 强度指数)

的面积, 其中 BCC 模式预报的副高面积与观测最接近, ECMWF 模式次之, NCEP 模式预报的副高面积最小。

从副高指数的定义上可知, 副高强度指数与面积指数都是衡量副高强度的指标, 因而二者的演变规律大体一致。如图 7d 所示, 副高强度也有显著的季节

循环, 年际变率和季节内变率。NCEP 模式对副高强度的预报仍然是三个模式中最差的。

3.2 西太副高指数的空间距平相关系数

从定义上来看, 空间距平相关系数反映的是两个变量之间的演变趋势的一致性评分。相关系数越高代表模式越能抓住某一要素的演变规律。从结果

(图 8)来看, BCC 模式对副高脊线的预报明显优于其他两个模式。ACC 评分仅在预报时效为 1~2 个月时与 CRA 数据反映的实况有较大降低, 随后预报评分始终维持在一个稳定的范围, 这可能是由脊线指数较强的季节循环导致。ECMWF 模式对副高脊线的预报性能在预报时效为 1~2 个月时要优于 NCEP 模式, 但 NCEP 在随后预报时效中表现较好, 并维持在一个稳定区间。这说明副高脊线指数的预报技巧主要由季节循环贡献, 预报时效的延长对脊线的预报技巧影响不大。

三个模式对副高脊点的预报都较差, 与上述一致。表现为 ACC 评分较副高脊线的评分有明显下降。尽管在个别预报时效 NCEP 模式的评分较高, 但整体上而言, BCC 模式对副高脊点的预报性能优于其他两个模式。ECMWF 模式在较短的预报时效内性能优于 NCEP 模式, 但随着预报时效的延长, NCEP 模式在

个别预报时效内的预报技巧高于 ECMWF 模式, 模式预报技巧表现较不稳定。

另外, ECMWF 模式对副高面积的预报明显好于其他两个模式, 尽管该模式对副高面积的量级有较弱估计, 表明该模式更能准确预报副高面积的演变趋势。BCC 模式在预报时效较短(预报时效<5 个月)时, 对副高面积的预报优于 NCEP 模式。但 NCEP 模式的预报技巧随预报时效的递减速度较慢, 当预报时效>5 个月时, 该模式的预报技巧高于 BCC 模式。

与副高面积指数较为一致, ECMWF 模式对副高强度的预报性能最佳, 尽管该模式对副高强度的预报存在系统性偏差, 但却更能抓住副高强度的演变。在预报时效<5 个月时, BCC 模式对副高强度的预报明显优于 NCEP 模式, 但随着预报时效的延长, NCEP 模式在个别预报时效的预报技巧要高于 BCC 模式, 表现出较慢的递减速率。

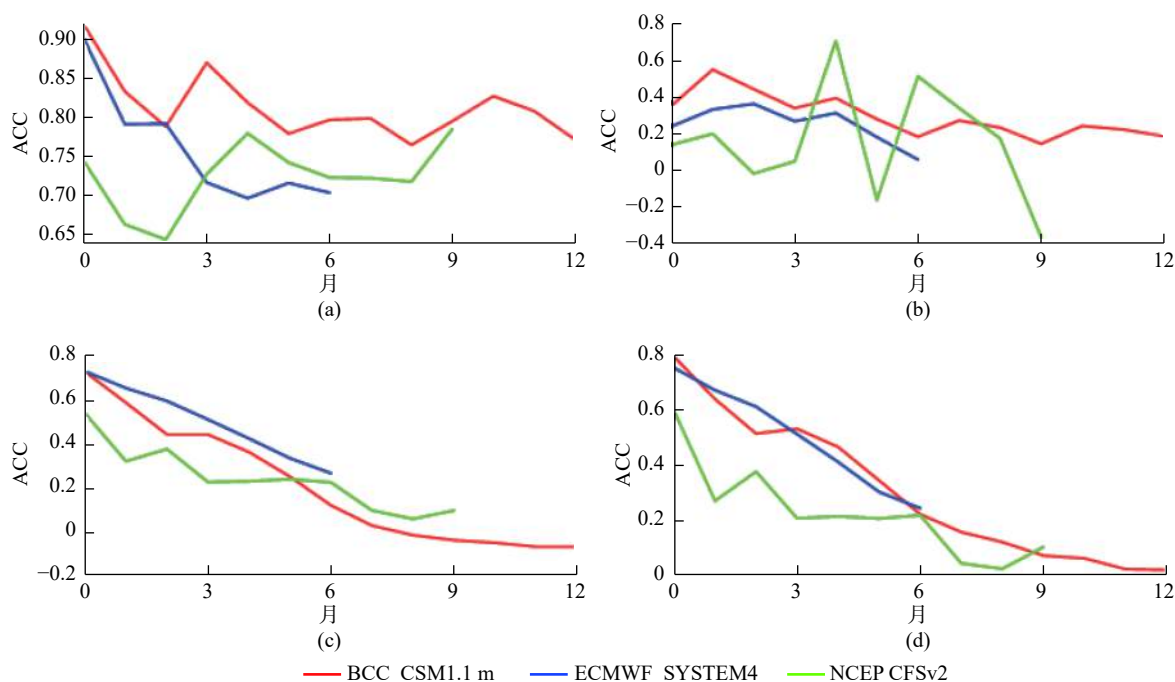


图 8 西太副高指数的空间距平相关系数 (a. 脊线指数, b. 脊点指数, c. 面积指数, d. 强度指数)

4 结论

本研究使用了来自 BCC 的 MODES 的三个海气耦合模式回报数据, 评估并对比了三个模式对 500hPa 位势高度的预报性能, 并进而检验了三个模式对西北太平洋副高的预报能力。首先通过两种评分, 即时间距平相关系数(TCC)和空间距平相关系数(ACC), 评估了模式对于全球 500hPa 位势高度的预报性能。随后, 本研究评估了三个模式对西北太平洋副高的预报性能。通过副高的四个指数, 即脊线, 西伸脊点, 面积和强度指数, 分别表征副高的南-北向移动, 东-西向

移动以及副高的强度。结果表明:

(1)无论采用哪一种评分, 三个模式均在热带地区显示出高预报技巧, 这可能与热带地区的自然内部变率较低且大气能直接对 SST 的变化产生响应有关。

(2)从预报性能的空间分布来看, BCC 模式对北半球的预报好于南半球, 对中纬度地区的预报呈现出波列状分布, 其分布特征与欧亚-太平洋(EU)型和太平洋-北美(PNA)型等遥相关型相似。BCC 模式在东亚大陆和西北太平洋地区表现出较高预报技巧, 表明其对西北太平洋副高有较高预报能力。在天气气候系统较敏感的关键区 MC 区域, EC 模式 TCC 评分最

高。且其稳定性也优于 BCC 和 NCEP 模式。NCEP 模式的预报技巧在三个模式中最低, 预报的稳定性较差, 尤其对亚洲地区的环流预报明显差于其他两个模式。

(3) 从预报性能的时间变化来看, EC 模式的预报技巧略高于 BCC 模式, NCEP 模式是三者之中最差。模式预报技巧均表现出明显的年际变化, 并且在中等强度以上厄尔尼诺事件发生之后预报技巧较高, 意味着 ENSO 事件是季节尺度 500hPa 高度场的可预报性来源。

(4) 从西太副高时空变化来看, 副高脊线、面积和强度的季节性变化在三个模式中均得到较好的预报; 副高脊点预报产品年际变率较显著, 可能受年际信号如 ENSO 的调制; 副高强度预报产品的年际变化和季节内变化, 意味着副高强度可能受到 ENSO、MJO 等多种因子的调节作用。BCC 模式预报性能明显优于其他两个模式, 其预报的副高位置和强度均与观测最接近, 而其他两个模式预报的副高都偏南偏东且偏弱。从预报演变趋势上来看, 模式对于副高脊线的预报技巧最高, 其次是副高强度, 然后是副高面积, 而副高脊点的预报技巧最差。

参考文献

- [1] Kug J S, Kang I S, Choi D H. Seasonal climate predictability with Tier-one and Tier-two prediction systems[J]. *Climate Dynamics*, 2008, 31(4): 403 – 416
- [2] Saha S, Moorthi S, Wu X R, *et al.* The NCEP Climate Forecast System Version 2[J]. *Journal of Climate*, 2012, 27(6): 2185 – 2208
- [3] Kumar K K, Hoerling M, Rajagopalan B. Advancing dynamical prediction of Indian monsoon rainfall[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(8): L08704
- [4] Wang B, Ding Q H, Fu X H, *et al.* Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(15): L15711
- [5] Kirtman B P, Min D, Infanti J M, *et al.* The North American Multimodel Ensemble: Phase-1 Seasonal-to-Interannual Prediction; Phase-2 toward Developing Intraseasonal Prediction[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(4): 585 – 601
- [6] Krishnamurti T N, Kishtawal C M, Timothy E LaRow, *et al.* Improved Weather and Seasonal Climate Forecasts from Multimodel Superensemble[J]. *Science*, 1999, 285(5433): 1548 – 1550
- [7] Min Y M, Kryjov V N, Park C K. A Probabilistic Multimodel Ensemble Approach to Seasonal Prediction[J]. *Weather and Forecasting*, 2009, 24(3): 812 – 828
- [8] Yang D J, Yang X Q, Xie Q, *et al.* Probabilistic versus deterministic skill in predicting the western North Pacific - East Asian summer monsoon variability with multimodel ensembles[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(3): 1079 – 1103
- [9] Almazroui M, Khalid M S, Islam M N, *et al.* Seasonal and regional changes in temperature projections over the Arabian Peninsula based on the CMIP5 multi-model ensemble dataset[J]. *Atmospheric Research*, 2020, 239: 104913
- [10] Palmer T N, Alessandri A, Andersen U, *et al.* Development of a European Multi-Model Ensemble System for Seasonal to Interannual Prediction (DEMETER)[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(6): 853 – 872
- [11] Ren H L, Wu Y J, Bao Q, *et al.* The China Multi-Model Ensemble Prediction System and Its Application to Flood-Season Prediction in 2018[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2019, 33(3): 540 – 552
- [12] Wang Y, Ren H L, Zhou F, *et al.* Multi-Model Ensemble Sub-Seasonal Forecasting of Precipitation over the Maritime Continent in Boreal Summer[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(5): 515
- [13] Wang Z, He X G, Sheffield J, *et al.* Projected Seasonal Changes in Large-Scale Global Precipitation and Temperature Extremes Based on the CMIP5 Ensemble[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(13): 5651 – 5671
- [14] Song J J, Wu R S, Quan W Q, *et al.* Impact of the subtropical high on the extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 27(4): 476 – 485
- [15] Chen X L, Zhou T J, Wu P L, *et al.* Emergent constraints on future projections of the western North Pacific Subtropical High[J]. *Nature communications*, 2020, 11(1): 2802
- [16] Han T T, Guo X Y, Zhou B T, *et al.* Recent Changes in Heavy Precipitation Events in Northern Central China and Associated Atmospheric Circulation[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2020, 57(2): 301 – 310
- [17] Hung C W, Shih M F, Lin T Y. The Climatological Analysis of Typhoon Tracks, Steering Flow, and the Pacific Subtropical High in the Vicinity of Taiwan and the Western North Pacific[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(5): 543
- [18] Liu J, Zhang J R, Liu F, *et al.* Drivers of a sudden mesoscale rainstorm in arid and semi - arid regions at the edge of the western Pacific subtropical high[J]. *Meteorological Applications*, 2020, 27(2): e1884
- [19] 杨敏, 黄毅梅, 彭冲, 等. 中国中部区域一次低槽冷锋天气过程人工增雨潜力区研究[J]. *气象与环境科学*, 2010, 43(1): 26 – 33
- [20] 赵晓琳. 2018年我国梅雨特征及梅雨期降水异常成因分析[J]. *气象与环境科学*, 2019, 42(3): 29 – 33
- [21] 季飞, 赵俊虎, 申茜, 等. 季风与极涡的异常配置下中国夏季大尺度旱涝分布[J]. *物理学报*, 2014, 63(5): 466 – 475
- [22] Yuan Y, Gao H, Ding T. The extremely north position of the western Pacific subtropical high in summer of 2018: Important role of the convective activities in the western Pacific[J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(3): 1361 – 1374
- [23] Ye T S, Shen Q, Wang K, *et al.* Interdecadal change of the northward jump time of the western Pacific subtropical high in association with the Pacific decadal oscillation[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2015, 29(1): 59 – 71
- [24] Ye T S, Zhi R, Zhao J H, *et al.* The two annual northward jumps of the West Pacific Subtropical High and their relationship with summer rainfall in Eastern China under global warming[J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(6): 069203
- [25] Wang B, Xiang B Q, Lee J Y. Subtropical High predictability

- establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(8): 2718 – 2722
- [26] 洪梅, 张韧, 冯芒, 等. 一种基于改进自忆性原理的西太平洋副热带高压脊线指数动力-统计模型及其预报实验[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(7): 2362 – 2376
- [27] Hong M, Zhang R, Li M, *et al.* Bifurcations and catastrophes in a nonlinear dynamical model of the western Pacific subtropical high ridge line index and its evolution mechanism[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 129(1–2): 363 – 384
- [28] Li C F, Lu R Y, Dong B W. Predictability of the western North Pacific summer climate demonstrated by the coupled models of ENSEMBLES[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 39(1–2): 329 – 346
- [29] Li C F, Lu R Y, Dong B W. Predictability of the western North Pacific summer climate associated with different ENSO phases by ENSEMBLES multi-model seasonal forecasts[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43(7–8): 1829 – 1845
- [30] Li C F, Lu R Y, Dong B W. Interdecadal changes on the seasonal prediction of the western North Pacific summer climate around the late 1970s and early 1990s[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46(7–8): 2435 – 2448
- [31] Liu Y Y, Li W J, Zuo J Q, *et al.* Simulation and projection of the western pacific subtropical high in CMIP5 models[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28(3): 327 – 340
- [32] Zhou F, Ren H L, Hu Z Z, *et al.* Seasonal predictability of primary East Asian summer circulation patterns by three operational climate prediction models[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(727): 629 – 646
- [33] 刘芸芸, 李维京, 艾税秀, 等. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. *应用气象学报*, 2011, 23(4): 414 – 423
- [34] 吴捷, 任宏利, 张帅, 等. BCC 二代气候系统模式的季节预测评估和可预报性分析[J]. *大气科学*, 2017, 41(6): 1300 – 1315
- [35] Chen S L, Liu B J, Tan X Z. Characteristics and circulation background of extreme precipitation over East China[J]. *Natural Hazards*, 2019, 99(1): 537 – 552
- [36] Ding T, Yuan Y, Zhang J M, *et al.* 2018: The Hottest Summer in China and Possible Causes[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2019, 33(4): 577 – 592
- [37] Guan W N, Hu H B, Ren X J, *et al.* Subseasonal zonal variability of the western Pacific subtropical high in summer: climate impacts and underlying mechanisms[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(5–6): 3325 – 3344
- [38] 李亚琴, 赖锡柳, 苏小玲, 等. 西太平洋副高影响下柳州暴雨统计特征及环流分型研究[J]. *高原山地气象研究*, 2018, 38(1): 48 – 56
- [39] 肖递祥, 杨康权, 徐栋夫, 等. 副高西侧四川盆地两次极端暴雨过程分析[J]. *高原山地气象研究*, 2015, 35(4): 10 – 18

Performance of Seasonal Prediction of 500hPa Geopotential Height with Three Operational Climate Prediction Models

ZHENG Jiawen^{1,2}, CAI Hongke^{2*}, WU Jie³, HENG Zhiwei⁴, Zeng Lin¹

(1. *Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430, China*; 2. *College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology/Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China*; 3. *Laboratory for Climate Studies/CMA-NJU Joint Laboratory for Climate Prediction Studies, National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China*; 4. *Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China*)

Abstract: Seasonal predictability of 500hPa Geopotential Height and the Western Pacific Subtropical High are investigated by using the hindcasts from the three operational climate prediction models, including BCC_CSM1.1m, NCEP_CFSv2 and ECMWF_System4. TCCs of 500hPa Geopotential Height show that all three models have high forecasting skills in tropical regions, while the performance of BCC model is superior. The stability of the EC model is the best among the three models. NCEP model has the lowest prediction skills among the three models. ACCs of all models have shown an obvious inter-annual variability, and the prediction skills are higher after the El Niño events above the medium intensity, which shows that ENSO is the predictable source of the seasonal scale for 500hPa geopotential height. Further analysis about WPSH indices forecast have shown that, from the perspective of forecast evolution, the forecasting skills is the highest for the ridge line index among all four WPSH indices, followed by the intensity index, and then the area index, while the prediction skills of the WPSH ridge point index are the worst.

Key words: 500hPa Geopotential Height, seasonal prediction, prediction skill, Western Pacific Subtropical High, climate system model