

2015/2016 年极强厄尔尼诺事件下我国动力和统计结合实时气候预测研究



范可^{①②*}, 田宝强^{①②}, 刘颖^{②③}

① 中国科学院 大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029;

② 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;

③ 国家气候中心 气候研究开放实验室, 北京 100081

* 联系人, E-mail: fanke@mail.iap.ac.cn

2016-08-14 收稿, 2016-09-26 接受

创新科学基金群体(41421004); 国家杰出青年科学基金(41325018); 国家自然科学基金面上项目(41575079); 中国科学院国际创新团队

摘要 本文研究建立 2015/2016 年极强厄尔尼诺事件下我国动力和统计结合的气候预测模型, 并开展 2015 年夏季和 2016 年冬季气候我国 160 个站点和主要区域实时气候预测。夏季降水的实时预测起报于 2 月, 冬季气温的预测起报于 10 月。研究结果表明, 尽管 NCEP-CFSv2 耦合气候模式能较好预测 2015/2016 年极强厄尔尼诺事件中海温异常的演变, 但对我国 160 个站点夏季降水和冬季气温预测仍有较大的偏差。因此, 基于 NCEP-CFSv2 耦合模式预测结果, 分别建立我国 160 个站点冬季气温和夏季降水异常的统计结合气候预测模型。同时, 利用年际增量预测方法开展我国长江中下游夏季降水和华北冬季气温的区域气候预测。研究结果表明以上预测模型在 2015/2016 年的实时预测中较 NCEP-CFSv2 有更好的预测效能。相对于 NCEP-CFSv2 耦合模式的预测结果, 2015 年夏季降水距平空间相关系数 ACC 从 0.21 提高到 0.31 (超过 0.01 信度的显著性水平), 距平同号率提高到 60%, 2016 年冬季气温 ACC 从 0.19 提高到 0.32 (超过 0.01 信度的显著性水平), 距平同号率提高到 75%。

关键词

2015/2016 极强厄尔尼诺事件
NCEP-CFSv2 耦合气候统计
动力和统计结合
年际增量
实时预测

2015/2016 年厄尔尼诺 (El Niño) 事件始于 2014 年 9 月, 2016 年 5 月结束, 共持续 21 个月; 峰值强度为 2.9°C , 出现在 2015 年 11 月; 相比于 1982/1983 和 1997/1998 年 El Niño 事件, 这次事件持续时间最长, 累计强度最强、峰值强度最大, 是 1951 年以来最强的 El Niño 事件。与此同时, 2015 年全球地表气温和中国陆面气温创有观测以来的最高记录, 中国夏季华北、河套地区, 内蒙古中部和环渤海湾地区降水显著减少, 中国南方地区降水显著增多 (翟盘茂等, 2016)。因此, 2015/2016 年我国气候预测的准确率对我国减灾和防灾有非常重要的意义。ENSO 是全球中最显著的海气相互作用的现象和气候年际变化最强的信号, 它不仅影响热带地区

的气候, 也通过遥相关方式影响热带外的气候, 因此 ENSO 是我国短期气候预测中极其重要的气候系统。我国科学家在 ENSO 机理及预测 (李崇银等, 2008)、ENSO 与季风的相互作用 (黄荣辉等, 2003) 等方面取得许多重要的成果。研究结果表明 ENSO 循环对我国冬、夏季降水的多寡及时空变化有密切的关系。ENSO 发展年的夏季我国东部以雨量偏少为主, 多雨带位于江淮之间, ENSO 恢复年的夏季长江及江南雨量偏多, 南北两侧偏少。在 ENSO 准常态年夏季, 长江以北为正偏差 (金祖辉和陶诗言, 1999)。当发生 El Niño 时, Walker 环流的上升支东移, 西太平洋副高偏强偏南, 东亚夏季风减弱, 我国南方地区降水偏多, 北方偏少 (Wang et al., 2000)。

引用格式: 范可, 田宝强, 刘颖, 2016. 2015/2016 年极强厄尔尼诺事件下我国动力和统计结合实时气候预测研究 [J]. 大气科学学报, 39 (6): 744-755.

Fan K, Tian B Q, Liu Y, 2016. Hybrid dynamical and statistical climate prediction in China during the extremely strong El Niño of 2015/2016 [J]. Trans Atmos Sci, 39 (6): 744-755. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160814003. (in Chinese).

然而,由于 ENSO 与东亚夏季风的关系具有不稳定性(Wang, 2002),在 20 世纪 80 年代之后,ENSO 与我国夏季降水的关系显著减弱(高辉和王永光, 2007),由此加大我国短期气候预测的难度。

统计和动力数值模式气候预测是国际上两种主要的方法。统计气候预测研究与业务应用在我国已经有多年的历史,包括各种时间序列和空间场的预测方法等,并针对我国汛期降水建立了一些有效统计预测模型(王绍武和赵宗慈,1987;严华生和王学仁,1991;张邦林和丑纪范,1991;林振山,1992;施能和曹鸿兴,1992;丁裕国等,1999;陈兴芳和赵振国, 2000;马开玉,2003;魏凤英,2007)。动力数值模式气候预测始于 20 世纪 90 年代(曾庆存等,1990),经历了分别预报海温和大气的“两步法”和同时预测海温和大气的“一步法”(俞永强等,2007;马洁华和王会军,2014;吴统文等,2014),并取得了一系列研究和业务应用方面的进展。但是由于气候数值模式可预测性主要在热带地区,尤其对东亚季风降水的预测准确度较低。一方面可通过多模式集合结果提高预测技巧。另一方面则是发展有效的气候预测方法,如热带相似的思想(Wang and Fan, 2009)和年际增量预测方法(范可等,2007)等,有效改进了针对东亚夏季风(Fan et al., 2012)、季风降水(Fan and Wang, 2009)、台风(Fan and Wang, 2009)、北大西洋涛动(Fan et al., 2015; Tian and Fan, 2015)等气候预测。此外,通过利用气候模式历史相似信息对动力模式的误差场进行预测,改进气候预测(王启光等, 2012)。如何将动力气候数值模式和统计气候模式有效的结合,发展高效能的动力—统计集合预测方法和预测模型,这是未来短期气候预测研究发展方向之一。其中一个尝试就是将气候变量的统计规律和模式高预测效能信息结合,并据此建立动力和统计结合的预测系统(Lang, 2008; Fan et al., 2012; Liu and Fan, 2014; Liu and Ren, 2015)。

然而,在 2015/2016 极强的 ENSO 事件背景下,气候模式对我国降水和气温是否具有高效的实时预测能力?通常,国家气象局在每年 3 月进行夏季气候预测会商,11 月进行冬季气候预测会商,我国 160 个站点气候预测和华北和长江流域的区域气候是气候预测主要内容之一。本文将从 2015 年夏季和 2016 年冬季气候业务实时预测角度,首先研究在 2015/2016 年极强厄尔尼诺事件下美国 NCEP-CFSv2 耦合气候模式自 2015 年 2 月和 2016 年 10 月起报对 2015/2016 我国气候预测效能。然

后基于 NCEP-CFSv2 耦合模式的 2 月起报的实时预测结果,研制我国 160 个站点 2015 年夏季降水和 2016 年冬季气温动力和统计结合的预测模型并开展实时预测。同时,利用年际增量预测方法开展 2015 年夏季长江中下游夏季降水和 2016 年华北冬季气温的预测。

1 资料和方法

本文的降水和温度资料来自国家气候中心的 160 个站点逐月观测资料,时间跨度为 1951—2016 年。大气资料来源于美国国家环境预测中心—国家大气中心(简称:NCEP/NCAR)再分析资料,包括逐月海平面气压场,850 hPa 水平风场,500 hPa 位势高度场,其分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al., 1996)。海平面温度资料为美国国家海洋和大气局(NOAA)气候诊断中心的海温扩展资料 V4,水平网格分辨率为 $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ (Huang et al., 2015)。月平均北极海冰密集度资料来自英国大气中心,水平网格分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ (Rayner et al., 2003)。

美国预报中心的第二代气候预报系统(简称 CFSv2),该模式是一个海洋—陆地—大气全耦合的动力实时预测系统。从 1982 年开始至今,模式每个月回报当月数据并对未来 1~9 个月的每月前 28 d 进行预测,模式数据的分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (Saha et al., 2014)。本文选取 1982—2015 年 CFSv2 预测结果,并将一天 4 个时次,一个月 28 d 的结果进行了集合。由于国家气候中心每年 3 月初进行夏季气候会商,10 月进行冬季会商,因此 CFSv2 模式夏季气候预测结果是从 2 月起报预测 6—8 月,冬季气候预测是从 10 月起报预测 12 月—次年 2 月。利用双线性插值的方法将模式预测结果插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 水平网格上。观测距平相对于 1981—2010 年的差值, CFSv2 模式距平相对于模式气候态 1982—2015 年的差值。

年际增量气候预测方法(范可等,2007),是通过预测气候变量的年际增量进而预测气候变量或距平。首先年际增量 dy_i 定义当年气候变量与前一年气候变量之差($dy_i = y_i - y_{i-1}$),然后预测年际增量 dy_i 加上前一年的观测值获得的当年气候变量或距平预测值 $\hat{y}(\hat{y} = dy_i + y_{i-1})$ 。由于东亚气候变量大多具有准两年的变化特征,年际增量的振幅大约是气候距平量的两倍,因此放大气候预测信息,特别是中高纬的预测信息(Fan et al., 2012; Fan et al., 2015)。同时基于前一年的准确的观测信息进行预测(包含了

气候年代际和年际信号),因此,年际增量预测对气候年际变化和年代际趋势具有较好的预测能力。

场信息耦合型统计降尺度方法(刘颖等,2013; Liu and Fan,2014)是针对预测因子和预测量的空间场的主要信息,通过提取两变量场的最优耦合变化型建立模型。首先,在建模的拟合时段 t 内,利用经验正交函数分别对预测因子和预测量变量场进行分解并保留主模态,再将预测因子和预测量回算到原始变量场形式,如公式(1)所示:

$$\lambda_m > \frac{T}{K} \sum_{k=1}^K s_{k,k} \quad (1)$$

其中: λ_m 表示保留的 EOF 特征值; $s_{k,k}$ 为所分解变量的第 k 个方差; T 为阈值参数,这里取 $T=0.7$ 。其次,将预测因子和预测量利用奇异值分解,提取两变量场之间的耦合变化型。最后,利用预测因子和预测量的奇异值模态对应的时间系数以及预测时间段 $t+1$ 预测因子场,通过多元线性回归方法进行统计降尺度预测。

文中夏季是 6—8 月的季节平均,冬季是 12—2 月季节平均。利用交叉检验检验预测模型。数据逐年去掉一年建模预测,减少建模对样本长度的依赖。

2 CFSv2 气候模式对 2015/2016 气候预测性能

2.1 2015 年夏季和 2016 年冬季 CFSv2 气候预测

首先,从业务应用角度,评估 CFSv2 模式提前 4 个月对 2014—2016 年逐月 Niño3.4 区 ($170^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\text{N}\sim 5^{\circ}\text{S}$) 海温距平演变的预测能力,即 2 月预测 6 月海温距平,3 月预测 7 月,依次类推。图 1 显示了 CFSv2 模式能较好预测 Niño3.4 区海温距平演变,与观测海温距平演变一致,并能很好预测 Niño3.4 在 2015 年 11 月出现的峰值,但模式预

测 Niño3.4 区海温逐月的距平值明显强于观测值。对于 2015 年我国 160 站点夏季降水预测,2015 年夏季我国东部降水距平百分率空间分布的实况特征是“南正北负”形势,长江流域以北(包含长江中上游)是负异常而长江流域以南降水为正异常,主要正异常区在长江中下游(图 2a)。与观测相比,CFSv2 模式在降水异常的空间分布预测有较大的偏差(图 2b),没有预测出“南正北负”降水异常型,预测长江流域上游降水负异常,中下游正异常,我国东部和北部大部分降水正异常。其预测与观测的空间相关系数(ACC)是 0.21,显著性通过 95%,距平同号率是 50%。2016 年我国 160 站点冬季气温实况是内蒙,东北部分区域,西南和华南区域气温距平负异常,我国其它大部分区域气温距平正异常,而 CFSv2 模式预测全国气温距平一致偏暖,其预测气温距平值也显著高于观测,预测 ACC 为 0.19,显著性通过 95%,距平同号率 63%。

再分析资料显示,2015 夏季海平面气压(SLP)距平场显示从巴伦支海到东西伯利亚海显著负异常,欧亚大陆至白令海是正异常,北太平洋中部是负异常(图 3a),西北太平洋区域是正异常。表明:东亚纬向的海陆热力差异较弱,东亚夏季风随之减弱。与此对应,850 hPa 风场,从西伯利亚到贝加尔湖区域是反气旋性环流异常,北太平洋中部是气旋性环流异常,进而加强东亚沿岸偏北风气流异常。同时,西太平洋反气旋性环流位于菲律宾及以东区域,较常年位置偏西和偏强,不利于其西北外围的暖湿气流北上。我国南方及长江中下游区域正好处于偏北干冷气流和偏南暖湿气流辐合的区域造成该地多雨(图 4a)。CFSv2 模式对欧亚中高纬环流 SLP 距平环流预测与观测符号相反,对北太平洋 SLP 距平环流的预测与观测符号一致,但数值明显偏小(图

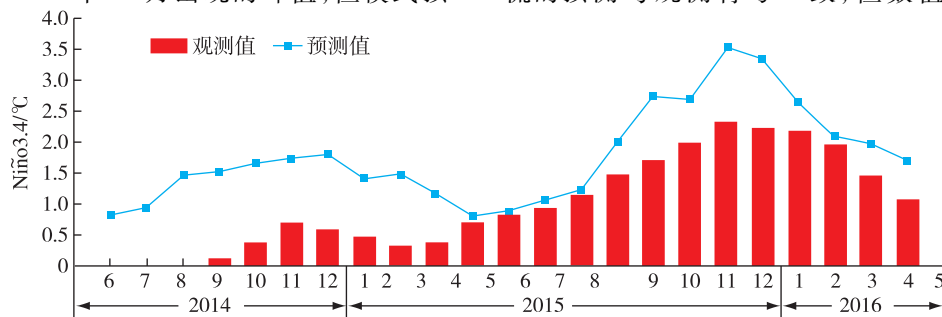


图 1 2014—2016 年 Niño3.4 区逐月海温距平的演变(红色柱为观测值,蓝绿色线为 CFSv2 模式提前 4 个月的预测值;单位:°C)

Fig.1 Observed (red) and CFSv2-predicted monthly SST anomaly over the Niño3.4 region ($5^{\circ}\text{N}\sim 5^{\circ}\text{S}$, $170^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$) during 2014—2016 (the prediction leadtime is 4 months; units: °C)

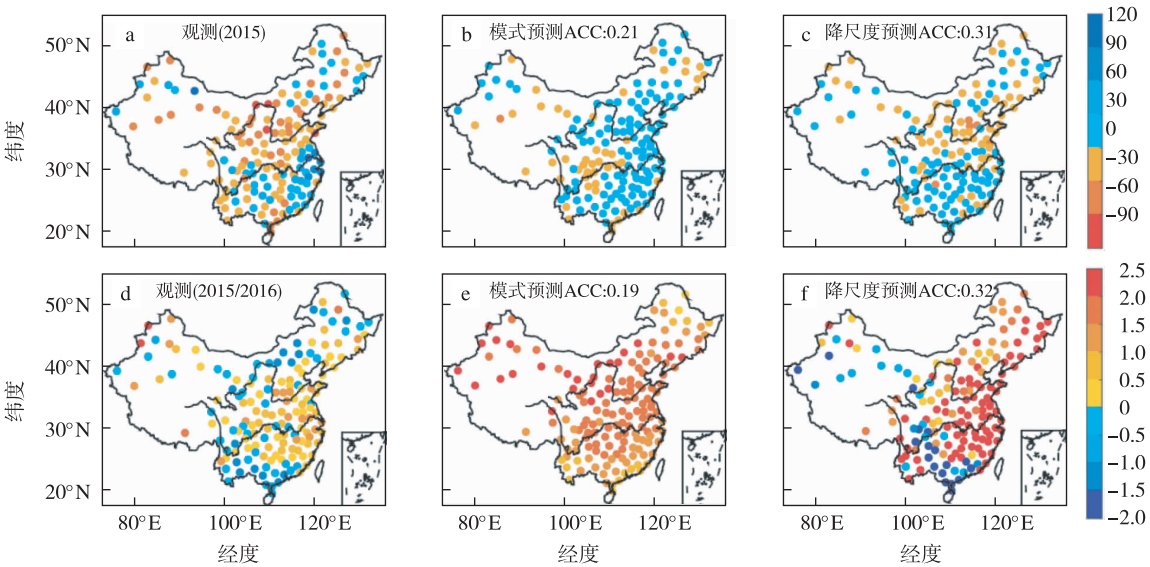


图2 2015年全国(160站)夏季降水距平百分率(a—c,单位:%)和2015/2016年冬季2 m气温距平(d—f,单位:℃)空间分布 a,d.观测;b,e.模式预测;c,f.降尺度预测

Fig.2 (a—c) The percentage of the summer rainfall anomaly at 160 stations in China in 2015 (units:%) and (d—f) the winter temperature anomaly at 2 m (units:℃): (a, d) observation; (b, e) CFSv2 prediction; (c, f) downscaling prediction

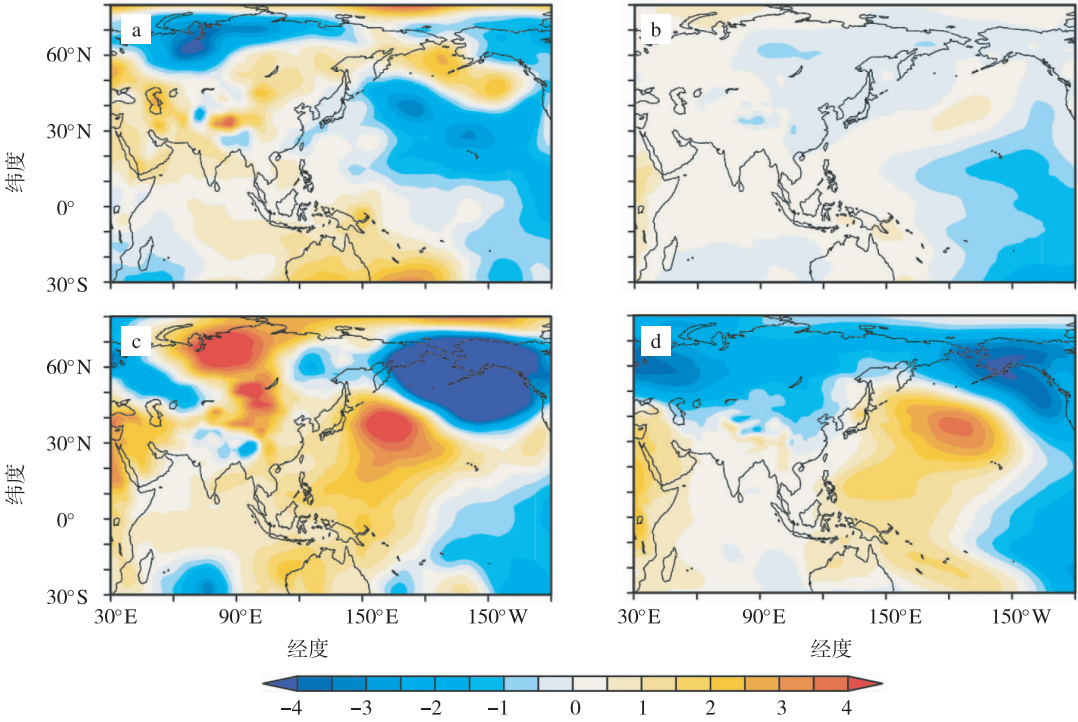


图3 2015/2016年海平面气压异常场(单位:hPa) a.2015年夏季观测;b.2015年夏季CFSv2模式预测;c.2016年冬季观测;d.2016年冬季CFSv2模式预测

Fig.3 SLP anomaly in 2015/2016 (units:hPa): (a, b) summer; (c, d) winter; (a, c) observation; (b, d) CFSv2 prediction

3b)。CFSv2 预测东亚纬向的海陆热力差异和东亚夏季风明显加强。在 850 hPa 风场上,可以看到 CFSv2 预测东亚沿岸盛行偏南风异常(图 4b)。由

此,不难理解 CFSv2 模式为什么会预测我国大部分区域降水异常多,特别是北方地区夏季降水正异常,其预测结果与实际相反。

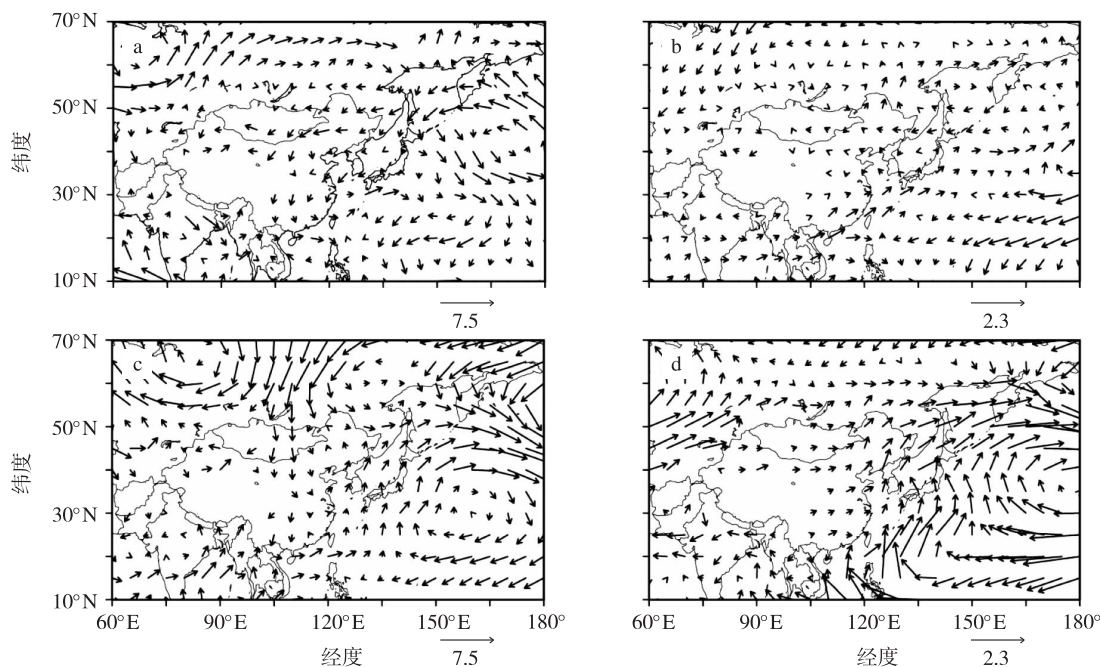


图 4 2015/2016 年 850 hPa 水平风场异常场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) a.2015 年夏季观测;b.2015 年夏季 CFSv2 模式预测;c.2016 年冬季观测;d.2016 年冬季 CFSv2 模式预测

Fig.4 Wind anomaly at 850 hPa in 2015/2016 (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$): (a, b) summer; (c, d) winter; (a, c) observation; (b, d) CFSv2 prediction

再分析资料显示,在 2016 年冬季 SLP 异常场上,SLP 正异常区域在巴尔喀什湖和贝加尔湖之间,以及东亚和北太平洋中高纬度。SLP 负异常在贝加尔湖以东到白令海,表明阿留申低压加强并主体偏东(图 3c)。并且,2016 年冬季东亚大陆和北太平洋间海陆热力差异减弱,冬季风减弱。与此对应,850 hPa 风场(图 4c),我国大部分地区盛行弱的偏北风异常。CFSv2 模式预测结果显示欧亚中高纬以及欧亚大陆为 SLP 负异常,与观测结果相反,但能较好地预测北太平洋高压加强。CFSv2 预测东亚沿岸和我国大部分地区是强盛的偏南气流。显然,CFSv2 模式预测 2016 年冬季是显著弱的冬季风形势(图 3d、4d)。由此,也不难理解 CFSv2 模式为什么会预测出 2016 年冬季我国一致地偏暖,预测的气温正异常值高于观测(图 2e)。

2.2 ENSO 遥相关的气候预测

虽然 CFSv2 模式能很好预测 2014—2016 年极强 ENSO 演变,但对 2015/2016 年夏季和冬季环流形势,特别是欧亚大陆和中高纬气候系统有误差,但 CFSv2 模式对北太平洋和热带环流仍有较好的预测效能,特别是西北太平洋副高异常(图 3b、3d、4b、4d)。因为这些区域是海气相互作用较强区域,受 ENSO 直接影响(Wang et al., 2000)。将 Niño3.4

区指数分别回归到夏季和冬季 850 hPa 的风场(图 5),结果显示当 El Niño 发生时,冬、夏季西北太平洋反气旋性环流显著加强,东亚沿岸盛行偏南的暖湿气流,对应夏季西北太平洋副高偏强偏西,从而易造成我国南方降水增多。当冬季西北太平洋高压偏强偏北时,其西北外围的暖湿气流在我国东部地区盛行,有利于我国东部气温增加。CFSv2 气候模式正确地预测 2015 年夏季西太平洋副高偏强和偏西(图略)。主要由于 ENSO 与西太平洋副高的变化联系密切,在 2015/2016 极强 ENSO 事件下,CFSv2 气候模式对西北太平洋副高和北太平洋环流的预测也较 ENSO 常态下更为准确。NZC-CCSM4 耦合模式(马洁华和王会军, 2014)也成功地预测出 2015/2016 西太平洋副高的变化。

然而,CFSv2 模式对我国 160 个站点的降水和气温预测存在很大偏差,甚至与观测相反。因此,要提高我国站点降水和气温的预测的准确度,一方面改进气候模式对热带外的气候预测效能,一方面结合模式现有的预测效能,发展新的预测方法,将动力模式和统计模式结合进行预测。

3 基于年际增量的气候预测

3.1 2015 年长江中下游夏季降水的预测

赵振国和刘海波(2003)分析长江中下游夏季

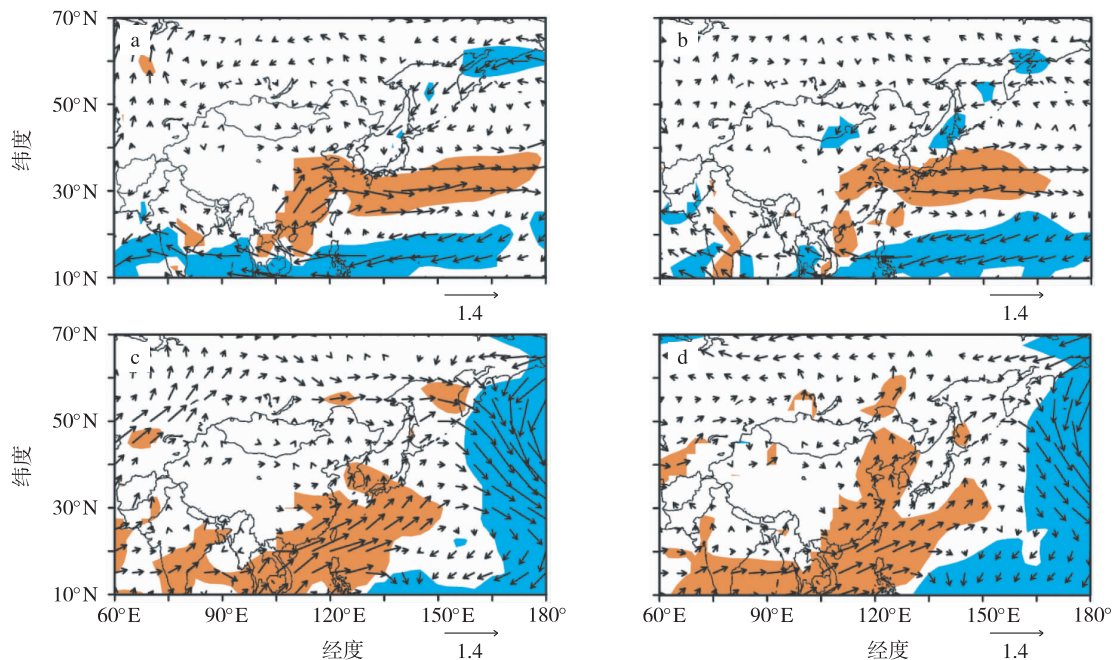


图5 冬季 Niño3.4 指数回归 1983—2015 年夏季(a—b)和 1983—2016 年冬季(c—d)850 hPa 水平风场
(单位:m/s;阴影表示通过了 0.05 信度的显著性检验) a,c.观测回归场;b,d.模式回归场

Fig.5 Linear regression of winter Niño3.4 index during 1983—2015 on the (a,b) summer and (c,d) winter wind at 850 hPa during 1983—2016 (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$): (a, c) observation; (b, d) CFSv2 prediction (shading denotes significance at the 95% level)

洪涝预测失败的一个原因是东亚阻塞高压很难预测,其次长江流域的年际和年代际变化的预测信号不一致,预测难以决断,如 1999 年和 1954 年。范可等(2007)提出年际增量的预测方法并利用冬季和春季关键大气环流建立长江中下游夏季降水的物理统计预测模型,包含南极涛动,欧亚型大气遥相关,印尼—澳大利亚附近的 850 和 200 hPa 的经向风垂直切变等,这个模型很好地回报长江中下游夏季降水的逐年变化,1997—2006 回报预测误差是 18%,对 1999 年回报的相对误差百分率仅 10%,并能再现长江中下游在 1984—1998 年年代际上升趋势和 1998—2006 年年代际下降趋势。预测模型具有较好的效能主要是由于年际增量方法可以放大预测信号,特别是中高纬系统,并且对年际和年代际趋势有较好的预测。

由于每年 3 月要提交预测结果,本文基于以上的模型和前人的工作,采用年际增量的预测方法,根据图 6 给出年际增量的长江中下游区域夏季降水在 1982—2014 年与相关的年际增量的冬季环流和冬季北极海冰相关场,选取冬季(2 月以前)的 4 个预测因子建模并进行预测。其中预测因子 1 是前冬南印度洋 SLP 气压指数,定义为 SLP 的区域平均(55

~75°E,7.5~17.5°S)。在南印度洋,海平面气压指数与冬季海温之间呈现类似于印度洋偶极子变率模态(徐志清和范可,2012)。同时与赤道东太平洋海温呈现正相关;当冬季南印度洋海平面气压正异常,通过经向遥相关使热带印度洋盛行东风异常,西北太平洋反气旋增强,长江中下游水汽输送增加,进而影响降水增加(徐志清和范可,2012);预测因子 2 是澳大利亚冬季区域海温指数(150~170°E,20~40°S)。已有研究表明澳大利亚东侧冬季海温与我国长江流域夏季降水之间具有同位相变化关系。当冬季澳大利亚东侧海温变暖时,随后夏季西太平洋副热带高压和东亚西风急流位置往往偏南,我国大陆沿岸低层盛行异常的西南风,有利于长江流域降水增多,反之亦然(刘舸等,2008;周波涛,2011);预测因子 3 是前冬 1 000 hPa 贝加尔湖的气温场(110~135°E,40~60°N)。20 世纪 90 年代后期,贝加尔湖地表气温变化与我国东部夏季风降水的关系最为显著;贝加尔湖地表气温的急剧上升,通过影响蒙古气旋的变化,对我国东部降水格局产生影响(徐康等,2011),有利于夏季冷空气的持续南下,长江中下游地区降水偏多;预测因子 4 是前冬海冰密集度(20.5~90.5°E,83.5~88.5°N)。因冬季北极海冰

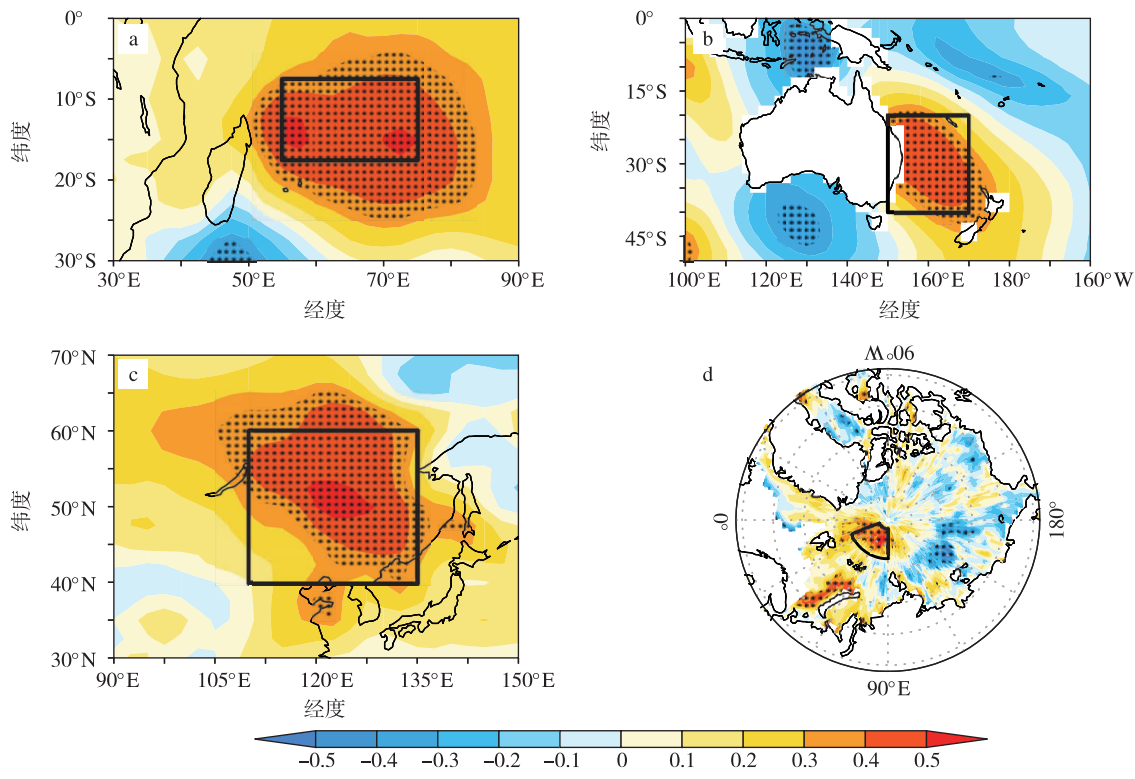


图 6 1982—2014 年长江中下游夏季降水百分率年际增量与预测因子之间相关场(打点部分表示通过了 0.05 信度的显著性 t 检验) a.前冬海平面气压场;b.前冬海温;c.前冬 1 000 hPa 气温场;d.前冬海冰密集度

Fig.6 Correlation coefficients between the year-to-year increment percentage of summer rainfall over the Yangtze River valley and the year-to-year increment of the winter atmospheric circulation in the year-to-year increment form, for (a) winter SLP, (b) winter SST, (c) air temperature at 1 000 hPa, and (d) winter sea-ice intensity(dots denote significance at the 95% level)

偏多,后期 3—6 月冷空气路径偏北,东亚大陆中纬度大部分地区冷空气活动弱,不易触发不稳定抬升,降水偏少(武炳义和黄荣辉,1999)。

在 1982—2014 年交叉检验得到的长江中下游夏季降水与观测之间相关系数为 0.56,显著性超过 99%水平,均方根误差为 17%;同时,利用该预测模型实时预测 2015 年长江中下游夏季距平百分率为 38.6%,实际观测为 31%(图 7a),预测结果与观测非常接近。预测模型也很好再现长江中下游夏季降水 20 世纪 80 年代至 1999 年的年代际上升趋势和 2000 年后的年代际的下降趋势。

3.2 2016 年华北冬季气温的预测

相对于降水预测而言,气温总体上有较高的预测水平,主要的一个原因是随着全球变暖背景下气温正异常事件增多,预测准确率有所提高,并且气候模式对气温的高预测技巧有很大一部分依赖于气温变暖的趋势。然而,在实际预测中,很难把握气温距平正、负异常的幅度和冷暖转折。根据 Fan(2011)

利用年际增量方法建立华北区域冬季气温预测模型,开展 2016 年冬季华北的实时预测。其中预测因子是前一年夏季和冬季的北太平洋涛动和北大西洋涛动及南极涛动等。这个模型在 1967—2015 年交叉检验得到的华北冬季气温与观测之间相关系数为 0.69,显著性高于 99%,均方根误差为 0.91 $^{\circ}\text{C}$;较好再现华北冬季气温自 20 世纪 70 年代以来上升的趋势以及 1998 年后缓慢下降的趋势。2016 年实时预测华北冬季气温距平为 1.20 $^{\circ}\text{C}$,实际观测为 0.51 $^{\circ}\text{C}$ (图 7b)。距平符号正确但预测值高于观测,由此气温异常幅度的准确预测还是非常困难,以后仍需要进一步改进模式。

以上两个预测模型均显示了年际增量方法在实时预测中的有效性,未来将考虑不同年代下的预测因子的有效性,并结合数值气候模式结果进一步改进预测模型。

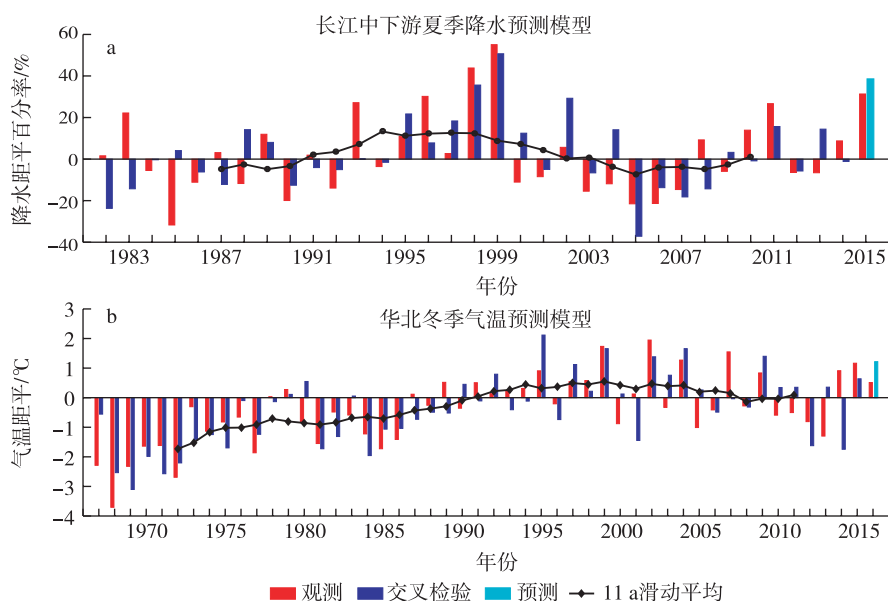


图7 1982—2014 年长江中下游夏季降水距平百分率(a;单位:%)和 1967—2015 年华北冬季气温距平(b;单位:℃)的预测模型(观测(红色柱);交叉检验(蓝色柱),2015 夏季、2016 年冬季预测结果(蓝绿色柱);黑色实线为观测值的 11 a 滑动平均结果)

Fig.7 The (a) observed and predicted percentage of summer rainfall over the Yangtze River valley during 1982—2014 (units: %), and the (b) observed and predicted winter temperature anomaly over North China (units: °C), wherein the observation is denoted red, the cross-validation prediction blue, the forecasting of 2015/2016 green, and the 11-year sliding window black

4 基于 CFSv2 的动力和统计结合的预测

考虑到 CFSv2 模式的主要气候预测效能 in 热带地区,虽然对我国 160 站点的降水和气温预测效能有限(图 2),但对东亚地区环流预测有一定的预测能力。基于刘颖等(2013)建立的基于 CFSv2 实时预测数值产品及观测资料的统计降尺度的预测系统的思路,分别开展我国 160 个站点 2015 年夏季和 2016 年冬季的气温预测。一方面选取 CFSv2 模式的同期高预测效能的气候场,另一方面选取具有物理过程的前期气候场作为预测场,结合两者开展预测。

选取前期秋季热带太平洋海温 ($160^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{W}$, $10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$)、CFSv2 夏季东亚地区 SLP 场 ($60^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}$, $5^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$) 作为预测因子场,采用场耦合预测的方法,开展 2015 年夏季我国 160 站点夏季降水的实时预测(图 2c)。降尺度后的结果较原始模式结果有显著提高,尤其是我国北方区域降水的预测,较好地再现了“北旱南涝”降水异常型,其预测结果更接近观测。降尺度后的预测 ACC 从 0.21 提高到

0.31,预测距平同号率从 50% 提高到 60%。

近几十年,北极海冰异常对欧亚冬季异常有着重要的作用。随着北极海冰的减少,欧亚中高纬环流更具有波浪状,经向环流加大,欧亚冬季极端事件更易发生。20 世纪 80 年代中期之后,9 月北极海冰对我国冬季气温的影响显著增强(李维京等, 2013)。选取前期夏季北极海冰 ($0^{\circ} \sim 360^{\circ}$, $60^{\circ} \sim 90^{\circ}\text{N}$) 和 CFSv2 冬季东亚地区 2 m 温度 ($70^{\circ} \sim 140^{\circ}\text{E}$, $15^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$) 的预测结果,采用场耦合预测的方法建立预测系统,开展 2016 年我国 160 站点冬季的气温预测(图 2f)。显然,降尺度预测结果较 CFSv2 原始模式结果有加大改进,预测 ACC 从 0.19 提高到 0.32,距平同号率从 63% 提高到 75%。

5 结论和讨论

本文研究了 2015/2016 年极强 ENSO 异常下 CFSv2 气候模式对我国冬、夏季的业务实时预测能力,并基于 CFSv2 耦合模式有效的预测效能,结合我国夏季降水和气温变化规律,研制动力和统计结合的我国 160 个站点降尺度预测模型并开展 2015/2016 实时预测。此外,利用年际增量的预测

方法,开展 2015/2016 我国长江中下游区域夏季降水和华北区域冬季气温的实时预测。研究结果表明:CFSv2 模式较成功地预测了 2014—2016 年逐月 ENSO 的演变,包括 2015 年 11 月 ENSO 峰值的预测。并且,CFSv2 模式能成功地预测 2015 年夏季西北太平洋副热带高压和冬季的北太平洋高压的变化,由此说明极强的 ENSO 事件的确有利于耦合模式正确地预测 ENSO 时间演变及其 ENSO 密切相关的气候系统,但对欧亚中高纬环流系统的预测效能不高,进而影响对我国 160 站点的降水和气温预测的准确度。

年际增量的气候预测方法可放大中高纬的气候预测信息,能有效地应用于 2015/2016 长江中下游夏季降水和华北冬季气温的实时预测。基于范可等(2007)的预测模型和前人工作的基础上,本文采用 4 个冬季(2 月以前)的预测因子建立长江中下游夏季降水的预测模型,在 1982—2014 年交叉检验下,相关系数达到 0.69,均方根误差是 17%,并能很好再现 20 世纪 80 年代的降水多雨的变化趋势和 2000 年后的少雨变化趋势,对 2015 年长江中下游

夏季降水距平百分率的实时预测是 38.6%,观测是 31%,预测值与观测值非常接近。根据 Fan (2011)建立华北冬季气温的预测模型进行 2016 年冬季气温预测,其结果显示模型能很好地再现 20 世纪 70 年代变暖的趋势和 1998 年后气温降低的趋势,2016 华北冬季气温距平预测是 1.20 °C,高于观测值 0.51 °C。

最后,考虑前期热带太平洋海温和北极海冰的变化,以及 CFSv2 较好的预测效能,研制并开展 2015/2016 我国 160 站动力和统计结合的降尺度气候预测,其降尺度气温和降水预测结果(ACC,同号率等)显著高于 CFSv2 模式直接预测的结果。

然而,我国短期气候预测研究是世界难题之一,我国气候变异规律极其复杂,要提高我国短期气候预测准确度,要不断改进耦合模式对热带外气候的预测效能,发展地球系统模式,深入研究我国气候变异的规律,探索研究适合我国气候预测的创新的理论、方法和预测系统。其中,探索如何有效地将统计和动力气候模式结合是未来提高我国气候预测准确度的有效方法之一。

参考文献(References)

- 陈兴芳,赵振国,2000.中国汛期降水预测研究及其应用[M].北京:气象出版社. Chen X F,Zhao Z G,2000.The research and application of the rainfall prediction in the flood period of China[M].Beijing:China Meteorological Press.(in Chinese).
- 丁裕国,江志红,施能,等,1999.奇异交叉谱分析及其在气诊断中的应用[J].大气科学,23(1):91-100. Ding Y G,Jiang Z H,Shi N,et al.,1999. Singular cross-spectrum analysis and its applicability in climatic diagnosis[J].Chin J Atmos Sci,23(1):91-100.(in Chinese).
- Fan K,2011.A statistical scheme for seasonal forecasting of North China winter temperature[J].Atmos Oceanic Sci Lett,4:81-85.
- Fan K,Wang H J,2009.A new approach to forecasting typhoon frequency over the western North Pacific[J].Wea Forecasting,24(4):974-978.doi: 10.1175/2009WAF2222194.1.
- 范可,王会军,Choi Young-Jean,2007.一个长江中下游夏季降水的物理统计预测模型[J].科学通报,52(24):2900-2905. Fan K,Wang H J, Choi Y J,2007.A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of the Yangtze River Valley summer rainfall[J].Chin Sci Bull,52(24):2900-2905.(in Chinese).
- Fan K,Liu Y,Chen H P,2012.Improving the prediction of the East Asian summer monsoon:New approaches[J].Wea Forecasting,27:1017-1030.doi: 10.1175/WAF-d-11-000921.
- Fan K,Tian B Q,Wang H J,2015.New approaches for the skillful prediction of the winter North Atlantic Oscillation based on coupled dynamic climate models[J].Int J Climatol,36:82-94.doi:10.1002/joc.4330.
- 高辉,王永光,2007. ENSO 对中国夏季降水可预测性变化的研究[J].气象学报,65(1):131-137. Gao H,Wang Y G,2007.On the weakening relationship between summer precipitation in China and ENSO[J].Acta Meteorologica Sinica,65(1):131-137.(in Chinese).
- Huang B,Freeman E,Lawrimore J H,et al.,2015.Extended reconstructed sea surface temperature version 4(ERSST.v4),Part I.Upgrades and intercomparisons[J].J Climate,28(3):911-930.
- 黄荣辉,陈文,丁一汇,等,2003.关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究[J].大气科学,27(4):484-502. Huang R H,Chen W, Ding Y H,et al.,2003.Studies on the monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle[J].Chin J Atmos Sci,27(4): 484-502.(in Chinese).
- 金祖辉,陶诗言,1999. ENSO 循环与中国东部夏季和冬季降水关系的研究[J].大气科学,23(6):663-672. Jin Z H,Tao S Y,1999.A study on the relationships between ENSO cycle and rainfalls during summer and winter in the Eastern China[J].Chin J Atmos Sci,23(6):663-672.(in Chinese).
- Kalnay E,Kanamitsu M,Kistler R,et al.,1996.The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J].Bull Amer Meteor Soc,77(3):437-471.
- Lang X M,2008.Prediction model for spring dust weather frequency in North China[J].Science in China, Series D,51:709-720.

- 李崇银,穆穆,周广庆,等,2008. ENSO 机理及其预测研究[J]. 大气科学, 32(4): 761-780. Li C Y, Mu M, Zhou G Q, et al., 2008. Mechanism and prediction studies of the ENSO[J]. Chin J Atmos Sci, 32(4): 761-780. (in Chinese).
- 李维京,李怡,陈丽娟,等,2013. 我国冬季气温与影响因子关系的年代际变化[J]. 应用气象学报, 24(4): 385-396. Li W J, Li Y, Chen L J, et al., 2013. Inter decadal variability of the relationship between winter temperature in China and its impact factors[J]. J Appl Meteor Sci, 24(4): 385-396. (in Chinese).
- 林振山,1992. 长期预报的相空间近邻等距法[J]. 大气科学, 16(5): 530-537. Lin Z S, 1992. The model of equal distance of near neighborhood in the phase space for long-term forecast[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 16(5): 530-537. (in Chinese).
- 刘舸,张庆云,孙淑清,2008. 澳大利亚东侧环流及海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系[J]. 大气科学, 32(2): 231-240. Liu G, Zhang Q Y, Sun S Q, 2008. The relationship between circulation and SST anomaly east of Australia and the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chin J Atmos Sci, 32(2): 231-240. (in Chinese).
- Liu Y, Fan K, 2014. An application of hybrid downscaling model to forecast summer precipitation at stations in China[J]. Atmos Res, 143: 17-30. doi: 10. 1016/j. atmosres. 2014. 01. 024.
- Liu Y, Ren H L, 2015. A hybrid statistical downscaling model for prediction of winter precipitation in China[J]. Int J Climatol, 35: 1309-1321. doi: 10. 1002/joc. 4058.
- 刘颖,范可,张颖,2013. 基于 CFS 模式的中国站点夏季降水的统计降尺度预测[J]. 大气科学, 37(6): 1287-1299. Liu Y, Fan K, Zhang Y, 2013. A statistical downscaling model for summer rainfall over China stations based on the Climate Forecast System[J]. Chin J Atmos Sci, 37(6): 1287-1299. (in Chinese).
- 马洁华,王会军,2014. 一个基于耦合气候系统模式的气候预测系统的研制[J]. 中国科学: 地球科学, 44: 1689-1700. Ma J H, Wang H J, 2014. Design and testing of a global climate prediction system based on a coupled climate model[J]. Science China: Earth Sciences, 44: 1689-1700. (in Chinese).
- 马开玉,2003. 统计预测技术的回顾和展望[J]. 热带气象学报, 19(4): 436-441. Ma K Y, 2003. Reviewing the statistical techniques of climatic forecasting[J]. J Trop Meteor, 19(4): 436-441. (in Chinese).
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al., 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. J Geophys Res, 108(D14): 1063-1082.
- Saha S, Moorthi S, Wu X, et al., 2014. The NCEP climate forecast system version 2[J]. J Climate, 27(6): 2185-2208.
- 施能,曹鸿兴,1992. 基于所有可能回归的最优气候预测模型[J]. 南京气象学院学报, 4(15): 21-26. Shi N, Cao H X, 1992. The optimum climate forecasting model based on all possible regressions[J]. J Nanjing Inst Meteor, 4(15): 21-26. (in Chinese).
- Tian B Q, Fan K, 2015. A skillful prediction model for winter NAO based on Atlantic sea surface temperature and Eurasian snow cover[J]. Wea Forecasting, 30: 197-205. doi: 10. 1175/WAF-D-14-00100. 1.
- Wang B, Wu R, Fu X, 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. J Climate, 13: 1517-1536.
- Wang H J, 2002. Instability of the East Asian Summer monsoon-ENSO relations[J]. Adv Atmos Sci, 19(1): 1-11.
- Wang H J, Fan K, 2009. A new scheme for improving the seasonal prediction of summer precipitation anomalies[J]. Wea Forecasting, 24: 548-554. doi: 10. 1175/2008WAF2222171. 1.
- 王启光,封国林,支蓉,等,2012. 长江中下游汛期降水数值预报业务模式误差场预报研究[J]. 气象学报, 70(4): 789-796. Wang Q G, Feng G L, Zhi R, et al., 2012. A study of the error field of the flood period precipitation of the mid-lower reaches of the Yangtze River as predicted by an operational numerical prediction model[J]. Acta Meteorologica Sinica, 70(4): 789-796. (in Chinese).
- 王绍武,赵宗慈,1987. 长期天气预报基础[M]. 上海: 上海科学技术出版社. Wang S W, Zhao Z C, 1987. The basis of long-term weather forecast [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers. (in Chinese).
- 魏凤英,2007. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 2 版. 北京: 气象出版社. Wei F Y, 2007. Modern climate diagnostic and statistical forecasting techniques [M]. 2nd Edition. Beijing: China Meteorology Press. (in Chinese).
- 武炳义,黄荣辉,1999. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风[J]. 大气科学, 23(6): 641-651. Wu B Y, Huang R H, 1999. Effects of the extremes in the North Atlantic Oscillation on East Asia winter monsoon[J]. Chin J Atmos Sci, 23(6): 641-651. (in Chinese).
- 吴统文,宋连春,李伟平,等,2014. 北京气候中心气候系统模式研发进展—在气候变化研究中的应用[J]. 气象学报, 72(1): 12-29. Wu T W, Song L C, Li W P, et al., 2014. An overview on progress in Beijing Climate Center Climate System Model—Its development and application to climate change studies[J]. Acta Meteorologica Sinica, 72(1): 12-29. (in Chinese).
- 徐康,何金海,祝从文,2011. 近 50 年中国东部夏季降水与贝加尔湖地表气温年代际变化的关系[J]. 气象学报, 69(4): 570-580. Xu K, He J H, Zhu C W, 2011. The interdecadal linkage of the summer precipitation in eastern China with the surface air temperature over Lake Baikal in the past 50 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 69(4): 570-580. (in Chinese).
- 徐志清,范可,2012. 冬季和春季印度洋海温异常年际变率模态对中国东部夏季降水的可能影响过程[J]. 大气科学, 36(5): 879-888. Xu Z Q, Fan K, 2012. Possible process for influences of winter and spring Indian Ocean SST anomalies interannual variability mode on summer rainfall over eastern China[J]. Chin J Atmos Sci, 36(5): 879-888. (in Chinese).
- 严华生,王学仁,1991. 多因变量及要素场的统计预报[M]. 北京: 气象出版社. Yan H S, Wang X R, 1991. Multi-variable factors and statistic fore-

- cast of elements field[M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).
- 俞永强, 郑伟鹏, 张学洪, 等, 2007. LASG 耦合气候系统模式 FGCM-1.0[J]. 地球物理学报, 50(6): 1677-1687. Yu Y Q, Zheng W P, Zhang X H, et al., 2007. LASG coupled climate system model FGCM-1.0[J]. Chin J Geophys, 50(6): 1677-1687. (in Chinese).
- 曾庆存, 袁重光, 王万秋, 等, 1990. 跨季度气候距平气候数值预测试验[J]. 大气科学, 14(1): 10-25. Zeng Q C, Yuan C G, Wang W Q, et al., 1990. Experiments in numerical extraseasonal prediction of climate anomalies[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 14(1): 10-25. (in Chinese).
- 翟盘茂, 余荣, 郭艳君, 等, 2016. 2015/2016 年厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响[J]. 气象学报, 74(3): 309-321. Zhai P M, Yu R, Guo Y J, et al., 2016. The strong El Niño in 2015/2016 and its dominant impacts on global and China's climate[J]. Acta Meteorologica Sinica, 74(3): 309-321. (in Chinese).
- 张邦林, 丑纪范, 1991. 经验正交函数在数值模拟中的应用[J]. 中国科学 B, 4: 442-448. Zhang B L, Chou J F, 1991. Application of EOF in the climate numerical simulation[J]. Science in China (Series B), 4: 442-448. (in Chinese).
- 赵振国, 刘海波, 2003. 我国短期气候预测的业务技术发展[J]. 浙江气象, 24(3): 1-6. Zhao Z G, Liu H B, 2003. The development on the operational technique for short term climate forecast[J]. Journal of Zhejiang Meteorology, 24(3): 1-6. (in Chinese).
- 周波涛, 2011. 冬季澳大利亚东侧海温与长江流域夏季降水的联系及可能物理机制[J]. 科学通报, 56(16): 1301-1307. Zhou B T, 2011. Linkage between winter sea surface temperature east of Australia and summer precipitation in the Yangtze River valley and a possible physical mechanism [J]. Chin Sci Bull, 56(16): 1301-1307. (in Chinese).

Hybrid dynamical and statistical climate prediction in China during the extremely strong El Niño of 2015/2016

FAN Ke^{1,2}, TIAN Baoqiang^{1,2}, LIU Ying^{2,3}

¹Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

²Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology (CIC-FEMD), Nanjing 210044, China;

³Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Real-time seasonal climate prediction was performed in China during the extremely strong El Niño event of 2015/2016, through a combination of dynamical and statistical climate prediction. Generally, real-time summer (winter) climate prediction in China starts in February (October) in every year. The results showed that, although the NCEP-CFSv2 coupled model predicted the evolution of the extremely strong El Niño event in 2015/2016 well, its performance in predicting the summer rainfall anomaly of 2015 and the winter temperature of 2016 at 160 stations in China was limited. Compared to observation, CFSv2 predicted a stronger East Asian summer monsoon and weaker East Asian winter monsoon. One of the reasons for this is that CFSv2 is poor at predicting the extratropical climate system. Thus, based on the climate prediction direct outputs of the NCEP-CFSv2 model, we created a hybrid dynamical and statistical prediction model for forecasting the precipitation anomaly and temperature anomaly at 160 stations in China in 2015/2016. The skill of the hybrid of statistical and dynamical prediction model was higher than that of the direct prediction results of the NCEP-CFSv2 model. The spatial anomaly correlation coefficient (ACC) of summer rainfall at 160 stations in China in 2015 increased from 0.21 to 0.31 (exceeding the 99% significance level), along with the percentage of the same sign of the rainfall anomaly improving to 60% from 50%. The model reproduced the observed flood pattern in southern China, as well as the drought pattern in summer 2015. Meanwhile, the prediction ACC of winter temperature in China in 2016 increased to 0.32 from 0.19, and the percentage of the same sign of the temperature anomaly increased to 75% from 62%. Moreover, the year-to-year increment prediction method proposed by Fan et al. (2007) was applied successfully to predict summer rainfall over the Yangtze River valley in 2015, and winter temperature over North China in 2016. The year-to-year increment method predicts the year-to-year increment of the climate variable instead of the climate anomaly, in which the year-to-year increment of the climate is defined as the climate variable of the current year minus that of the previous year. The year-to-year increment of the climate variable was firstly predicted by the statistical or

dynamical model, and then the predicted climate anomaly or climate variable of the current year could be obtained by adding the predicted year-to-year increment to the observed one of the previous year. The advantage of the year-to-year increment is that it can amplify the prediction signal, especially the extra tropical climate signal. Furthermore, as the observed climate in the previous year is an accurate value containing the interannual and interdecadal signals, it further promotes the level of accuracy in predicting the interannual and interdecadal climate variable. The results showed that the summer rainfall anomaly over the middle and lower reaches of the Yangtze River valley in 2015 could be predicted successfully by the year-to-year increment; the predicted (observed) value in 2015 was 38.6% (31%). Meanwhile, the upward trend of the summer rainfall anomaly over the middle and lower reaches of the Yangtze River valley since the 1980s, and the downward trend since 2000, were also reproduced. The model reproduced the warming trend since the 1970s, and the slowly cooling trend since 1998, with the predicted (observed) winter temperature anomaly over North China being 1.20 °C (0.51 °C). However, there is still a long way to go in terms of improving the prediction skill level in China to a sufficiently high level. The extratropical climate prediction skill should be improved by improvement to the dynamical model. It is necessary to explore how to combine the dynamical climate model with the statistical climate model more effectively. Importantly, climate theory, methods and techniques, models, as well as climate dynamics suited for climate variability in China, should be further developed.

El Niño 2015/2016; NCEP-CFSv2 coupled model; dynamical and statistical climate prediction; year-to-year increment prediction; real-time prediction

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160814003

(责任编辑:张福颖)