

吴遥,唐红玉,刘颖,等,2020.统计降尺度方法在华西南区秋季降水预测中的应用[J].气象,46(12):1555-1564. Wu Y, Tang H Y, Liu Y, et al, 2020. Application of statistical downscaling model to autumn rainfall forecasting over Southwest China[J]. Meteor Mon, 46(12):1555-1564(in Chinese).

统计降尺度方法在华西南区秋季降水预测中的应用^{*}

吴 遥¹ 唐红玉¹ 刘 颖² 董新宁¹ 郭 渠¹

¹ 重庆市气候中心,重庆 401147

² 国家气候中心气候研究开放实验室,北京 100081

提 要: 针对华西南区秋季站点降水,建立了基于气候预测系统 CFS 模式实时预测产品与观测资料相结合的统计降尺度预测模型。模型选取了华西南区秋季降水物理意义比较明确的秋季 500 hPa 位势高度场和前期夏季海温场作为预测因子,两个因子关键区分别为 10°S~50°N/70°~180°E 和 30°S~30°N/30°~120°E。预测因子与预测量之间的 SVD 第一模态时间系数具有高度相关性,在 500 hPa 位势高度场和海温场上均通过了 0.01 的显著性水平检验。模型对 1982—2017 年的回报结果显示:与观测场的空间相关系数相对 CFS 模式原始结果显著提高,多年均值从 -0.06 提升到 0.38,最高可达 0.7;均方根误差在大部站点相对于 CFS 模式原始结果降低,最高可达 40%。同时,模型较好地回报出了极端高值和低值年降水空间分布型。

关键词: 统计降尺度,秋季降水,CFS,华西南区

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.003

Application of Statistical Downscaling Model to Autumn Rainfall Forecasting over Southwest China

WU Yao¹ TANG Hongyu¹ LIU Ying² DONG Xinning¹ GUO Qu¹

¹ Chongqing Climate Centre, Chongqing 401147

² Laboratory for Climate Studies, National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: A statistical downscaling model for forecasting autumn rainfall at stations over Southwest China was established in this study based on real-time prediction of numerical products from the Climate Forecast System (CFS) and observation data. The autumn 500 hPa geopotential height from CFS and summer sea surface temperature from reanalysis data, which are relatively clear in physics for autumn rainfall over Southwest China, were selected as the two predictors. The key regions of the two predictors are 10°S—50°N/70°—180°E and 30°S—30°N/30°—120°E. There exist high correlations of time coefficient of first leading SVD modes between predictors and observation. The correlation coefficients have passed the 0.01 significance level test on the 500 hPa geopotential height field and the 0.001 significance level test on the sea surface temperature field. The statistical downscaling hindcast for the 1982—2017 result shows that the spatial correlation coefficient can improve the performance of prediction compared with that of the original CFS, and multi-year mean is increased from -0.06 to 0.38 with the maximum getting up to 0.7. The root mean square error decreases in comparison with the output of original CFS at most stations with the

^{*} 国家自然科学基金项目(41875111),中国气象局核心业务发展专项[YBGJXM(2019)06-06],中国气象局西南区域气象中心重大科研业务项目(西南区域 2014-1)和中国气象局数值模式发展专项[YBSZMSXM(2019)-03]共同资助

2019 年 7 月 2 日收稿; 2020 年 7 月 18 日收修定稿

第一作者:吴遥,主要从事诊断预测和区域气候模式研究. E-mail:472347935@qq.com

通讯作者:唐红玉,主要从事短期气候诊断预测业务和研究工作. E-mail:782378285@qq.com

maximum being 40%. At the same time, the statistical downscaling hindcasts on spatial pattern of extreme minimum and maximum are fine.

Key words: statistical downscaling, autumn rainfall, CFS (Climate Forecast System), Southwest China

引 言

在北半球的秋季,随着季风系统向南撤退,亚洲上空大气环流的转变使得我国大部地区进入秋高气爽的天气,但是华西地区此时却阴雨绵绵(柳艳菊等,2012;陈受钧,1960)。华西秋雨是我国西部地区秋季多雨的特殊天气现象,会产生仅次于夏季降水的次极大值降水,持续连阴雨在该地区易引发秋汛,加之华西地区地形复杂,持续性降水也易诱发滑坡、泥石流等次生灾害(白虎志和董文杰,2004;柳艳菊等,2012;喻乙耽等,2018)。因此,华西秋雨引起了国内外学者的广泛关注。以往的研究表明:华西秋雨在空间上表现出不同的分布特征,主要有南北反向型、经向型和全区一致型(陈受钧,1960;徐桂玉和林春育,1994)。且华西秋雨在 21 世纪后呈现出增加的趋势(蔡艺宁等,2012;李莹等,2012;柳艳菊等,2012)。由于华西地区秋季正值农作物收获的季节,长时间多雨寡照会对农作物的秋收造成严重的影响,因此对农业气象服务来讲,秋季降水预测就显得尤为重要。

短期气候预测方法主要分为数值模式方法和数理统计方法,数值模式方法中全球模式对大尺度的环流和要素的空间或时间变化特征有着较高的预报技巧(Meehl et al,2007),但是在区域范围内特别是地形复杂区,全球模式的预报能力有限(Betts et al,1996;Entekhabi et al,1996;Lang et al,2014)。统计降尺度方法能有效地利用全球模式预测较好的环流场因子对局地要素场进行预测,统计与动力相结合的方法得到了广泛应用(Lang,2011;Fan et al,2012;Wang et al,2015)。近年来,大量学者采用统计降尺度方法进行短期气候预测,并取得了诸多成果。刘颖等(2013;2017)和 Liu and Ren(2015)利用经验正交分解和奇异值分解相结合的方法对中国夏季降水和冬季气温研究中表明:统计降尺度方法显著提高了模式对降水和气温距平相关系数及其量级的预测能力。许多学者提出了年际增量方法,在我国降水或台风的预估中表现出较高的预报技巧(范可等,2007;2008;Fan and Wang,2009;Lang and

Wang,2010),但是在降尺度预测中,需要根据不同的地区选择合适的影响环流因子等。Lang and Wang(2010)在对我国夏季降水研究中也指出:多变量线性回归方法在夏季中国不同区域的降水空间形态和年际变化等预测技巧均相对于模式原始结果有较为明显的提高。李启芬等(2016)和刘婷婷等(2016)基于土壤湿度利用年际增量方法对中国夏季气温和降水的研究中指出:降尺度结果显著提高了模式对华北降水及气温的预测能力,并认为土壤湿度因子中具有中国夏季降水和气温有用的预测信号。从以往的研究可见,统计和动力相结合的方法可以有效弥补模式在某些区域对要素场的预测能力,但需要根据不同的预测地区选取合适的因子建立降尺度模型。

美国国家环境预报中心研发的全球耦合气候预测系统(Climate Forecast System,CFS)面向全球提供了多种时间尺度的月、季预测产品(Saha et al,2006),其第二个版本在 2011 年 2 月开始业务运行。已有大量研究表明该系统对大尺度环流系统具有较好的预测能力(Yang et al,2008;Yuan and Liang,2011;Lang,2011;Jiang et al,2013)。国内外已有学者利用该模式资料进行降尺度分析且体现出较高的预测技巧,但是针对该模式系统在华西秋雨区的统计降尺度预测研究则较少。华西秋雨区由于其特殊的地理位置也使得多数模式对该地区降水的预测技巧很低,且以往的研究表明华西秋雨在空间上存在不同的特征,因此本文根据《华西秋雨监测业务规定(试行)》*,选取南区监测站点并利用 CFS 模式资料对该地区秋季降水进行统计降尺度预测,以期改善华西南区秋季降水的预测能力。

1 资料和方法

降水资料来源于中国气象局提供的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0),提取华西秋雨监测站点南区 1982—2017 年资料足够齐全(即站点每年秋季降水量观测值大于 60 d 且 1982—2017 年大于 24 a 不缺测)的 265 个站点资料(图 1),若选取出的站点某日缺测则采用 1982—2017 逐年对

* 中国气象局预报与网络司,2015. 华西秋雨监测业务规定(试行)[Z]气预函[2015]2 号。

应不缺测日期的平均值进行补全;NCEP/NCAR 的 1982—2017 年水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的 500 hPa 位势高度再分析资料;NOAA 的 1982—2017 年水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的海表温度再分析资料。CFS 模式第二版本预估未来 9 个月的季节预测产品,其中 1982—2010 年为回报资料,2011 年及以后采用实时预测资料。回报和实时资料均采用每年 8 月 4 日、9 日、14 日、19 日、24 日和 29 日 00 时(UTC)预测未来 9 个月的月平均资料。为了对比的统一性,本文将 CFS 模式多个起报时间的预测产品进行集合平均,模式预测环流场数据利用双线性插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 水平网格上,模式预测降水数据利用双线性插值到站点上。在建立统计降尺度模型前,对预测量和预测因子均进行标准化处理。

本文应用经验正交分解(EOF)、奇异值分解(SVD)和线性回归等诊断、预测技术,建立基于多种统计方法的降尺度预测模型。该统计方法的优势在于能对预测因子和预测量进行滤波处理,减少噪音的影响;能显著提取出预测因子和预测量之间空间形态和时间变化的关键信息。其中 EOF、SVD 和线性回归技术的具体计算方法详见吴洪宝和吴蕾(2005)、魏凤英(2007)等研究。

具体步骤如下(图 2):

(1)分别对 t 时段内的华西南区秋季降水(预测量)和关键区(预测因子)进行 EOF 分析,保留 90% 贡献率的模态并回算到原始变量场,以便将变量场中多余的噪音去除,达到滤波目的;

(2)将滤波之后的预测因子和预测量利用 SVD 方法,提取两变量场之间的耦合变化型,并保留 90% 贡献率的模态,通过线性回归方法建立统计预测模型;

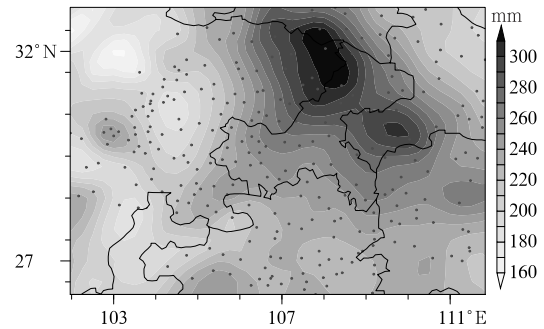


图 1 1982—2017 年华西南区秋季平均降水量空间分布
(实点为站点分布)

Fig. 1 Spatial pattern of average autumn rainfall over Southwest China from 1982 to 2017
(Points denote the positions of the surface observation stations)

(3)利用 SVD 统计方法提取出预测因子和预测量的耦合变化型及时间系数,计算多个时间系数的线性回归方程,从而建立降尺度模型。最后采用预测时间段因子场,通过降尺度模型做出预测结果;

(4)对关键因子或关键区等的预测结果,采用集合平均、回归等方法,实现对预测量的预测。

对于预测结果的检验,本文通过相关系数(R)和均方根误差提升百分比(RMSEP)来分别检验降尺度模型相对于模式原始结果(空间形态和量级)的提升程度[如式(1)和式(2)所示]。 R 可以反映预报量和观测量之间的空间形态相似程度。均方根误差对预报量和观测量之间的量级有较好的表征,因此本文采用 RMSEP 检验降尺度模型相对于模式原始预测结果在量级上的提升能力。

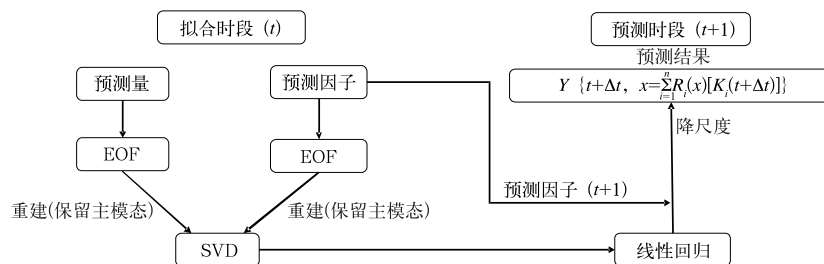


图 2 统计降尺度预测方法示意图

Fig. 2 The sketch map of the field information coupled patterns statistical downscaling method

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

$$RMSEP = \frac{RMSE_{CFS} - RMSE_{SD}}{RMSE_{CFS}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: X_i 和 Y_i 分别表示第 i 个观测和降尺度模型或模式预测值, \bar{X} 和 \bar{Y} 分别表示所有观测和降尺度模型或模式预测的平均值, $RMSE_{CFS}$ 和 $RMSE_{SD}$ 分别表示降尺度模型或模式预测结果的 RMSE。

2 预测因子选取

500 hPa 高度场对对流层中层的大尺度环流变化情况具有很高的表征作用, 以及大气具有斜压性和上下游效应, 因此可以通过 500 hPa 环流场的变化情况来预测出高层和低层环流系统演变。白虎志和董文杰(2004)的研究表明, 西太平洋副热带高压(以下简称副高)、印缅槽、贝加尔湖低槽是华西秋雨的主要影响系统; 对位于华西南区的重庆而言, 唐红玉等(2019)也认为乌拉尔山地区阻塞高压(以下简称阻高)、贝加尔湖地区的低值系统、鄂霍次克海地区的阻高、西太平洋副高和东亚大槽是影响华西南区秋季降水的主要环流系统, 当这些高、中、低纬度环流系统出现不同的配置型时, 华西南区秋季降水也会出现不同的结果。例如以西南区的重庆为例, 其典型秋季多雨年环流特征在中高纬度表现出西欧或乌拉尔山地区正高度场异常(阻高)、贝加尔湖地区为宽广的负高度场异常(低槽), 在中低纬度则表现为副高异常偏西偏强。最典型的如 2017 年的秋季, 500 hPa 高度场环流出现乌拉尔山地区阻高、贝加尔湖地区低槽和副高的异常偏强, 从而造成了当年秋季降水的异常偏多。

故在客观化预测技术中, 一方面需结合以往的研究成果, 选取有天气气候学影响和物理意义的因子是至关重要的; 另一方面需考虑气候模式对这些主要影响因子的预测能力。即当气候模式能模拟出影响研究区域的主要环流系统时, 该模式才真正对该区域有应用价值和参考价值。因此, 本文选取 CFS 模式预测的秋季 500 hPa 位势高度场产品作为降尺度模型的预测因子, 该因子场的关键区为($10^{\circ}\text{S} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ} \sim 180^{\circ}\text{E}$)。该区域内模式具有较高的预

测能力(图略), 且包含对华西地区秋季降水影响较大的阻高、副高、印缅槽、东亚槽等关键系统。

图 3 是 1982—2017 年华西南区秋季站点观测降水场与秋季 500 hPa 环流实况场和模式预测场的 SVD 第一模态空间分布型及对应的时间系数。对观测实况可以看出, 关键区内当西太平洋地区从南至北为“+—+”波列分布型(图 3a), 则说明当鄂霍次克海地区的阻高、副高和东亚大槽偏强时, 华西南区降水以偏多为主(图 3b)。其原因是这种形势下, 环流场上欧亚高纬度地区东部鄂霍次克海阻高发展明显, 有利于其西部低值系统加强和移动速度缓慢, 有利于中纬度低值系统的较长时间的维持, 保证了华西南部地区源源不断有冷空气的补充和南下, 同时低纬度地区副高偏强、偏西、位置偏南, 有利于孟加拉湾水汽沿着副高外围输送到华西南区, 易造成该地区秋季降水的偏多。从降水场与 500 hPa 高度场 SVD 第一模态二者对应的时间系数可以看出, 二者有着较好的一致性变化关系, 相关系数达到了 0.47, 通过 0.01 的显著性水平检验(图 3c)。相对于观测场, 模式场也正好表现出了华西南区秋季降水偏多时西太平洋地区从南至北为“+—+”分布型(图 3d、3e), 说明该模式对选取的关键区环流有较好的模拟能力, 这为构建好预测模型下了基础。降水场与模式预测的秋季 500 hPa 高度场的时间系数也有较好的一致性变化, 二者间的相关系数达到了 0.62, 同样也通过 0.01 的显著性水平检验(图 3f)。

秋季环流场(预测时可从模式预测结果获取)是预测建模时着重考虑的重点因素, 除此以外, 太平洋、印度洋海温等外源强迫因子对我国气候有着重要影响, 蔡榕硕等(2012)、黄荣辉等(2016)认为海温可通过大气环流影响我国的降水, 故在气候预测影响因子的选取中, 海温常常是较为重要的因子之一。通过分析表明: 华西南区秋季区域平均降水与海温的高相关区域主要位于印度洋和我国南海地区(图略); 且计算分析显示区域平均降水与热带印度洋偶极子(TIOD)指数的相关系数为 0.35, 通过了 0.05 的显著性水平检验。司东等(2015)认为秋季华西地区降水可能与热带印度洋海温有关。刘佳等(2015)研究也指出, 通常在 TIOD 为正位相年, 对四川东部、重庆、贵州北部地区秋季降水影响较大, 以正相关为主, 说明热带印度洋海温与华西秋雨具有很高

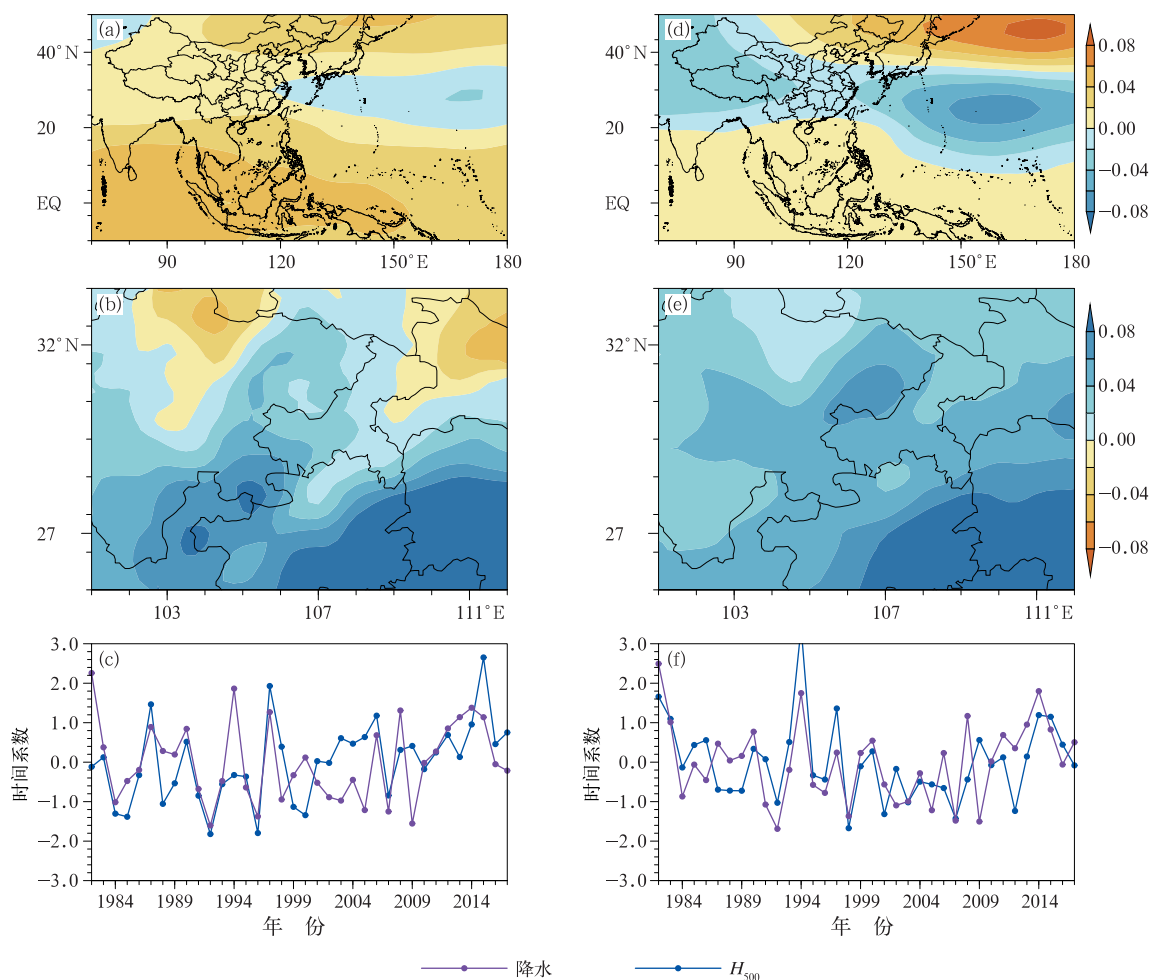


图 3 NCEP 资料(a,b,c),CFS 资料(d,e,f)1982—2017 年 500 hPa 环流场(a,d)与秋季站点观测降水场(b,e)的 SVD 第一模态空间分布型(a,b,d,e)以及对应的时间系数(c,f)

Fig. 3 The first leading SVD modes (a, b, d, e) for 500 hPa circulation (a, d), the autumn observed rainfall (b, e), and the corresponding time coefficients (c, f) during 1982—2017

(a, b, c) based on the NCEP dataset, (d, e, f) based on CFS output

的联系。在华西南区的气候诊断预测工作中,唐红玉等(2019)也分析发现前期夏季印度洋海温是华西南区秋季降水的重要影响因子。故选取该区域海温作为华西南区秋季降水预测的第二个场因子,并提取该区域海温场与华西南区降水场,对两场进行场信息耦合分析并建立预测模型。图 4 是 1982—2017 年华西南区秋季降水与夏季海平面温度(SST)的 SVD 第一模态,可以看出,当热带印度洋地区呈现出“西暖东冷”的偶极型模态时,华西南区秋季降水异常偏多(图 4a、4b),从两场 SVD 第一模态时间系数来看,相关系数达 0.63(图 4c),通过了 0.001 的显著性水平检验。

3 统计降尺度预测结果

在本文的研究中,建立统计降尺度模型和回报检验的时间段均为 1982—2017 年,因此本文采用交叉检验方法(即去掉一年进行建模并对该年份进行预测)对统计降尺度模型进行评估。图 5 给出了观测与 CFS 模式原始结果和统计降尺度预测结果空间相关系数年际变化,500 hPa 位势高度(H_{500})或 SST 作为预测因子建立降尺度模型将 36 年平均的空间相关系数从 -0.06 提升到 0.37;集合平均后可达 0.38,大部分年份通过 0.01 的显著性水平检验,

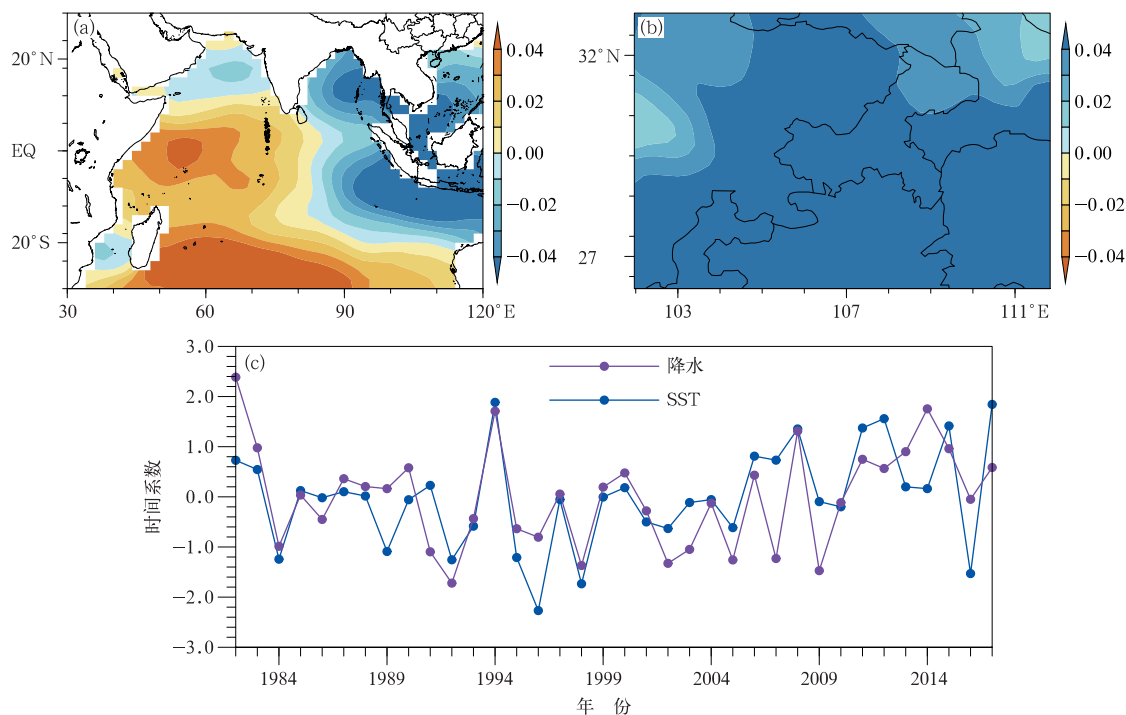


图 4 1982—2017 年夏季 SST(a), 秋季站点观测降水(b)的

SVD 第一模态空间分布型(a,b)以及对应的时间系数(c)

Fig. 4 The first leading SVD modes (a, b) of summer SST (a) and the autumn observed rainfall (b) during 1982—2017, and the corresponding time coefficients (c)

最大值可以达到 0.7。本文通过 RMSEP 来评估降尺度结果相对于模式结果的 RMSE 提升百分比,从图 6 可以看出, H_{500} 或 SST 作为预测因子预测结果及两个集合平均后除四川盆地、川东北和贵州东部地区少数站点外,绝大多数站点的 RMSEP 都大于零,降尺度预测结果的均方根误差比模式原始结果最高可以提升 40% 以上。但 H_{500} 作为预测因子在四川东北部 $RMSEP < 0$ 的站数明显多于 SST 作为预测因子的站数。综合可见,该统计降尺度模型在降水量级上相对于模式原始结果有较为明显的提高。

在业务预测中,预报员更加关心模型对极端年份的预测能力,为了进一步分析降尺度模型对极端年份的预测能力,本文对 1982—2017 年华西南区域平均降水进行分析(表略),采用百分位法基于 90% 分位数选取出极端高值年(1982、2014 和 1983 年)和低值年(1992、1998、2007 和 1991 年)。通过分析发现,降水高值年,观测资料(图 7a、7d 和 7g)显示出降水大值区主要集中在四川东北部与重庆东北部,重庆、湖北、湖南和贵州四省(市)交界处和湖

南西部地区;模式(图 7b、7e 和 7h)对降水偏多的区域基本没有体现;降尺度结果(图 7c、7f 和 7i)对四

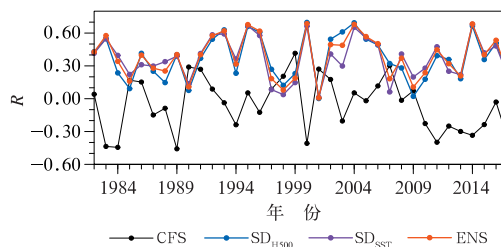


图 5 1982—2017 年观测与 CFS 模式原始结果和统计降尺度预测结果空间相关系数年际变化 (CFS 为模式原始结果; SD_{H500} 为 500 hPa 位势高度场降尺度结果; SD_{SST} 为海表温度场降尺度结果; ENS 为 SD_{H500} 和 SD_{SST} 集合平均结果)

Fig. 5 Spatial correlation coefficients of precipitation between observations and the CFS output as well as the downscaling result CFS (original result of the model), SD_{H500} (downscaling result of 500 hPa geopotential height field), SD_{SST} (downscaling result of sea surface temperature field), ENS (aggregate average result of SD_{H500} and SD_{SST})

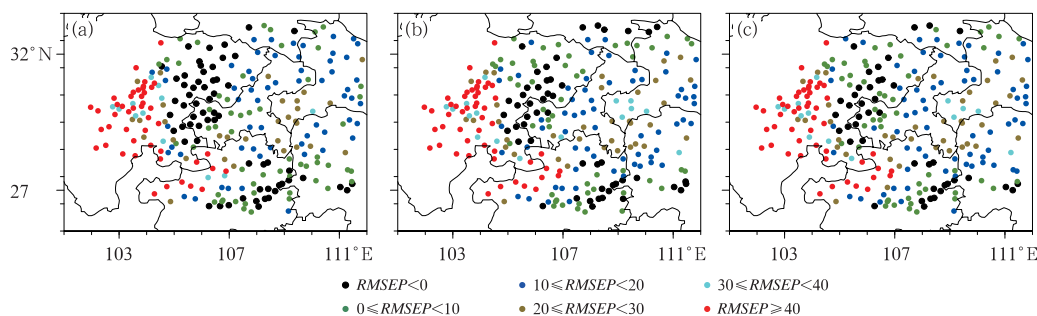


图 6 1982—2017 年 RMSEP 空间分布

(a) SD_{H500} , (b) SD_{SST} , (c) ENS

Fig. 6 Spatial-distribution maps of RMSEP during 1982—2017

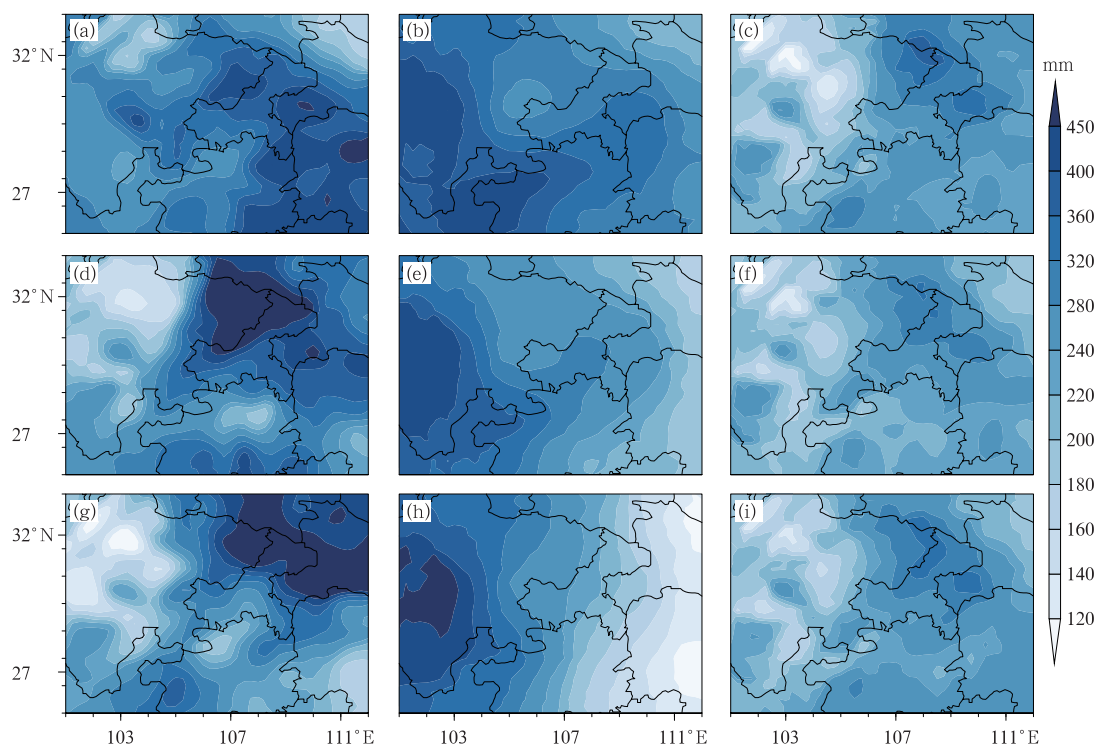
(a) SD_{H500} , (b) SD_{SST} , (c) ENS

图 7 1982 年(a,b,c), 2014 年(d,e,f), 1983 年(g,h,i)高值年降水空间分布

(a,d,g) 观测资料, (b,e,h) CFS 模式原始结果, (c,f,i) SD_{H500} 和 SD_{SST} 集合平均结果

Fig. 7 Spatial-distribution of high-value precipitation year for 1982 (a, b, c), 2014 (d, e, f), 1983 (g, h, i)

(a, d, g) observations, (b, e, h) original result of CFS model,

(c, f, i) aggregate average result of SD_{H500} and SD_{SST}

川东北部与重庆东北部和湖北与重庆接壤的降水大值区都有所体现,并且降尺度后很好地消除了 1982 年模式对贵州西北部与云南接壤降水显著预测显著偏多的区域。降水低值年,观测资料(图 8a、8d、8g 和 8j)显示出不同年份降水大值区存在一定的差异。1992 年主要位于四川、重庆和陕西三省(市)交界处、四川南部和贵州西部地区,其余三年主要位于重

庆地区、盆地与川西高原接壤地区及四川盆地均为低值区。模式对上述特征几乎没有体现,但是降尺度后对四川、重庆和陕西三省(市)交界降水高值区和四川盆地的低值区预测较好,但是对其余高值区预测较差。特别是当主雨带位于重庆地区时,降尺度后预测质量较差,但相对于模式预测结果,降尺度后与降水量级有很好的改善。

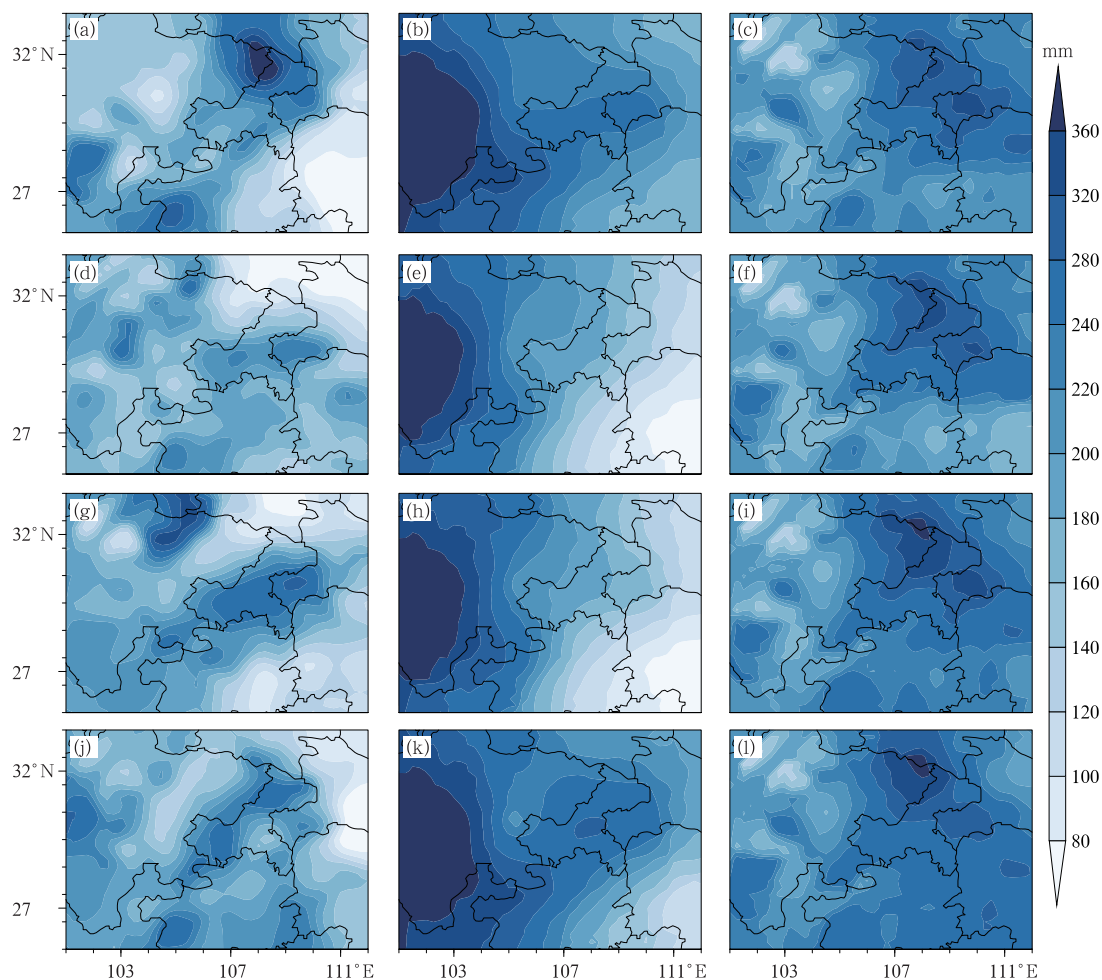


图 8 1992 年(a,b,c),1998 年(d,e,f),2007 年(g,h,i),1991 年(j,k,l)低值年降水空间分布
(a,d,g,j)观测资料,(b,e,h,k)CFS 模式原始结果,(c,f,i,l)SD_{H500} 和 SD_{SST} 集合平均结果

Fig. 8 Spatial-distribution of low-value precipitation year for 1992 (a, b, c),
1998 (d, e, f), 2007 (g, h, i), 1991 (j, k, l)
(a, d, g, j) observations, (b, e, h, k) original result of CFS model,
(c, f, i, l) aggregate average result of SD_{H500} and SD_{SST}

综合降水高值年和降水低值年可见,降尺度后对降水高值年的主雨带位置及量级预测较好,但是对降水低值主雨带位置把握较差,主要体现在降尺度对降水大值区的预测具有一定的倾向性特征。但无论是降水高值年还是低值年,降尺度后都很好改善了模式对量级上的预测能力。

4 结论与讨论

本文利用 CFS 模式实时预测的秋季位势高度场 H_{500} 和前期夏季印度洋地区的 SST 作为预测因子场,重点对华西南区 1982—2017 年秋季站点降水建立了组合统计降尺度预测模型,该模型选取了具

有清晰物理意义的 $10^{\circ}\text{S}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 范围 H_{500} 和 $30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $30^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 范围海温场作为预测因子,主要得到以下几点结论:

(1)选取的预测因子与预测量之间的 SVD 第一模态时间系数具有高度相关性,时间系数相关性在 H_{500} 上通过了 0.01 的显著性水平检验,海温场上通过了 0.01 的显著性水平检验,可看出预测因子与预测量之间具有高度相关的统计关系。

(2)本文建立的统计降尺度模型对 1982—2017 年华西南区秋季降水回报效果较 CFS 模式原始结果显著提高,主要体现在空间相关系数显著提高(多年均值从 -0.06 提升到 0.38)和大部站点的均方根误差降低(最高可达 40%)。

(3)此降尺度模型明显改善 CFS 模式在极端年份的预测技巧,明显修正了虚假降水中心,对实况降水大值中心位置具有很好的预测效果。但是对极端年份降水预测具有倾向性特征,主要体现在低估了高值年降水和高估了低值年降水。对这种特征的可能性原因还需要进一步分析。

此外,本文只对两种预测因子进行了降尺度分析,华西南区秋季降水还可能受到其他环流等因素的影响,该部分在今后的工作中还需要进一步研究分析。

参考文献

- 白虎志,董文杰,2004. 华西秋雨的气候特征及成因分析[J]. 高原气象,23(6):884-889. Bai H Z, Dong W J, 2004. Climate features and formation causes of autumn rain over Southwest China[J]. Plateau Meteor, 23(6):884-889(in Chinese).
- 蔡榕硕,谭红建,黄荣辉,2012. 中国东部夏季降水年际变化与东中国海及邻近海域海温异常的关系[J]. 大气科学,36(1):35-46. Cai R S, Tan H J, Huang R H, 2012. The relationship between interannual variations of summer precipitation in Eastern China and the SST anomalies in the East China Sea and its adjacent seas[J]. Chin J Atmos Sci, 36(1):35-46(in Chinese).
- 蔡蓁宁,康志明,牛若芸,等,2012. 2011 年 9 月华西秋雨特征及成因分析[J]. 气象,38(7):828-833. Cai X N, Kang Z M, Niu R Y, et al, 2012. Analysis of features and physical mechanisms of 2011 autumn rainfall in West China[J]. Meteor Mon, 38(7):828-833(in Chinese).
- 陈受钧,1960. 从夏季到秋季亚洲上空大气环流的转变[J]. 北京大学学报, (1):85-91. Chen S J, 1960. The variation of circulation over Asia from summer to autumn[J]. Acta Sci Nat Univ Pekinensis, (1):85-91(in Chinese).
- 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 K, Lin M J, Gao Y Z, 2008. Forecasting the summer rainfall in North China using the year-to-year increment approach[J]. Sci China Ser D Earth Sci, 38(11):1452-1459(in Chinese).
- 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 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).
- 黄荣辉,皇甫静亮,刘永,等,2016. 西太平洋暖池对西北太平洋季风槽和台风活动影响过程及其机理的最近研究进展[J]. 大气科学,40(5):877-896. Huang R H, Huangfu J L, Liu Y, et al, 2016. Progress in recent research on the processes and physical mechanisms involved in the influence of the Western Pacific warm pool on the monsoon trough and tropical cyclone activity over the Western North Pacific[J]. Chin J Atmos Sci, 40(5):877-896(in Chinese).
- 李启芬,刘婷婷,陈海山,等,2016. 基于土壤湿度和年际增量方法的中国夏季气温预测试验[J]. 气象科学,36(5):629-638. Li Q F, Liu T T, Chen H S, et al, 2016. Prediction of summer temperature in China based on soil moisture and interannual increment approach[J]. J Meteor Sci, 36(5):629-638(in Chinese).
- 李莹,李维京,艾婉秀,等,2012. 2011 年华西秋雨特征及其成因分析[J]. 气象科技进展,2(3):27-33. Li Y, Li W J, Ai W X, et al, 2012. Analysis of autumn rainfall characteristics and its causes in West China in 2011[J]. Adv Meteor Sci Technol, 2(3):27-33(in Chinese).
- 刘佳,马振峰,杨淑群,等,2015. 印度洋偶极子和华西秋雨的关系[J]. 高原气象,34(4):950-962. Liu J, Ma Z F, Yang S Q, et al, 2015. Relationship between Indian Ocean dipole and autumn rainfall in West China[J]. Plateau Meteor, 34(4):950-962(in Chinese).
- 刘婷婷,陈海山,蒋薇,等,2016. 基于土壤湿度和年际增量方法的我国夏季降水预测试验[J]. 大气科学,40(3):591-603. Liu T T, Chen H S, Jiang W, et al, 2016. Summer precipitation prediction in China using soil moisture and the year-to-year increment approach[J]. Chin J Atmos Sci, 40(3):591-603(in Chinese).
- 刘颖,范可,张颖,2013. 基于 CFS 模式的中国站点夏季降水统计降尺度预测[J]. 大气科学,37(6):1287-1296. 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):1287-1296(in Chinese).
- 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 Y, Ren H L, Zhang P Q, 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]. Chin J Atmos Sci, 41(2):313-320(in Chinese).
- 柳艳菊,孙冷,孙丞虎,等,2012. 2011 年秋季华西秋雨异常及成因分析[J]. 气象,38(4):456-463. Liu Y J, Sun L, Sun C H, et al, 2012. Analysis of anomalies of autumn rain in West China in 2011 and its possible mechanism[J]. Meteor Mon, 38(4):456-463(in Chinese).
- 司东,邵懿,孙冷,等,2015. 2014 年秋季我国华西地区降水异常的成因分析[J]. 气象,41(4):508-513. Si D, Shao X, Sun L, et al, 2015. Causality analysis of autumn rainfall anomalies in West China 2014[J]. Meteor Mon, 41(4):508-513(in Chinese).
- 唐红玉,吴遥,董新宁,等,2019. 重庆 2017 年秋季降水异常成因分析[J]. 气象,45(6):799-810. Tang H Y, Wu Y, Dong X N, et al, 2019. Causes analyses of precipitation anomaly in Chongqing in autumn 2017[J]. Meteor Mon, 45(6):799-810(in Chinese).
- 魏凤英,2007. 现代气候统计诊断与预测技术:第二版[M]. 北京:气象出版社:160-169. Wei F Y, 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology (second edition)[M]. Beijing:China Meteorological Press:160-169(in Chinese).
- 吴洪宝,吴蕾,2005. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京:气象出版社:104-131. Wu H B, Wu L, 2005. Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability[M]. Beijing:China Meteorological Press:104-131(in Chinese).
- 徐桂玉,林春育,1994. 华西秋雨特征及成因探讨[J]. 气象科学,14(2):149-154. Xu G Y, Lin C Y, 1994. Survey on the causes and

- features of autumn rain in western China[J]. *Sci Meteor Sin*, 14(2):149-154(in Chinese).
- 喻乙耽, 马振峰, 范广洲, 2018. 华西秋雨气候特征分析[J]. *成都信息工程大学学报*, 33(2):164-176. Yu Y D, Ma Z F, Fan G Z, 2018. The analysis of climatic feature of autumn rainfall in West China[J]. *J Chengdu Univ Inf Technol*, 33(2):164-176(in Chinese).
- Betts A K, Hong S Y, Pan H L, 1996. Comparison of NCEP-NCAR reanalysis with 1987 FIFE data[J]. *Mon Wea Rev*, 124(7):1480-1498.
- Entekhabi D, Rodriguez-Iturbe I, Castelli F, 1996. Mutual interaction of soil moisture state and atmospheric processes[J]. *J Hydrol*, 184(1-2):3-17.
- 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.
- Fan K, Wang H J, 2009. A new approach to forecasting typhoon frequency over the western North Pacific[J]. *Wea Forecasting*, 24(4):974-986.
- Jiang X W, Yang S, Li Y Q, et al, 2013. Seasonal-to-interannual prediction of the Asian summer monsoon in the NCEP climate forecast system version 2[J]. *J Climate*, 26(3):3708-3727.
- Lang X M, 2011. A hybrid dynamical-statistical approach for predicting winter precipitation over eastern China[J]. *Acta Meteor Sin*, 25(3):272-282, doi:10.1007/s13351-011-0303-5.
- Lang X M, Wang H J, 2010. Improving extraseasonal summer rainfall prediction by merging information from GCMs and observations[J]. *Wea Forecasting*, 25(4):1263-1274.
- Lang Y, Ye A Z, Gong W, et al, 2014. Evaluating skill of seasonal precipitation and temperature predictions of NCEP CFSv2 forecasts over 17 hydroclimatic regions in China[J]. *J Hydrometeor*, 15(4):1546-1559.
- 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.
- Meehl G A, Covey C, Delworth T, et al, 2007. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(9):1383-1394.
- Saha S, Nadiga S, Thiaw C, et al, 2006. The NCEP climate forecast system[J]. *J Climate*, 19(15):3483-3517.
- 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.
- Yang S, Zhang Z Q, Kousky V E, et al, 2008. Simulations and seasonal prediction of the Asian summer monsoon in the NCEP Climate Forecast System[J]. *J Climate*, 21(15):3755-3775.
- Yuan X, Liang X Z, 2011. Improving cold season precipitation prediction by the nested CWRP-CFS System[J]. *Geophys Res Lett*, 38(2):L02706.