

刘颖, 任宏利, 张培群, 等. 2020. 中国夏季降水的组合统计降尺度模型预测研究 [J]. 气候与环境研究, 25(2): 163–171. LIU Ying, REN Hongli, ZHANG Peiqun, et al. 2020. Application of the Hybrid Statistical Downscaling Model in Summer Precipitation Prediction in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (2): 163–171. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18168

中国夏季降水的组合统计降尺度模型预测研究

刘颖^{1,2} 任宏利¹ 张培群¹ 左金清^{1,2} 田奔¹ 万江华¹ 李永生³

1 国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

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, 南京 210044

3 黑龙江省气候中心, 哈尔滨 150030

摘要 现阶段的动力气候模式尚不能满足东亚区域气候预测的实际需求, 这就需要动力和统计相结合的方法, 将动力模式中具有较高预测技巧的大尺度环流信息应用到降水等气象要素的统计预测模型当中, 以改善后者预测效果。本文中所介绍的组合统计降尺度模型, 可将动力气候模式预测的大尺度环流变量和前期观测的外强迫信号作为预测因子来预测中国夏季降水异常。交叉检验结果显示, 组合统计降尺度预测模型的距平相关系数较原始模式结果有较大提高。在实时夏季降水预测中, 2013~2018 年平均的预测技巧相对较高, 趋势异常综合检验 (PS) 评分平均为 71.5 分, 特别是 2015~2018 年平均的 PS 评分预测技巧达到 72.7 分, 总体上高于业务模式原始预测和业务发布预测的技巧。该组合统计降尺度模型预测性能稳定, 为我国季节预测业务提供了一种有效参考。

关键词 组合统计降尺度模型 季节预测 夏季降水

文章编号 1006-9585(2020)02-0163-09

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18168

Application of the Hybrid Statistical Downscaling Model in Summer Precipitation Prediction in China

LIU Ying^{1,2}, REN Hongli¹, ZHANG Peiqun¹, ZUO Jinjing^{1,2}, TIAN Ben¹,
WAN Jianghua¹, and LI Yongsheng³

1 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Heilongjiang Climate Center, Harbin 150030

Abstract Nowadays, dynamical climate models are inefficient in meeting the real needs of climate prediction. An effective method is the combination of dynamical and statistical models. This combination integrates large-scale circulation information from the dynamical models into the statistical model to improve the prediction skill. On the basis of the higher prediction skill for the large-scale summer circulation variable of climate models and the significant relationship between the preceding ENSO signal and summer precipitation in China, a hybrid statistical downscaling

收稿日期 2018-12-26; 网络预出版日期 2019-09-29

作者简介 刘颖, 女, 1982 年出生, 副研究员, 主要从事气候预测和集合方法研究。E-mail: liuying@cma.gov.cn

通讯作者 任宏利, E-mail: renhl@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1506005、2017YFC1502302, 国家自然科学基金项目 41730964、41606019, 中央引导地方专项 ZY18C12

Funded by National Key Research and Development Program (Grants 2018YFC1506005 and 2017YFC1502302), National Natural Science Foundation of China (Grants 41730964 and 41606019), Central Government Guides Local Special Projects (Grant ZY18C12)

prediction method for summer precipitation anomaly prediction in China was proposed in this paper. Cross validation of seasonal prediction for summer precipitation in China was performed, and results showed that the downscaling method improved the multi-year average of anomaly correlation coefficient significantly. In real application, the average PS score reached 71.5/72.7 during 2013–2018/2015–2018, which is higher than that of the original model and the operational predictions issued by the Beijing Climate Center. This statistical downscaling model, which has stable predictive skill, is one of the effective references for operational seasonal prediction in China.

Keywords Hybrid statistical downscaling model, Seasonal prediction, Summer precipitation

1 引言

季节气候预测是针对未来一个季节或几个季节的气候异常进行预测,其预测时效较短,预测效果的验证较快,与我国国民经济、社会发展和政府决策息息相关,这就对季节气候预测业务的准确率提出了更高要求。近二十年来,众多的动力气候预测模式得到迅速发展,并成为季节气候预测的主要工具。一般来讲,气候模式的可预报性来源和预报性能存在显著的地区差异,可预报性最大的区域一般存在于热带,热带外地区包括东亚季风区的可预报性相对较低,其中大尺度环流变量的预测性能普遍高于降水(丁一汇, 2011)。

研究显示,亚太经合组织气候中心(APCC) CliPAS (Climate Prediction and its Application to Society) 计划中各模式对大尺度环流的预测技巧较高,对夏季降水的高预测技巧区集中在热带太平洋地区,而东亚地区的降水预测技巧总体偏低(Wang et al., 2009)。欧洲 DEMETER (Development of a European Multimodel Ensemble system for seasonal to in TERannual prediction) 模式对东亚、南亚季风区降水预报技巧同样很低,而高距平相关区主要在热带中东太平洋和热带东西印度洋地区(Wang et al., 2005; Liu and Fan, 2014)。英国 GloSea5 季节预测系统对东亚地区夏季降水的预测仅在中国长江流域存在显著正相关区(Li et al., 2016)。相比之下,国家气候中心季节预测业务模式 BCC_CSM1.1m 对东亚地区夏季降水预测的正距平相关区集中在中国长江流域和北方地区(Liu et al., 2015)。这些结果均表明,东亚特别是区域季节预测效果不理想,且存在明显的模式依赖性。

影响我国气候异常因素众多、相互关系复杂和预测方法多样,所以针对我国的夏季降水距平的预测,单纯依靠动力气候预测模式依然无法满足短期气候预测的业务需求。为此,将统计方法与动力模

式相结合的预测思想,能够有效利用统计方法和动力模式的互补优势,并已成为一种经济高效的改进气候预测的手段(Ren and Chou, 2006, 2007; 范可等 2007, 2008; Wang and Fan, 2009; Lang, 2011; Fan et al., 2012; Wang et al., 2015; 陈丽娟等, 2017)。其中,组合统计降尺度模型是利用预测因子和预测量之间主要模态的最优耦合变化型,将源于气候模式(GCM)的同期预测因子(如 500 hPa 高度场、海平面气压场)和前期预测因子(如高原积雪、ENSO 信号)纳入到模型当中,对中国区域的季节降水进行降尺度预测(Liu and Fan, 2012; Liu and Ren, 2015; 刘颖等, 2017)。业务上的季节气候预测主要包括夏季汛期预测和冬季年度预测,是国家气候中心每年最重要的业务工作之一,尤其是汛期预测,来自多家单位和多种客观方法的实时预测结果得到综合汇总,并最终形成预测意见。自 2013 年以来,组合统计降尺度模型就已经应用到我国汛期预测业务中,该模型的多年汛期预测技巧表现良好,预测准确率较高,是季节预测有效的方法之一。

本文拟对组合统计降尺度模型构建方案、预测因子选取和预测检验技巧进行介绍,并简要分析该模型在实际预测业务中的应用效果,以便为我国气候预测业务提供参考。

2 资料与方法

本文采用 1991~2018 年 NCEP/NCAR 月平均再分析资料中的海平面气压场(SLP),水平分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度)(Kalnay et al., 1996)。海表面温度资料为 1990~2017 年 NOAA 最优插值 SST V2 数据(Optimum Interpolation Sea Surface Temperature),水平分辨率为 1.0° (纬度) $\times 1.0^\circ$ (经度)(Reynolds et al., 2002)。观测数据为中国气象局国家气象信息中心整编的全

国 160 台站月平均降水资料。国家气候中心第二代季节预测模式系统 BCC_CSM1.1m 模式中 1991~2018 年的 SLP 场、降水场的月平均资料, 水平分辨率为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度)。该模式采用集合预测方法, 分别包含滞后平均预报 (LAF) 和奇异向量扰动 (SV) 方法, 其中, LAF 方法共 15 个样本, SV 方法共 9 个样本, 文中使用 24 个样本的集合平均数据。本文选取 3 月初起报的 6、7、8 月 SLP 以及降水资料。

组合统计降尺度模型主要基于奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 来选取两变量空间型之间的最优耦合变化特征和相关关系 (Uvo et al., 2001; Paul et al., 2008)。SVD 能够分解出两个场 (预测因子和预测量) 占有较大解释方差的空间型, 有助于解释预测因子与预测量空间对之间的影响关联性。已有许多研究利用 SVD 等统计方法提高了中国地区季节降水和温度的预报能力 (黄茂怡和黄嘉佑, 2000; 张永领等, 2006; 贾小龙等, 2010)。本研究中, 组合统计降尺度模型综合使用了经验正交分解 (Empirical Orthogonal Function, EOF), SVD 和线性回归分析多种统计方法相结合, 得到大尺度环流场与局地降水之间稳

定的统计关系, 基于预测因子中的已知前兆性信号和同期环流变量的直接影响对预测量进行预测, 具体步骤请参考文献 (Liu and Fan, 2013)。

3 预测因子选取

对于季节气候预测而言, 海气耦合强迫对气候异常变化起着非常重要的作用, 而 ENSO 是季节预测最主要的可预报性来源, 它是年际变率的主要模态, 并通过全球遥相关影响各地区的温度和降水异常。当 ENSO 发生时, 其信号会影响东亚夏季风的强弱。一般来讲, El Niño 易于导致弱的夏季风, 而 La Niña 易于出现强的夏季风 (Wang et al., 1999) 如, 1998 年夏季, 伴随前一年的强 El Niño 事件, 导致弱的东亚夏季风, 使得当年夏季长江流域出现罕见洪水。这里选取前年秋季热带中东太平洋地区的海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 作为前期预测因子 (Gao et al., 2018)。图 1 给出了秋冬季热带太平洋 SST 与中国夏季降水的 SVD 第一模态对, 可以看到, SST 的 SVD 第一模态为 ENSO 的典型分布型, 表现为热带中东太平洋和热带西太平洋呈现相反的变

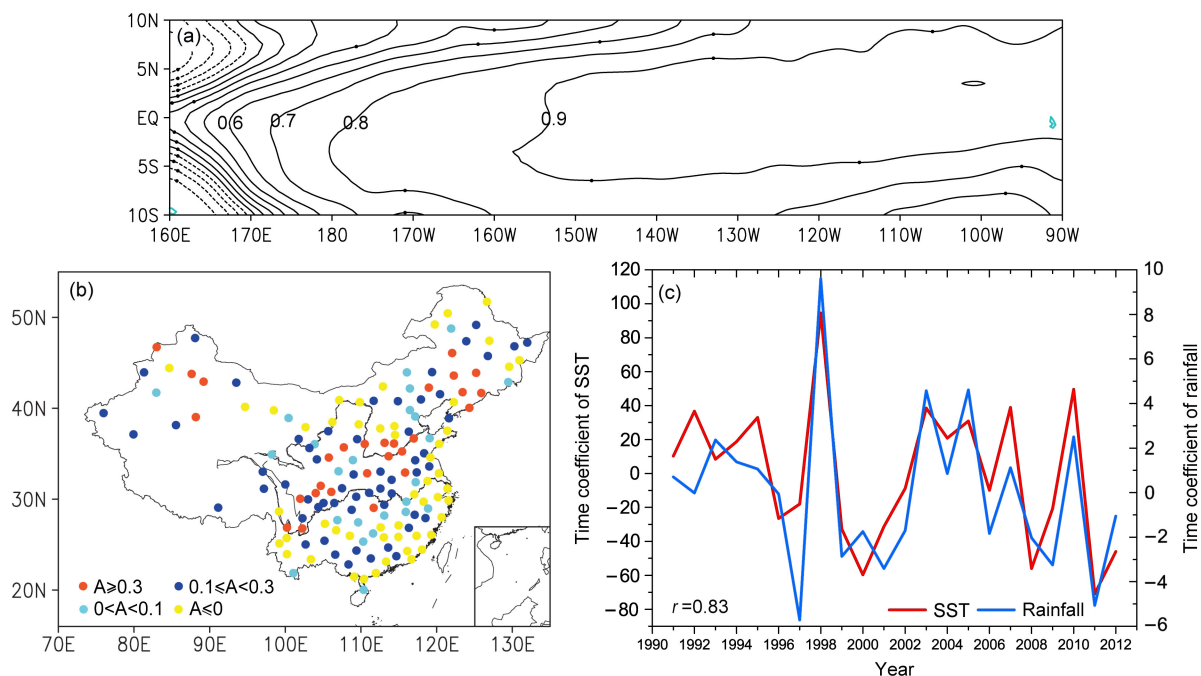


图 1 (a) 1990~2011 年秋、冬热带太平洋 SST 和 (b) 1991~2012 年夏季中国观测站点降水 SVD 第一模态对的空间分布以及 (c) 对应的时间系数

Fig. 1 First leading SVD (Singular Value Decomposition) modes of the (a) autumn–winter SST during 1990–2011 over the tropical Pacific and (b) observed summer rainfall in China during 1991–2012, and (c) the corresponding time coefficients

化趋势 (图 1a), 对应中国夏季降水雨带异常分布型呈现东北—西南走向, 北方大部分地区和华南、长江下游存在相反的分布特征 (图 1b)。降水与 SST 的 SVD 第一模态对应的时间系数之间的相关系数 r 为 0.83, 可以看到, 1998 年、2011 年为 El Niño/La Niña 的次年, SST 和夏季降水的 SVD 时间系数均出现极值, 体现了 ENSO 信号对我国尤其长江中下游夏季降水的影响 (图 1c)。

海平面气压场 (Sea Level Pressure, SLP) 能够很好地反映低层大气随东亚夏季风环流的变化特

征, 并能反映陆 (海) 气之间的热力交换 (Li and Wang, 2016), 可直接影响降水等气候要素变化。东亚地区的 SLP 代表着东亚夏季风低空成员的异常活动, 东亚—北太平洋地区的 SLP 直接关系到我国夏季降水 (Wu and Lough, 1987; 刘雅芳, 1995), 本文选取东亚地区 SLP 为组合统计降尺度模型的同期预测因子。本文使用国家气候中心 BCC_CSM1.1m 模式资料中 3 月初起报的夏季 SLP, 其在东亚大部分地区预测性能较为理想 (刘颖等, 2017)。

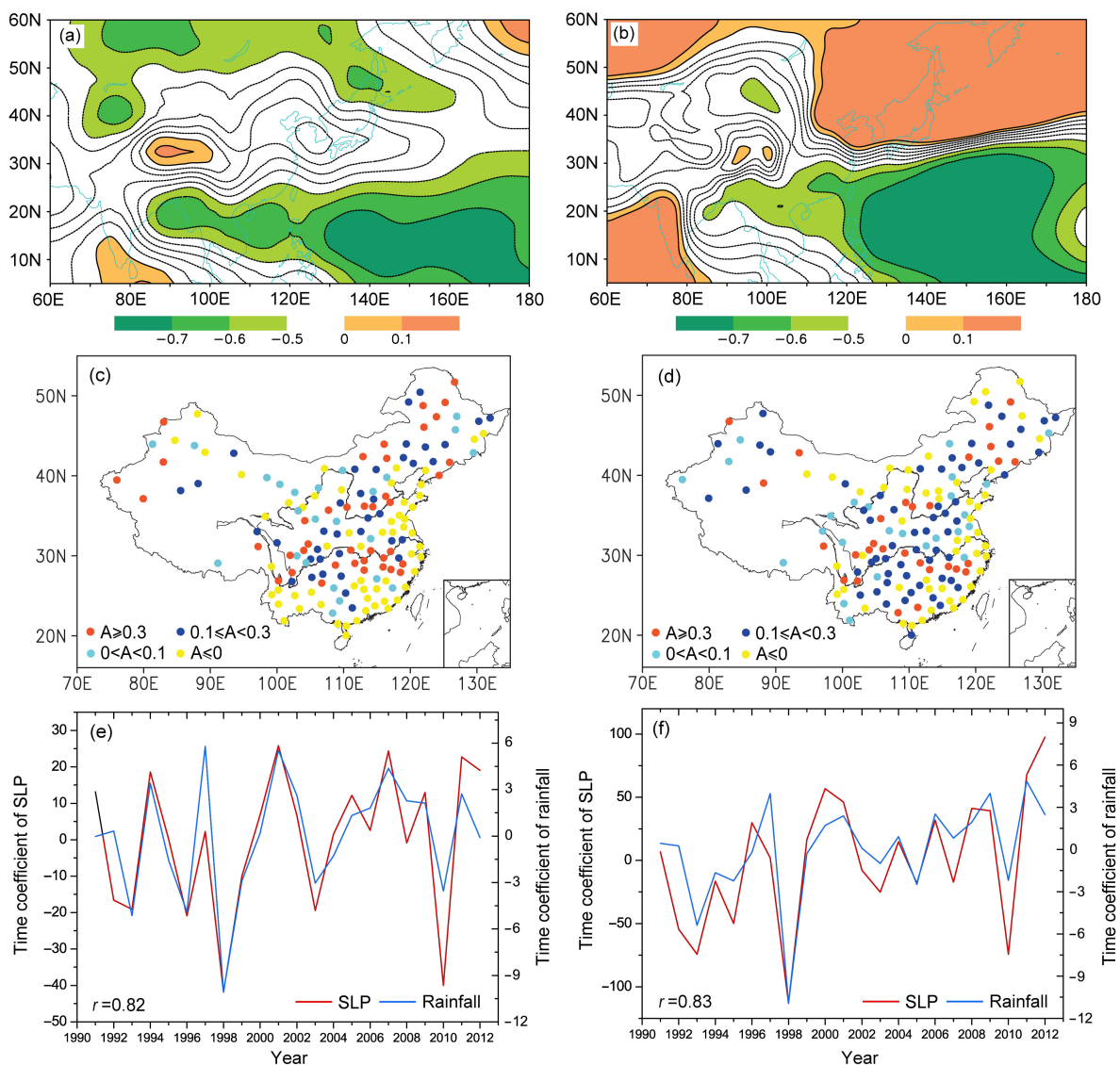


图 2 1991~2012 年夏季 (a、b) 东亚地区 SLP 和 (c、d) 中国观测站点降水的 SVD 第一模态对应的空间分布型以及 (e、f) 对应的时间系数: (a、c、e) 基于 NCEP 资料; (b、d、f) 基于 BCC_CSM1.1m 模式资料

Fig. 2 First leading SVD modes for (a, b) the SLP (Sea Level Pressure) over East Asia and (c, d) the observation site rainfall in China and (e, f) the corresponding time coefficients during 1991–2012 summers: (a, c, e) Based on the NCEP dataset; (b, d, f) based on the BCC_CSM1.1m GCM model output

中国夏季降水与东亚地区 SLP 的 SVD 第一模态空间分布以及对应的时间系数由图 2 给出。在观测场中，SLP 异常场在东亚地区呈现南北向偶极子的分布特征，北方的负值区代表中高纬系统异常，南部的负值区代表副热带高压异常（图 2a），对应的夏季降水异常型由南向北大体呈现“+—+”的分布特征。BCC_CSM1.1m 模式对副热带高压系统的异常变化回报较好，但对北方中高纬系统的异常分布预测除在该区域的东北部地区其他地区均不够理想（图 2b），对应的夏季降水异常型在东北地区、长江流域和华南的空间分布型与观测结果较为相近（图 2d），这可能是由于该模式对我国东北地区及副热带系统环流预测技巧较高（图 2b）。观测和 BCC_CSM1.1m 模式中的 SVD 第一模态对应的时间系数之间相关都超过了 0.8，1998 年的 SVD 时间系数同样出现极值，体现了强热带太平洋海温对东亚地区大气环流场的调制作用以及对我国降水场的进一步影响（图 2e、2f）。

4 历史预测结果回顾

4.1 组合统计降尺度模型的交叉检验

在利用组合统计降尺度模型进行实时预测之前，我们采用去掉 1 年的交叉检验方法来对该模型的回报效果进行检验，时间段为 1991~2013 年。图 3 给出了观测与模式原始预测以及组合统计降尺度预测降水量之间的空间距平相关系数 ACC（Anomaly Correlation Coefficient）。组合统计降尺度模型将 23 年平均的 ACC 从模式原始结果的 -0.006 提高到 0.24，且在 77% 以上年份降尺度结果的 ACC 都超过了模式原始结果。在 2013~2018 年的中国夏季降水实时预测业务中，组合统计降尺度预测模型的趋势异常综合检验（PS）平均分为 71.5 分（表 1），下面具体介绍各年的实际预测情况。

4.2 组合统计降尺度模型的实际预测检验

4.2.1 2013~2014 年实时预测

2013 年夏季，全国降水呈现南北多中间少的分布特征，黄淮、长江流域为少雨区，其他地区尤其是东北地区、西北地区普遍多雨。组合统计降尺度模型在 3 月份的预测结果显示，华北地区的多雨以及长江中下游的少雨都较好地预测了出来，PS 评分为 71 分（图略）。

2014 年夏季，发生在我国南方的洪涝和北方

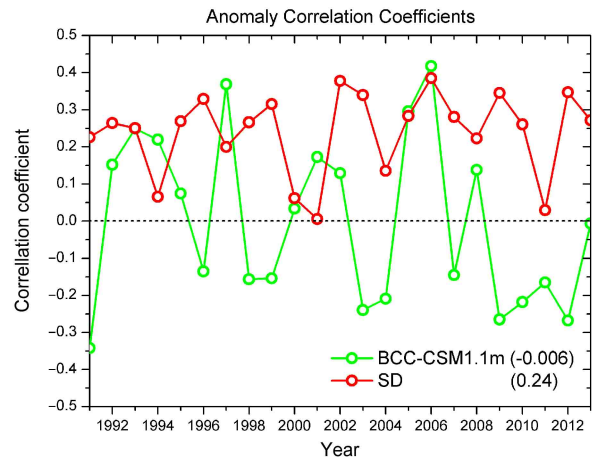


图 3 1991~2013 年的交叉检验中组合统计降尺度预测中国夏季降水空间距平相关系数。绿色线为 BCC_CSM1.1m 模式原始结果，红色线为组合统计降尺度（SD）结果

Fig. 3 Spatial anomaly correlation coefficients of summer precipitation in China predicted by the hybrid statistical downscaling model during 1991–2013 cross validation. Green line represents the results of BCC_CSM1.1m and red line represents the hybrid statistical downscaling (SD) results

表 1 组合统计降尺度模型对 2013~2018 年中国夏季降水距平的预测 PS 评分

Table 1 PS score of the JJA (June, July, and August) precipitation anomaly predicted by the hybrid statistical downscaling model during 2013–2018

	PS评分
2013年	71
2014年	67
2015年	73
2016年	72
2017年	70
2018年	75.8
平均分	71.5

的干旱状况，基于模式、统计和经验的绝大多数预测模型在 3 月份的预测效果均不理想，组合统计降尺度模型同样漏报了南方地区降水偏多的情形，PS 评分为 67 分（刘颖等, 2017）。需要指出的是，2013 年秋冬季的中东太平洋海温异常信号不强，均处于中等偏冷的状态，而季节预测的预报技巧在 ENSO 在平均条件下比极端位相时低，且随着纬度的增加，ENSO 信号的指示作用减弱明显（丁一汇, 2011），这可能是造成 2014 年组合统计降尺度模型对降水主雨带，尤其是南方地区的雨带预测不准的原因之一。我们尝试了采用前冬高原积

雪深度作为预测因子(但实时预测时资料无法及时获取),试验结果显示能够显著提升2014年夏季降水异常的预测技巧,这为将来积雪数据能够保障前提下提供了改进预测效果的潜在积极因素。

4.2.2 2015~2018年实时预测

2014/2016年发生了一次超强El Niño事件,从2014年秋季的弱中部型El Niño事件发展成2015年秋冬季的超强东部型El Niño事件(任宏利等, 2016),2016夏初此次事件结束(图4)。此次超强El Niño事件为我国汛期降水预测提供了有利的可预报性信号。2015年和2016年夏季,南方主雨带均位于长江流域及以南地区,但北方地区的干湿分布不尽相同。

2015年夏季,除西北和东北的部分地区,北方大部分地区降水偏少,长江流域及以南地区降水偏多(图5a),组合统计降尺度模型较好预测出了长江及以南地区的降水偏多区,河套地区、西北地区、东北北部降水偏少区,但对内蒙古东北部地区—东北南部地区的降水偏少区预测不足,PS评分为73分(图5e)。2016年夏季,黄淮—西北地区中部、东北地区降水偏少,北方其他地区降水偏多(图5b)。组合统计降尺度模型将长流中下游以及北方的降水偏多形势预测了出来,且对内蒙古北部至东北地区西部的降水偏少特征同样做出较好预测,但对于黄淮流域的降水偏少趋势把握不足,PS评分为72分(图5f)。

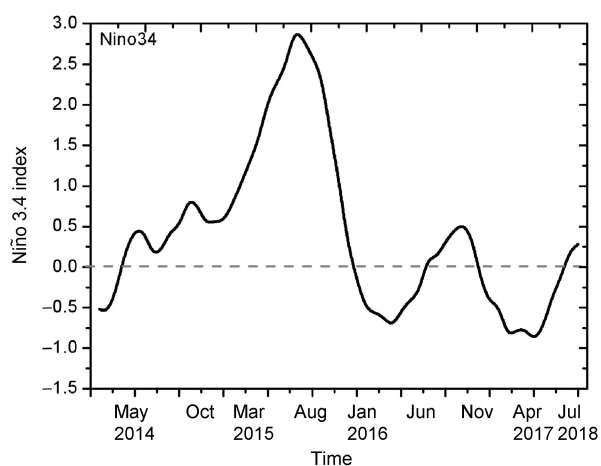


图4 2014~2018年Niño 3.4指数时间演变(数据来源:
[http://cmdp.ncc-cma.net/pred/cn_enso.php?product=cn_enso_ncc\[2018-07-01\]](http://cmdp.ncc-cma.net/pred/cn_enso.php?product=cn_enso_ncc[2018-07-01]))

Fig. 4 Time series of Niño 3.4 index during 2014–2018 (data origin:
[http://cmdp.ncc-cma.net/pred/cn_enso.php?product=cn_enso_ncc\[2018-07-01\]](http://cmdp.ncc-cma.net/pred/cn_enso.php?product=cn_enso_ncc[2018-07-01]))

西太平洋副热带高压偏强、东亚夏季风偏弱是2015年夏季风系统的主要特征(陈丽娟等, 2016; 袁媛等, 2016)。2014~2015年的El Niño事件发展进程较为复杂,2014年秋季,热带太平洋海温已存在偏暖信号,但此次El Niño事件在2014年秋冬季处于基本停滞状态,在2015年春季继续发展并在秋冬季达到峰值,直至2016年春季进入衰减过程(图4),因此将2015年和2016年夏季均划分El Niño事件衰减年(陈丽娟等, 2016; 袁媛等, 2016)。有研究表明,El Niño事件衰减年的夏季,西太平洋副热带高压偏强、偏西,东亚夏季风偏弱,易导致我国长江流域夏季降水偏多(Huang and Wu, 1989; 陈文, 2002)。因此,2015年和2016年夏季,长江流域降水偏多,而组合统计降尺度模型充分考虑了热带太平洋的ENSO信号,对长江流域的降水偏多趋势做出较好的预测。

2017年夏季,长江中下游至江南及以南地区、东北至华北河套地区、西藏地区降水显著偏多,淮河流域、内蒙古地区、新疆降水显著偏少(图5c)。2016年秋、冬季,热带中东太平洋处于弱冷状态(图4),东亚夏季风偏弱。BCC_CSM1.1m气候模式较好预测出了东亚夏季风偏弱的趋势(图略),组合统计降尺度模型有效利用了气候模式对东亚地区大尺度环流的高预测技巧信息,较好预测出了长江中下游至江南及以南地区的降水偏多,淮河流域降水偏少的分布特征,但对内蒙古、新疆、河套和华北地区的降水预测不理想,PS评分为70分(图5g)。

西太平洋副热带高压偏北,使得来自南部的水汽更易达到偏北地区,有利于我国北方降水偏多。2018年夏季,西太平洋副热带高压异常偏北,导致我国主雨带异常偏北,主要集中在内蒙古、东北及华北大部分地区,长江中下游、黄淮地区中部及新疆大部分地区降水偏少(图5d)。组合统计降尺度模型对我国2018年汛期降水的预测PS评分为75.8分,较好预测出了南北两个雨带,长江中下游以及黄淮地区的干旱情况也较好地预测了出来(图5h)。

5 结论与讨论

组合统计降尺度模型有效利用大尺度环流模

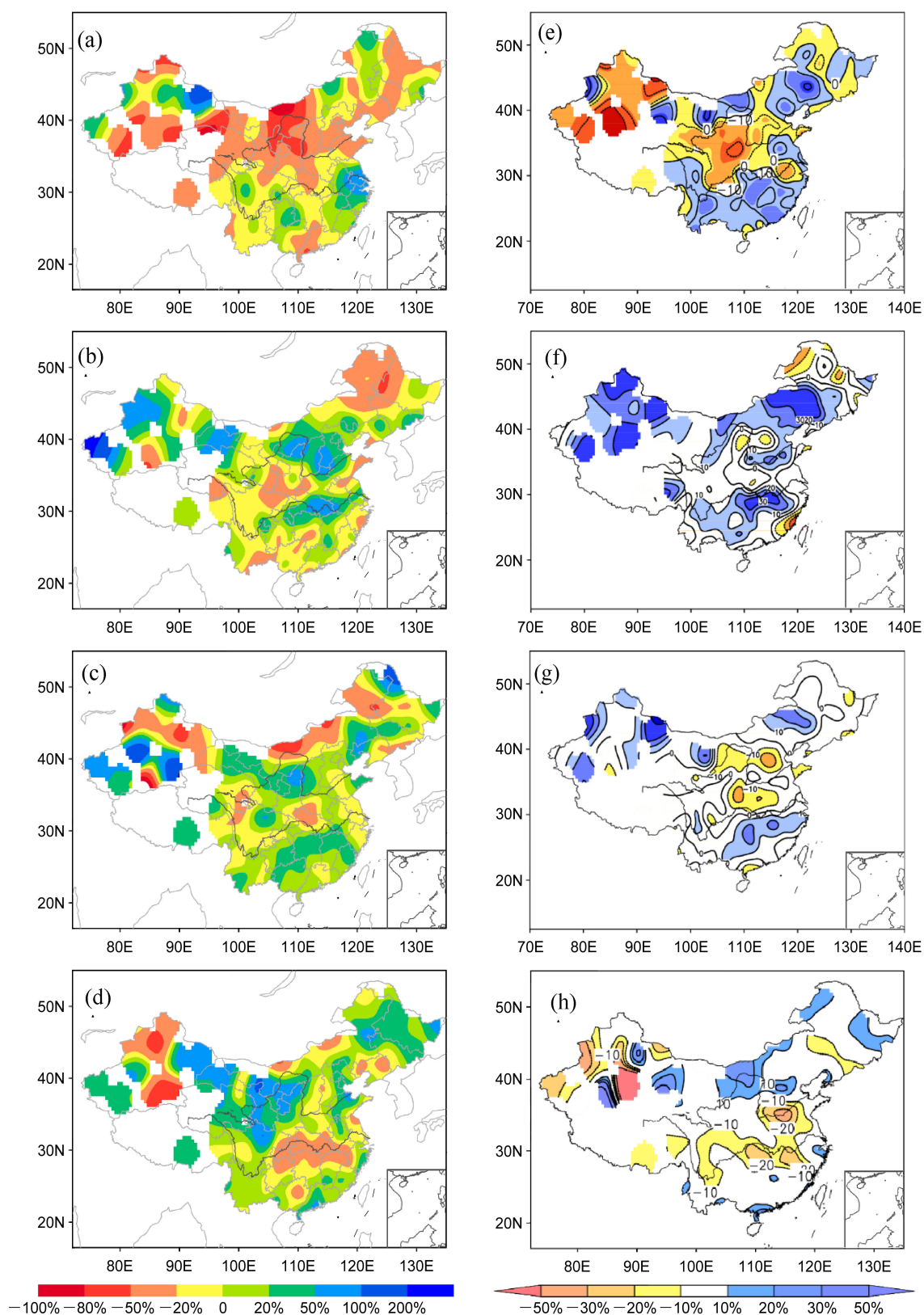


图 5 2015~2018 年中国夏季降水距平百分率空间分布：(a、b、c、d) 观测（图片来自 [http://cmdp.ncc-cma.net/\[2018-07-01\]](http://cmdp.ncc-cma.net/[2018-07-01])）；(e、f、g、h) 组合统计降尺度模型预测结果

Fig. 5 Spatial pattern of the JJA precipitation anomaly percentage during 2015–2018: (a, b, c, d) Observation (figures are from the website: [http://cmdp.ncc-cma.net/\[2018-07-01\]](http://cmdp.ncc-cma.net/[2018-07-01])); (e, f, g, h) prediction by the hybrid statistical downscaling model

式 BCC_CSM1.1m 中高预测技巧的海平面气压场信息及前期的高影响外强迫因子热带中东太平洋信号, 针对我国季节站点降水进行预测。历史多年交叉检验的结果表明, 该降尺度模型能够有效提高原始模式的预测性能。自 2013 年以来, 该模型开始应用到我国汛期预测业务当中, 至 2018 年, 6 年中国夏季降水的平均 PS 评分为 71.5 分。自 2014 年春季以来, 中东太平洋地区经历了由弱中部型 El Niño 事件发展并转型成超强东部型 El Niño 事件的过程, 该组合统计降尺度模型重点考虑了前期秋冬季 ENSO 信号对后期我国夏季降水的可能影响, 将秋冬季赤道中东太平洋地区的海表面温度作为预测因子纳入到降尺度模型当中, 模型在 2015 年、2016 年、2017 年和 2018 年的预测 PS 平均分提高到了 72.7 分, 为我国汛期预测提供了丰富而有价值的参考信息。

组合统计降尺度模型已经在我国季节预测业务中得到较好的应用, 在未来的发展当中, 一方面, ENSO 虽然是最为重要的前期预测信号, 但当 ENSO 信号不强或者与中国季节降水关系不稳定时, 还需要考虑其他影响因素, 如, 欧亚积雪、青藏高原积雪等的前期调制作用。另一方面, 组合统计降尺度预测模型也将面向更多时间尺度(如, 月尺度和延伸期预报)和更精细化的站点(网格)预测, 建立更加适应社会发展的预测模型。此外, 考虑到预测技巧对于模式的依赖性, 该模型将来可面向多模式继续开展研究, 以便得到稳定的预测结果。由于气候模式对同期大尺度环流的有限可预报性, 在一定程度上会影响到统计降尺度模型的预测性能, 因此, 作者将利用实际观测资料代替模式资料进行理想化预测实验, 进一步讨论该组合统计降尺度模型的最大预测能力。

致谢 感谢国家气候中心气候模式室为本研究提供 BCC_CSM1.1m 模式数据。

参考文献 (References)

- 陈丽娟, 顾薇, 丁婷, 等. 2016. 2015 年汛期气候预测先兆信号的综合分析 [J]. *气象*, 42(4): 496–506. Chen Lijuan, Gu Wei, Ding Ting, et al. 2016. Overview of the precursory signals of seasonal climate prediction in summer 2015 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 42(4): 496–506. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.04.014
- 陈丽娟, 顾伟宗, 伯忠凯, 等. 2017. 黄淮地区夏季降水的统计降尺度预测 [J]. *应用气象学报*, 28(2): 129–141. Chen Lijuan, Gu Weizong, Bo Zhongkai, et al. 2017. The statistical downscaling method of summer rainfall prediction over the Huang-Huai Valley [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 28(2): 129–141. doi:10.11898/1001-7313.20170201
- 陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响 [J]. *大气科学*, 26(5): 595–610. Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26(5): 595–610. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.02
- 丁一汇. 2011. 季节气候预测的进展和前景 [J]. *气象科技进展*, 1(3): 14–27. Ding Yihui. 2011. Progress and prospects of seasonal climate prediction [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 1(3): 14–27.
- 范可, 王会军, Choi Y J. 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 Ke, Wang Huijun, Choi Y J. 2007. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of the Yangtze River valley summer rainfall [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(24): 2900–2905. doi:10.3321/j.issn:0023-074x.2007.24.014
- 范可, 林美静, 高煜中. 2008. 用年际增量方法预测华北汛期降水 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 38(11): 1452–1459. Fan Ke, Lin Meijing, Gao Yuzhong. 2008. Forecasting the summer rainfall in North China using the year-to-year increment approach [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 38(11): 1452–1459. doi:10.1007/s11430-009-0040-0
- Fan K, Liu Y, Chen H P. 2012. Improving the prediction of the East Asian summer monsoon: New approaches [J]. *Wea. Forecasting*, 27(4): 1017–1030. doi:10.1175/WAF-D-11-00092.1
- Gao M N, Wang B, Yang J, et al. 2018. Are peak summer sultry heat wave days over the Yangtze-Huaihe River basin predictable? [J]. *Climate*, 31(6): 2185–2196. doi:10.1175/JCLI-D-17-0342.1
- 黄茂怡, 黄嘉佑. 2000. CCA 对中国夏季降水场的预报试验和诊断结果 [J]. *应用气象学报*, 11(S1): 31–39. Huang Maoyi, Huang Jiayou. 2000. Forecasting experiments and diagnostic results of the CCA model on summer precipitation of China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 11(S1): 31–39. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2000.zl.004
- Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 6(1): 21–32. doi:10.1007/BF02656915
- 贾小龙, 陈丽娟, 李维京, 等. 2010. BP-CCA 方法用于中国冬季温度和降水的可预报性研究和降尺度季节预测 [J]. *气象学报*, 68(3): 398–410. Jia Xiaolong, Chen Lijuan, Li Weijing, et al. 2010. Statistical downscaling based on BP-CCA: Predictability and application to the winter temperature and precipitation in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68(3): 398–410.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(3): 437–472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
- Lang X M. 2011. A hybrid dynamical-statistical approach for predicting winter precipitation over eastern China [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 25(3): 272–282. doi:10.1007/s13351-011-0303-5

- Li C F, Scaife A A, Lu R Y, et al. 2016. Skillful seasonal prediction of Yangtze river valley summer rainfall [J]. *Environ. Res. Lett.*, 11(9): 094002. doi:10.1088/1748-9326/11/9/094002
- Li J, Wang B. 2016. How predictable is the anomaly pattern of the Indian summer rainfall? [J]. *Climate Dyn.*, 46(9-10): 2847–2861. doi:10.1007/s00382-015-2735-6
- Liu X W, Wu T W, Yang S, et al. 2015. Performance of the seasonal forecasting of the Asian Summer Monsoon by BCC_CSM1.1(m) [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32(8): 1156–1172. doi:10.1007/s00376-015-4194-8
- Liu Y, Fan K. 2012. Prediction of spring precipitation in China using a downscaling approach [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 118(1-2): 79–93. doi:10.1007/s00703-012-0202-z
- Liu Y, Fan K. 2013. A new statistical downscaling model for autumn precipitation in China [J]. *Int. J. Climatol.*, 33(6): 1321–1336. doi:10.1002/joc.3514
- 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(7): 1309–1321. doi:10.1002/joc.4058
- 刘颖, 任宏利, 张培群, 等. 2017. 利用高原积雪信号改进我国南方夏季降水预测的新方法及其在 2014 年降水预测中的应用试验 [J]. *大气科学*, 41(2): 313–320. Liu Ying, Ren Hongli, Zhang Peiqun, et al. 2017. Improve the prediction of summer precipitation in South China by a new approach with the Tibetan Plateau snow and the applicable experiment in 2014 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(2): 313–320. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1605.16104
- 刘雅芳. 1995. 60 年代夏季海平面气压跃变及其与我国夏季温度、降水的相关分析 [J]. *气象科学*, 15(1): 36–44. Liu Yafang. 1995. A relationship analysis between the summer sea level pressure jump and summer temperature and rainfall in China in 1960s [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 15(1): 36–44.
- Paul S, Liu C M, Chen J M, et al. 2008. Development of a statistical downscaling model for projecting monthly rainfall over East Asia from a general circulation model output [J]. *J. Geophys. Res.*, 113(D15): D15117. doi:10.1029/2007JD009472
- Ren H L, Chou J F. 2006. Analogue correction method of errors by combining statistical and dynamical methods [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 20(3): 367–373.
- Ren H L, Chou J F. 2007. Strategy and methodology of dynamical analogue prediction [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(10): 1589–1599. doi:10.1007/s11430-007-0109-6
- 任宏利, 刘颖, 左金清, 等. 2016. 国家气候中心新一代 ENSO 预测系统及其对 2014/2016 年超强厄尔尼诺事件的预测 [J]. *气象*, 42(5): 521–531. Ren Hongli, Liu Ying, Zuo Jinjing, et al. 2016. The new generation of ENSO prediction system in Beijing Climate Centre and its predictions for the 2014/2016 Super El Niño event [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 42(5): 521–531. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.05.001
- 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(13): 1609–1625. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2
- Uvo C B, Olsson J, Morita O, et al. 2001. Statistical atmospheric downscaling for rainfall estimation in Kyushu Island, Japan [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 5(2): 259–271. doi:10.5194/hess-5-259-2001
- Wang B, Ding Q H, Fu X H, et al. 2005. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32(15): L15711. doi:10.1029/2005GL022734
- Wang B, Lee J Y, Kang I S, et al. 2009. Advance and prospectus of seasonal prediction: Assessment of the APCC/CLIPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980–2004) [J]. *Climate Dyn.*, 33(1): 93–117. doi:10.1007/s00382-008-0460-0
- Wang H J, Fan K. 2009. A new scheme for improving the seasonal prediction of summer precipitation anomalies [J]. *Wea. Forecasting*, 24(2): 548–554. doi:10.1175/2008WAF2222171.1
- Wang H J, Zhang R H, Cole J, et al. 1999. El Niño and the related phenomenon Southern Oscillation (ENSO): The largest signal in interannual climate variation [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96(20): 11071–11072. doi:10.1073/pnas.96.20.11071
- Wang H J, Fan K, Sun J Q, et al. 2015. A review of seasonal climate prediction research in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32(2): 149–168. doi:10.1007/s00376-014-0016-7
- Wu X D, Lough J M. 1987. Estimating North Pacific summer sea-level pressure back to 1600 using proxy climate records from China and North America [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 4(1): 74–84. doi:10.1007/BF02656663
- 袁媛, 高辉, 贾小龙, 等. 2016. 2014–2016 年超强厄尔尼诺事件的气候影响 [J]. *气象*, 42(5): 532–539. Yuan Yuan, Gao Hui, Jia Xiaolong, et al. 2016. Influences of the 2014–2016 Super El Niño event on climate [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 42(5): 532–539. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.05.002
- 张永领, 吴胜安, 丁裕国, 等. 2006. SVD 迭代模型在夏季降水预测中的应用 [J]. *气象学报*, 64(1): 121–127. Zhang Yongling, Wu Sheng'an, Ding Yuguo, et al. 2006. Forecast of summer precipitation based on SVD iteration model [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64(1): 121–127. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2006.01.012