

朱晓炜,李清泉,孙银川,等,2024. 基于印度洋海温信号的我国西北地区东部夏季降水组合降尺度预测方法研究[J]. 气象,50(3):357-369. Zhu X W, Li Q Q, Sun Y C, et al, 2024. A hybrid downscaling scheme for predicting summer precipitation in eastern part of Northwest China based on Indian Ocean SST [J]. Meteor Mon, 50(3):357-369(in Chinese).

基于印度洋海温信号的我国西北地区东部 夏季降水组合降尺度预测方法研究^{*}

朱晓炜^{1,2} 李清泉^{3,4} 孙银川^{1,2} 王 璠^{1,2} 王 岱^{1,2} 高睿娜^{1,2} 刘 颖³

1 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002

2 宁夏回族自治区气候中心, 银川 750002

3 中国气象局气候预测研究重点开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

4 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作
联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

提 要: 利用国家气候中心第二代气候模式预测业务系统(BCC-CPSv2)预测产品, 引入印度洋海温信号, 采用组合降尺度方法建立了西北地区东部汛期降水预测模型。该预测模型对 1991—2017 年西北地区东部夏季降水的回报技巧较 BCC-CPSv2 预测技巧显著提高, 空间相关系数由 0.42 提高到 0.75, 均方根误差明显减小, 最多下降达 80%。预测模型对降水空间分布型的预测能力较好, 很好地回报了典型年份(1987 年和 2010 年)夏季的降水距平百分率分布。通过抓住气象变量的空间分布特征, 组合降尺度方法可以修正动力模式产品的预测误差, 为西北地区东部夏季降水预测提供科学依据和技术支持, 具有较好的应用前景。

关键词: 印度洋海温, 西北地区东部, 夏季降水, 组合降尺度, 预测模型

中图分类号: P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.050301

A Hybrid Downscaling Scheme for Predicting Summer Precipitation in Eastern Part of Northwest China Based on Indian Ocean SST

ZHU Xiaowei^{1,2} LI Qingquan^{3,4} SUN Yinchuan^{1,2} WANG Fan^{1,2}

WANG Dai^{1,2} GAO Ruina^{1,2} LIU Ying³

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management
of Characteristic Agriculture in Arid Regions, Yinchuan 750002

2 Ningxia Climate Centre, Yinchuan 750002

3 CMA Key Laboratory for Climate Prediction Studies, National Climate Centre, Beijing 100081

4 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education International Joint Laboratory on Climate
and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological
Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: By using the prediction products of the Beijing Climate Centre Second-Generation Climate Prediction

^{*} 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0208)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100304)、国家自然科学基金重大项目(41790471)、国家重点基础研究发展计划(2016YFA0602200)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J024)、中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室指令性项目(CAMP-201905)、宁夏重点研发计划(2022CMG03058、2022BEG02020)和宁夏自然科学基金项目(2022AAC03673)共同资助

2022 年 11 月 3 日收稿; 2023 年 11 月 30 日收修定稿

作者简介: 朱晓炜, 主要从事气候变化及诊断分析研究. E-mail: zhxw1029@163.com

通讯作者: 李清泉, 主要从事气候异常诊断与数值模拟研究. E-mail: liqq@cma.gov.cn

Model System (BCC-CPSv2) and a hybrid downscaling method as well as the Indian Ocean SST signals, this paper establishes a summer precipitation prediction model for eastern part of Northwest China. Relative to BCC-CPSv2 model, the prediction skill of this model is significantly improved for the summer precipitation in eastern part of Northwest China from 1991 to 2017. The spatial correlation coefficient increases from 0.42 to 0.75, and the root mean square error decreases obviously, down most by 80%. The model has better prediction ability for the spatial distribution pattern of precipitation anomaly percentage, such as for the distributions of the summer precipitation anomaly percentages in 1987 and 2010. By grasping the spatial distribution characteristics of meteorological variables, this prediction method can correct the prediction errors of dynamic model products and provide scientific basis and technical support for summer precipitation prediction in eastern part of Northwest China, so it is expected to have a good application prospect.

Key words: Indian Ocean SST, eastern part of Northwest China, summer precipitation, hybrid downscaling, prediction model

引 言

影响气候的各因子和系统之间有复杂的相互作用,这种相互关系作用到区域,就形成了独特的区域气候特征。影响气候特征的因子是通过何种详细的物理过程产生的影响,目前还没有形成清晰的科学认识。因此,气候预测成为当今世界面临的一个重要课题(李维京,2012;王会军等,2020)。

短期气候预测方法主要有数值模式方法和物理统计方法。20 世纪 90 年代国家气候中心先后建立了第一代和第二代气候模式预测业务系统(Beijing Climate Centre Second-Generation Climate Prediction System, BCC-CPSv2),其中 BCC-CPSv2 从 2014 年 12 月 1 日正式投入准业务运行,并完成了从 1991 年开始的逐月回报试验。研究表明,BCC-CPSv2 对夏季中低纬海温有一定的预测能力,特别是在低纬地区,预测技巧尤为出色,升级后的 BCC-CPSv2 在热带中东太平洋、印度洋和海洋大陆地区温度和降水的预报效果改进明显;从概率预报效果来看,对我国冬季气温和夏季降水具备一定的预报能力(汪栩加等,2015;吴捷等,2017)。500 hPa 是对流层中层的代表层,包含对流层的主要天气气候系统,对 500 hPa 预测性能的评估是检验模式模拟能力的重要指标,研究表明 BCC-CPSv2 对东亚 500 hPa 高度场年际变化的预测效果较好(张洁等,2021;邓汝漳等,2021)。

当前发展的各类气候模式对东亚气候预测存在明显误差及不确定性(Krishnamurti et al, 2006; Fu

et al, 2009; Wen et al, 2012)。因此,将数值模式和统计经验方法相结合是一种有效提高预测能力的手段。Wang et al(2000)提出了年际增量的气候预测方法,并广泛应用(Fan et al, 2008; Fan and Wang, 2010; Fan and Tian, 2013; Yin and Wang, 2017; Dai et al, 2018; Zhang et al, 2019)。龚志强等(2015)发展了动力-统计相结合的预报方案,通过增加季节预测结果中年代变化的信息,提升了模式的预测性能(Gong et al, 2015)。任宏利和丑纪范(2007a; 2007b)提出了利用历史相似信息对误差进行预报的预测思路,并将相似误差订正方法应用到预测中(Ren and Chou, 2007)。Liu and Fan(2012; 2013; 2014)、Lin and Ren(2015; 2017)和 Liu et al(2021)在利用预测量自身空间分布信息的基础上,进一步补充了具有明确物理机制的预测因子,提出了组合降尺度的方法,并应用在降水和气温的趋势预测中,取得较好的预测效果。王会军等(2020)指出开展动力和统计相结合的气候预测方法对于区域气候预测而言至关重要。

我国西北地区东部处在亚洲东南季风边缘区,气候特征时空差异大,预测业务水平难度较大,尤其是夏季降水。研究表明,各类数值模式在西北地区东部降水的可预报性较我国其他地方偏低(Ren et al, 2019)。杨建玲等(2015; 2017)研究指出春季热带印度洋暖海盆模态可在大气中引起“Matsuno-Gill Pattern”的异常响应,在北半球中高纬度形成异常遥相关波列,西北地区东部处在“西低东高”的环流形势下,对流层高层风场为异常反气旋环流,低层有小范围的弱辐合,形成气流上升和水汽异常大

值中心,引起降水偏多。副热带高压(以下简称副高)是影响西北地区东部夏季降水的重要环流系统,钱代丽和管兆勇(2019)通过滤去 ENSO,发现印度洋海温距平激发的开尔文波强迫出异常的大气环流,导致西太平洋副高偏强、偏南;叠加厄尔尼诺的影响,次年印度洋海温强迫出异常环流通过“埃克曼抽吸”和非绝热冷却在对流层低层制造出异常负涡度,使副高明显偏强、偏西、偏南。王雅琦等(2020)研究指出西北地区东部夏季降水与副高的位置及强度密切相关,副高偏强、偏西时,异常的西南风携带水汽从西北地区东部的南边界输入,有利于降水偏多。以上研究表明,印度洋海温对西北地区东部夏季降水具有非常重要的指示性作用。

21 世纪初以来西北地区东部降水呈显著增加趋势,这种重要的转折性变化进一步增加了气候预测的难度(Chen et al, 2019; Chen C Z et al, 2021; 马鹏里等, 2020; Zhang et al, 2021; 陈发虎等, 2021)。基于以上论述,本研究引入印度洋海温信号,采用动力和统计相结合的方法开展客观预测技术研究,为短期气候趋势预测提供参考依据。

1 资料和方法

1.1 研究资料

本文所用模式资料为 BCC-CPSv2 1991—2017 年的回算产品(吴统文等, 2013)。NCEP/NCAR 再分析资料采用的是 500 hPa 位势高度(Kistler et al, 2001; Kanamitsu et al, 2002)和 OISSTv2 逐月海面温度(Reynolds et al, 2002),位势高度和海温数据的水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

研究区域为我国西北地区东部(图 1),范围为 $32^{\circ} \sim 42^{\circ} \text{N}$ 、 $100^{\circ} \sim 112^{\circ} \text{E}$ 。采用 1961—2017 年西北地区东部 155 个站夏季逐月降水数据,来源为国家气象信息中心。考虑到业务上对汛期降水预测时效的需求,采用 BCC-CPSv2 每年 2 月起报的同年夏季(6—8 月)逐月降水量和 500 hPa 位势高度数据,位势高度场的水平分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 。

1.2 研究方法

基于前一年秋、冬季印度洋海温实况资料和 BCC-CPSv2 回报的夏季 500 hPa 位势高度,利用组合降尺度方法建立预测模型(图 2)。其中,预测量

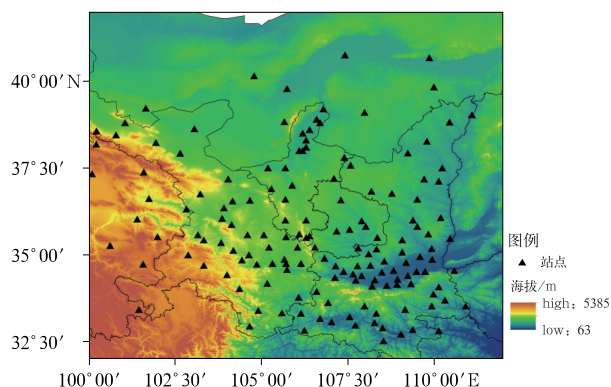


图 1 西北地区东部 155 个站的分布

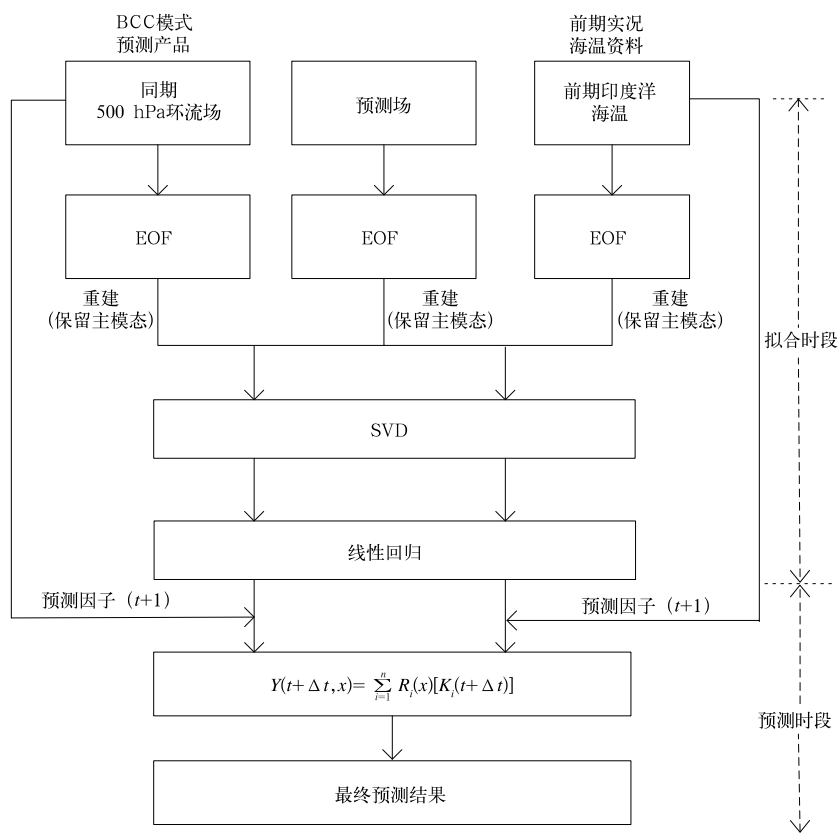
Fig. 1 Location of the 155 meteorological stations in the eastern part of Northwest China

是西北地区东部 155 个站 6—8 月降水量,预测因子是同期 500 hPa 位势高度和前期秋、冬季(前一年 9 月至当年 2 月)印度洋海面温度。首先,拟合时段内利用 EOF 对降水场、位势高度场和海温场分解,保留各场 90% 的主模态,回算到原始变量场,去除多余噪音(Wilks, 2006)。然后,将滤波后的降水场分别与位势高度场、海温场利用奇异值分解(SVD),提取两个场之间的主要耦合模态,利用得到的 SVD 模态及时间系数建立降水-高度场、降水-海温场之间的耦合关系(Bretherton et al, 1992; Uvo et al, 2001)。最后在预测时段,利用位势高度场和海温场,结合已经建立的耦合关系得到降水预测场。组合降尺度是利用预测因子和预测量之间主要模态的最优耦合变化关系,将源于气候模式的同期预测因子和前期预测因子纳入到模型中,开展预测业务的方法。此方法不仅考虑了场与场之间时间尺度上的关系,而且将两个场的空间分布特征联系起来,所建立的定量客观的预测模型可以弥补模式产品对重要气候系统模拟效果不佳的缺陷,对提高区域综合预测能力具有较好的应用价值。

为了定量检验预测模型的预测性能,采用空间相关系数、均方根误差(RMSE)和均方根误差降低百分比(RMSEP)检验。其中,空间相关系数主要反映空间型的相似程度;RMSE 和 RMSEP 用来表征预测值和观测值的量级差异,其表达式为:

$$\text{RMSEP} = \frac{(\text{RMSE}_{\text{预测模型}} - \text{RMSE}_{\text{BCC结果}})}{\text{RMSE}_{\text{BCC结果}}} \times 100\%$$

式中:RMSE_{预测模型} 和 RMSE_{BCC结果} 分别表示预测模型降尺度和 BCC-CPSv2 预测结果的均方根误差。



注: $Y(t+\Delta t, x)$ 为预测年的降水量, $R_i(x)$ 为降水的 SVD 空间模态,
 $K_i(t+\Delta t)$ 为预测年的 SVD 时间系数。

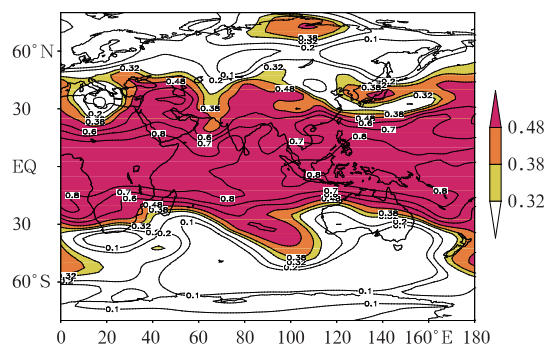
图 2 组合降尺度方法示意图

Fig. 2 Sketch diagram of the hybrid downscaling method

2 预测因子的选取

2.1 西北地区东部降水量变化与大气环流

500 hPa 位势高度位于对流层中层的无辐散层, 可以体现出高空大尺度环流波动。图 3 为 1991—2017 年 NCEP 再分析资料与 BCC-CPSv2 预测产品汛期的 500 hPa 相关场。可以看到, 在 $30^{\circ}\text{S} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 范围内, 两者具有较好的相关性, 显著正相关区位于中低纬度, 相关系数在 0.6 以上, 表明 BCC-CPSv2 对夏季 500 hPa 高度场的回报能力较高。本文确定的关键区为 $10^{\circ}\text{S} \sim 70^{\circ}\text{N}, 40^{\circ} \sim 140^{\circ}\text{E}$, 包括了对夏季降水影响较大的阻塞高压、副高、印缅槽、东亚槽等主要环流系统(庞雪琪等, 2017; 吴遥等, 2020)。选取模式产品 2 月预报的未来 6—8 月的 500 hPa 高度场作为预测因子, 采用组合降尺度方法建立其与西北地区东部夏季降水预测模型。



注: 黄、橙、红色填色分别代表通过 0.10、0.05 以及 0.01 的显著性水平检验。

图 3 1991—2017 年夏季 BCC-CPSv2 预测(每年 2 月起报)与 NCEP/NCAR 再分析的 500 hPa 位势高度的时间相关系数(等值线)
 Fig. 3 Correlation coefficients (contour) for summer 500 hPa geopotential height between the NCEP/NCAR reanalysis data and BCC-CPSv2 model output (started from February) during 1991—2017

西北地区东部夏季降水与 500 hPa 高度场 SVD 的前 2 对模态的累计平方协方差贡献率分别为 62.11% 和 89.18%。图 4 为西北地区东部夏季降水与 500 hPa 高度场 SVD 第一模态空间分布及对应的时间系数,时间相关系数达 0.68。高度场上中低纬从东向西呈现“高-低-高”波列分布,副高系统强盛且位置偏西,边缘盛行偏南气流,有利于孟加拉湾水汽北上(王雅琦等,2020)。乌拉尔山和新疆附近存在高压脊,西伯利亚为低压中心,有利于冷空气随槽东移南下。在冷空气和水汽的配合下,西北地区东部易降水偏多,多值中心位于甘肃和宁夏南部交界处。

图 5 为西北地区东部夏季降水与 500 hPa 高度场 SVD 第二模态空间分布及对应的时间系数,时间相关系数为 0.66。东北冷涡偏强且季节内活动频繁,有利于极地冷空气南下,对我国西部的影响较图 4b 明显偏弱;副高北侧的气流和东亚夏季风可

携带水汽进入我国内陆,在冷空气和水汽的协调配合下导致西北地区东部的北部降水偏多。该环流型与 2012 年我国夏季环流型较为相似,西北地区北部降水异常偏多(赵俊虎等,2020;2022)。

2.2 西北地区东部降水量变化与印度洋海面温度

相对于大气环流,海温具有更好的持续性。热带印度洋是西北地区东部降水的主要水汽源地之一,同时印度洋海温异常通过海气相互作用影响东亚大气环流的分布,研究表明热带印度洋海面温度距平(SSTA)与西北地区东部降水存在显著相关(晏红明等,2001;李永生等,2023)。利用前期秋季和冬季的印度洋海温作为预测因子,关键区范围为 $60^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $20^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$,建立预测因子与西北地区东部降水量的联系。

西北地区东部夏季降水与前期秋冬季印度洋海温 SVD 前 2 对模态的累计平方协方差贡献率分别

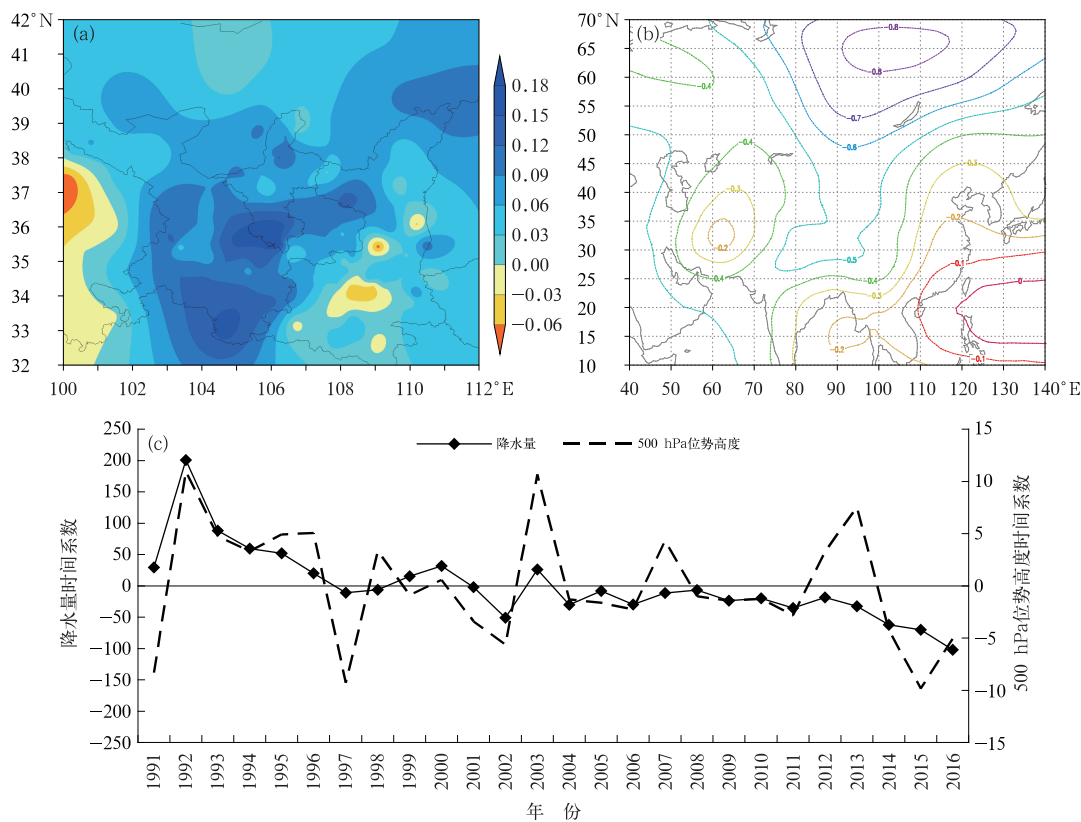


图 4 1991—2016 年夏季(a)西北地区东部降水量和(b)500 hPa 位势高度的 SVD 第一模态空间分布及(c)时间系数

Fig. 4 Spatial distribution of the first SVD mode for (a) the observed rainfall in the eastern part of Northwest China and (b) 500 hPa geopotential height, and (c) corresponding time coefficients in the summer of 1991—2016

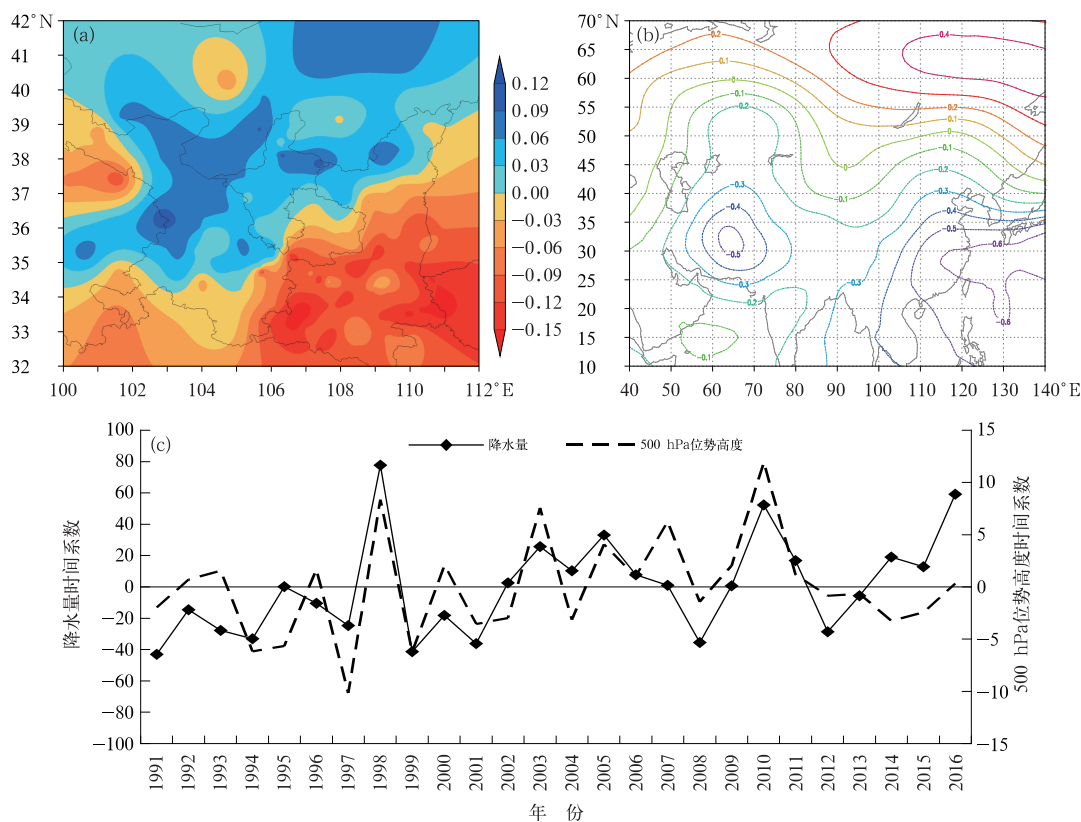


图 5 1991—2016 年夏季(a)西北地区东部降水量和(b)500 hPa 位势高度的 SVD 第二模态及(c)时间系数

Fig. 5 Spatial distribution of the second SVD mode for (a) observed rainfall in the eastern part of Northwest China and (b) 500 hPa geopotential height, and (c) corresponding time coefficients in the summer of 1991—2016

为 46.82% 和 68.88%。图 6 为西北地区东部夏季降水与前期秋冬季印度洋海温 SVD 第一模态空间分布及其时间系数, 时间相关系数为 0.62。热带印度洋海温主要表现为全区一致的单极型分布(Saji et al, 1999; Annamalai, 2005)。研究表明热带印度洋偏暖容易激发上空大气 Matsuno-Gill 型响应, 引起对流层高层高度场的异常响应, 导致南亚高压的强度偏强、位置偏南(Yang et al, 2007; Huang et al, 2011)。南亚高压偏强与西北地区东部降水呈现北少南多的分布型有较好的对应关系(周航, 2014)。印度洋海温异常可以通过影响南亚高压的强弱, 进而影响西北地区东部降水。

图 7 为西北地区东部夏季降水与前期秋冬季印度洋海温 SVD 第二模态空间分布及其时间系数, 时间相关系数为 0.68。热带印度洋呈偶极子的负位相分布(Saji et al, 1999; Webster et al, 1999; Yuan et al, 2008; 2012)。研究表明印度洋偶极子负位相时, MJO 东传过程中受到沃克环流配置影响, 在

140°E 赤道附近形成东西向非对称积云对流加热热源, 其东侧开尔文波响应加强了东风异常, 配合副高南缘东风压制了中国南海的西南季风水汽输送(张舰齐等, 2019)。西北地区东部夏季的水汽主要来自孟加拉湾、南海和西太平洋的水汽输送, 弱的水汽输送导致西北地区东部降水偏少(魏娜等, 2010; 吴萍等, 2017)。

3 组合降尺度预测模型建立和预测结果的检验评估

根据上述分析, 利用 BCC-CPSv2 当年 2 月预测夏季 6—8 月 500 hPa 的位势高度和前一年秋、冬季印度洋海温场作为预测因子, 建立组合降尺度预测模型(以下分别简称为 H500 和 IDO), 其中 1991—2011 年采用交叉检验(即去掉一年进行建模并对该年进行预测), 2012—2017 年采用独立样本检验。

图 8 给出了观测与 BCC-CPSv2 结果和降尺度

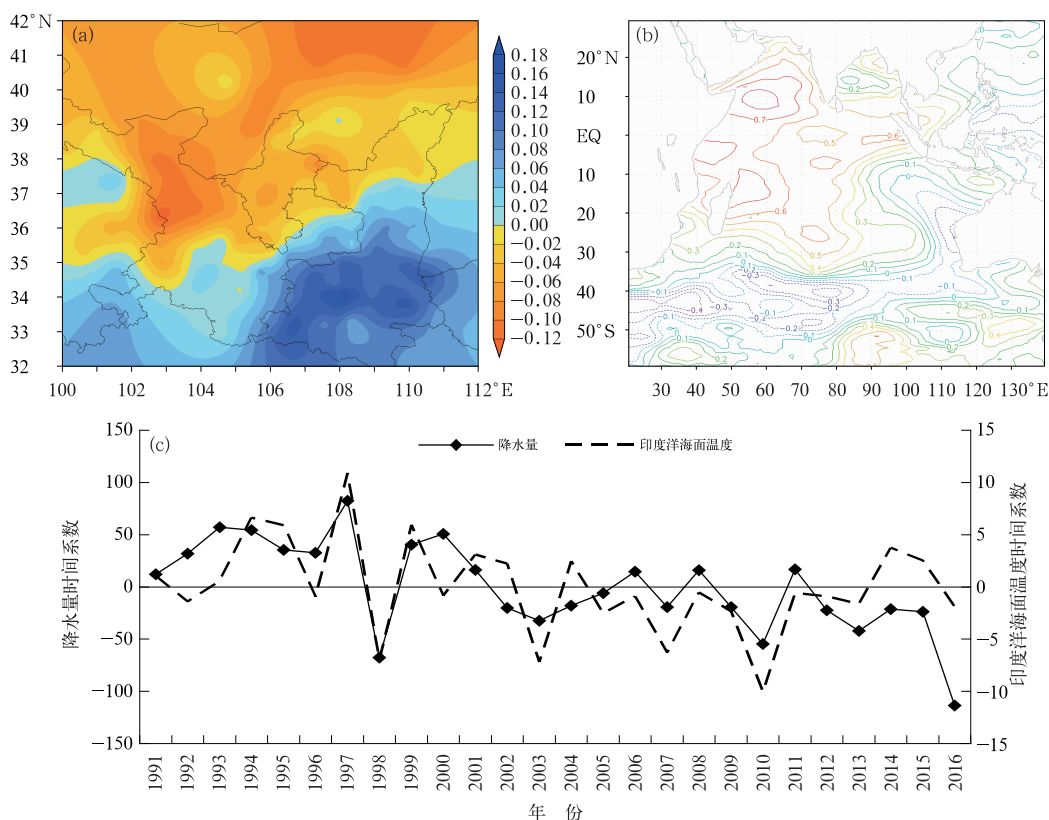


图6 1991—2016年夏季(a)西北地区东部降水量和(b)印度洋海面温度的SVD第一模态及(c)时间系数

Fig. 6 Spatial distribution of the first SVD mode for (a) observed rainfall in the eastern part of Northwest China and (b) Indian Ocean SST, and (c) corresponding time coefficients in the summer of 1991–2016

模型预测结果的空间相关系数年际变化。交叉检验期间,BCC-CPSv2 结果的空间相关系数为 0.43, H500 和 IDO 的空间相关系数分别为 0.74 和 0.76, 集合之后为 0.76。独立样本检验期间,BCC-CPSv2 结果的空间相关系数为 0.38, H500 和 IDO 的空间相关系数均为 0.69, 集合之后为 0.70。从空间分布相似程度来看,在交叉和独立样本检验期间,降尺度模型预测结果与观测值的空间相关系数较 BCC-CPSv2 结果均有明显的提高,其中集合的预测效果提高最明显。

图9为 BCC-CPSv2 结果和降尺度模型预测结果的均方根误差年际变化。交叉检验期间,BCC-CPSv2 结果的均方根误差为 9.8 mm, H500 和 IDO 的均方根误差分别为 5.1 mm 和 9.6 mm, 集合之后为 4.9 mm。独立样本检验期间,BCC-CPSv2 结果的均方根误差为 9.7 mm, H500 和 IDO 的均方根误差分别为 7.4 mm 和 9.0 mm, 集合之后为 6.8 mm。从预测量级上看,降尺度模型预测结果的均方根误

差较 BCC-CPSv2 有明显的降低,集合的均方根误差降低最明显,其次为 H500。

对比 H500 和 IDO 两种预测模型,空间相关系数的预测效果差距不大,均方根误差的预测效果 H500 优于 IDO,集合的预测结果均优于该两种模型。BCC-CPSv2 提前 3 个月预测 500 hPa 位势高度场,其预报具有不确定性,前期印度洋 SSTA 来自于观测,是比较确定的。通过引入印度洋海温信号可以弥补模式产品效果不佳和环流预测出现偏差的缺陷,对提高区域综合预测能力具有较好的应用价值。利用 RMSEP 评估集合后的降尺度结果和模式原始结果的预测能力,对比两者的预测能力,除陕西北部及南部个别站点之外,大多数站点 RMSEP 都大于 0;统计降尺度预测的 RMSEP 比动力模式的预测结果的均方根误差明显降低,最多减少达 80%(图 10)。由此可见,本文建立的降尺度模型在大部分地区较 BCC-CPSv2 预测结果有较大改善。

下文分析模型在典型年份的预测效果。1998 年

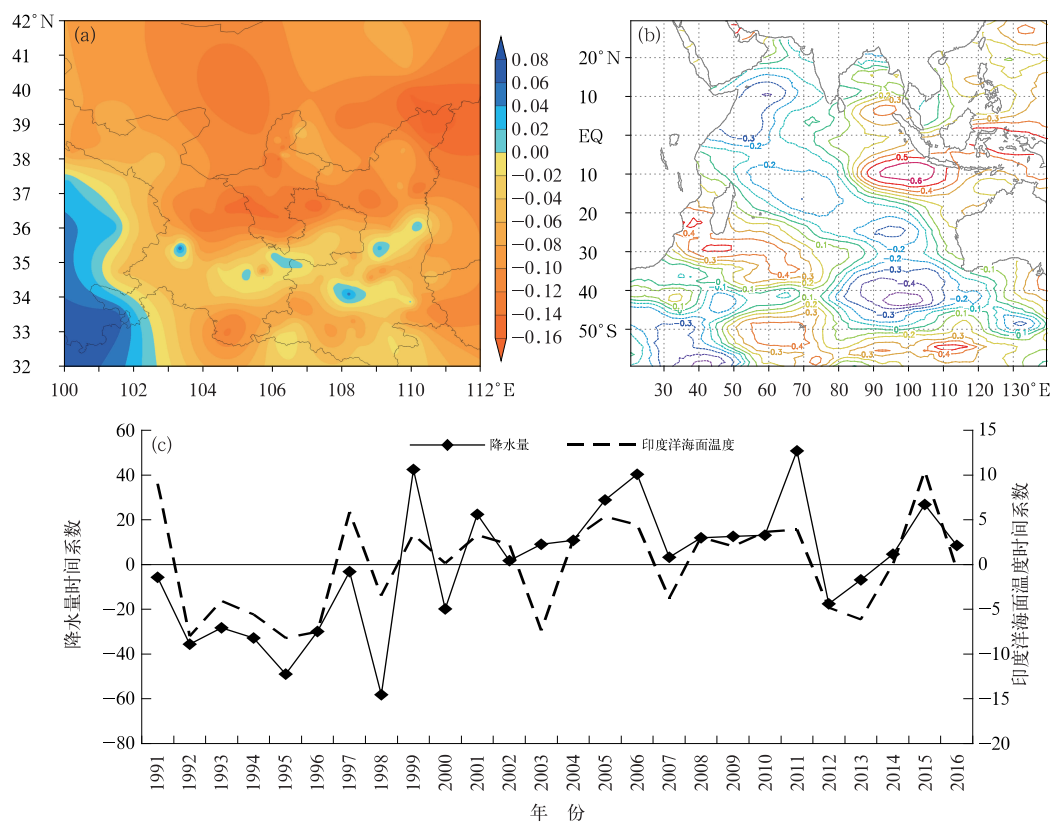


图 7 1991—2016 年夏季(a)西北地区东部降水量和(b)印度洋海面温度的 SVD 第二模态及(c)时间系数

Fig. 7 Spatial distribution of the second SVD mode for (a) observed rainfall in the eastern part of Northwest China and (b) Indian Ocean SST, and (c) corresponding time coefficients in the summer of 1991–2016

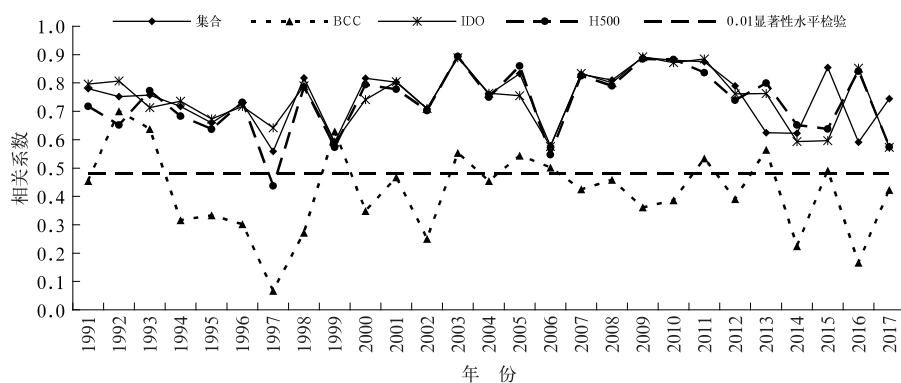


图 8 1991—2017 年观测与 BCC-CPSv2 预测和降尺度预测结果的空间相关系数的时间序列

Fig. 8 Time series of spatial correlation coefficients of precipitation between observation and the BCC-CPSv2 output and downscaling result during 1991–2017

ENSO 事件由成熟期转变为衰弱期,热带西太平洋次表层海温变冷(黄荣辉等,1998),前期印度洋海温处在异常偏暖的状态下,西北地区东部夏季降水主要呈南多北少的分布(图 11a),BCC-CPSv2 预测降

水分布与观测完全相反(图 11c),根据 500 hPa 位势高度和印度洋海温建立的组合降尺度模型较好地回报出了西北地区东部夏季南多北少的降水量距平空间分布(图 11e)。2010 年夏季西北地区东部降水距

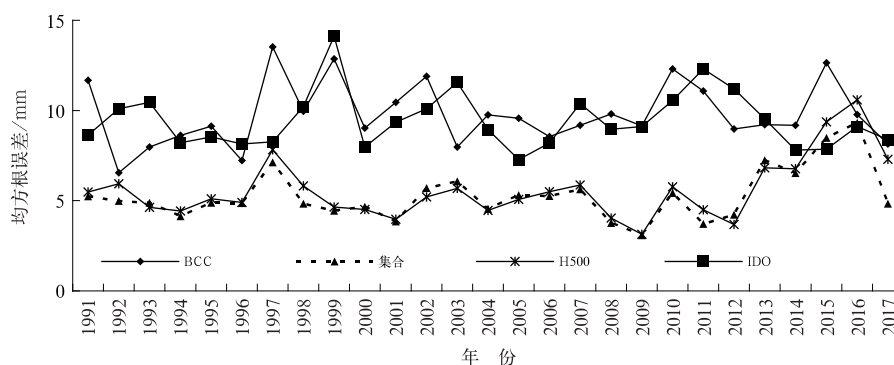
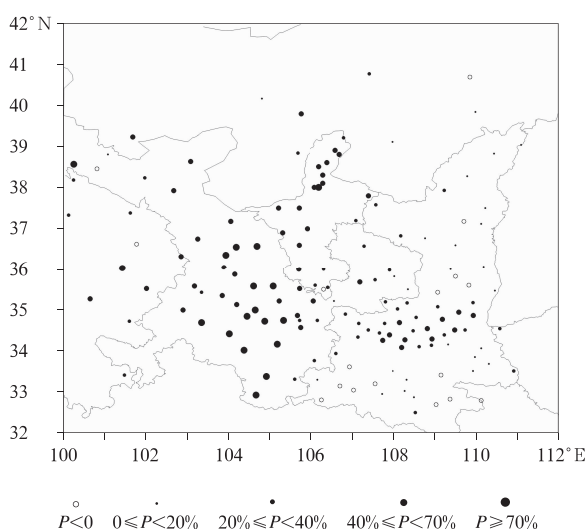


图9 1991—2017年BCC-CPSv2和降尺度模型预测结果的均方根误差时间序列

Fig. 9 Times series of root mean square error between BCC-CPSv2 output and the downscaling result during 1991—2017



注:实心圆点为正值,表示降尺度模型预测降水量的均方根误差下降;空心圆点为负值。

图10 1991—2017年降尺度预测与BCC-CPSv2预测降水量的均方根误差降低百分率

Fig. 10 Decreased percentage of root mean square error percentage between the downscaled precipitation forecast and the BCC-CPSv2 output during 1991—2017

平百分率分布呈东南部偏多、西北部偏少型,偏多的区域主要集中在陕西中南部和甘肃河东南部(图11b)。BCC-CPSv2预测为除内蒙古和甘肃河西走廊中部降水偏少,其余地区偏多。BCC-CPSv2抓住了降水整体分布型,但预测的雨带位置明显偏北,降水偏多的区域较实况明显北扩(图11d)。组合降尺度模型回报的降水偏多的地区主要在陕西中南部,修正了BCC-CPSv2预报雨带偏北的问题,降水偏多的区域向南缩小,降尺度模型的整体预测效果较BCC-

CPSv2有明显的改进(图11f)。

4 结论

利用观测的中国西北地区东部夏季降水量和BCC-CPSv2回报的夏季500 hPa位势高度,采用EOF和SVD分析两个要素主要模态的耦合关系。当西北地区东部夏季降水呈现第一模态空间分布时,在500 hPa位势高度关键区(10°~70°N、40°~140°E)为从东向西呈“高-低-高”的波列分布,乌拉尔山—新疆附近为高压脊,两个高压脊之间的西伯利亚地区为低压中心,这种环流型配置下偏南气流强盛,导致西北地区东部降水偏多。西北地区东部夏季降水第二模态为南北反相位,与之对应,东北冷涡强盛,季节内冷空气活动频繁并南下,在水汽条件的配合下西北地区东部的北部降水易偏多。

分析了西北地区东部夏季降水和印度洋海面温度的耦合关系,降水第一模态为南北相异,对应印度洋海面温度一致的单极型分布,热带印度洋偏暖能引起对流层高层高度场异常,从而导致南亚高压的强度偏强、位置偏南,强盛的南亚高压容易导致西北地区东部的北部降水偏少。西北地区东部夏季降水第二模态为全区一致,相应地,热带印度洋海温呈偶极子负位相分布。这种海温分布通过大气环流异常抑制中国南海的西南季风水汽输送,导致西北地区东部夏季降水一致偏少。

基于上述分析结果,采用BCC-CPSv2回报的夏季500 hPa位势高度场和前期秋、冬季印度洋海温作为预测因子,建立了动力-统计相结合的组合降尺度预测模型。此降尺度模型对1991—2017年西

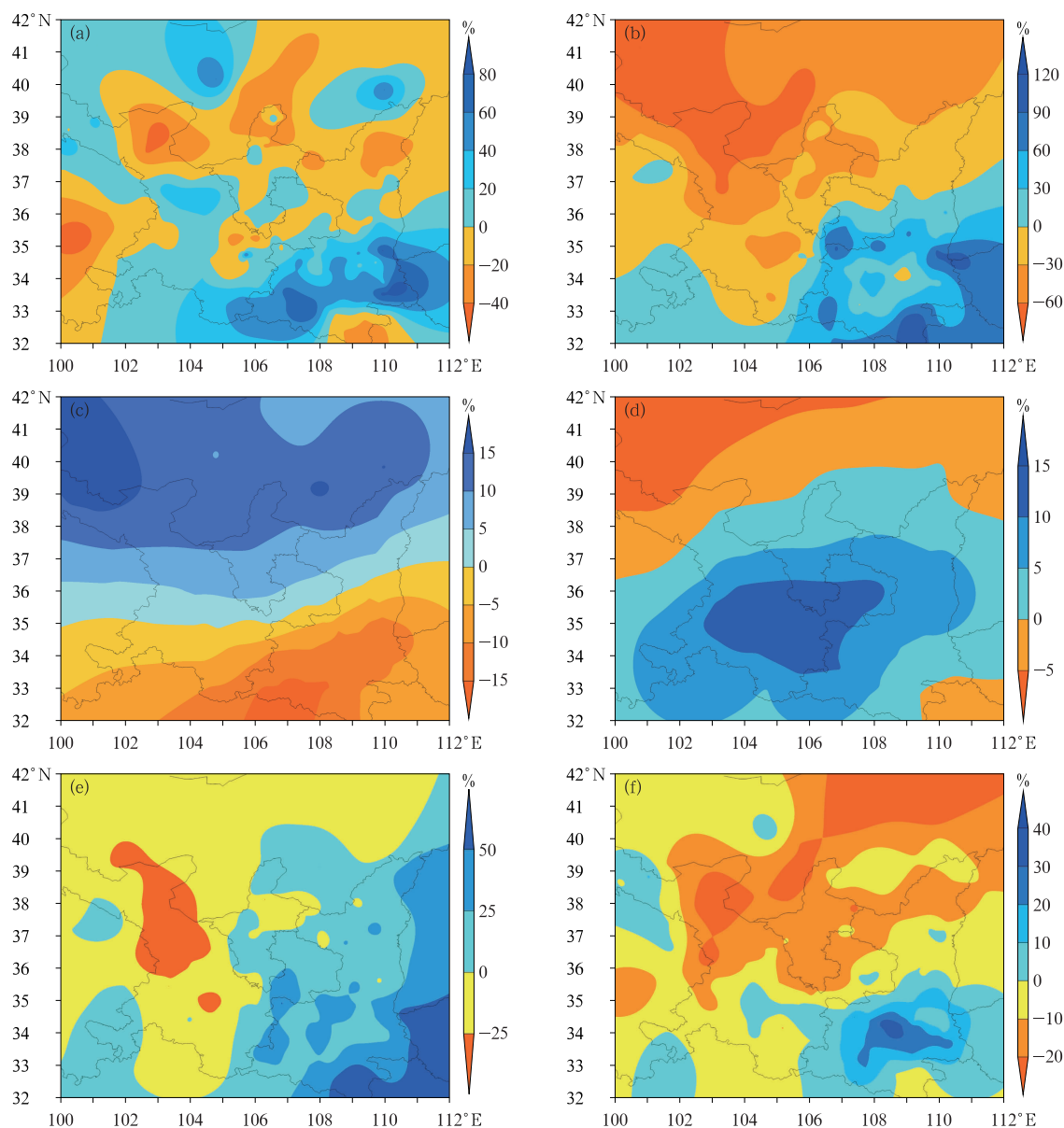


图 11 1998 年(a,c,e)和 2010 年(b,d,f)夏季降水距平百分率空间分布

(a,b)观测,(c,d)BCC-CPSv2 预测,(e,f)降尺度模型预测

Fig. 11 Pattern distribution of (a, c, e) 1998 and (b, d, f) 2010 summer precipitation anomaly percentage

(a, b) observation, (c, d) BCC-CPSv2 output, (e, f) downscaling result

北地区东部夏季降水的回报技巧较 BCC-CPSv2 预测技巧显著提高,表现为空间相关系数的提高、均方根误差的降低。此模型较好地回报出了 1998 年和 2010 年西北地区东部夏季降水距平百分率的空间分布,修正了 BCC-CPSv2 的预测误差,进一步验证了印度洋海温是影响西北地区东部降水的重要因素之一。通过采用动力-统计相结合的组合降尺度模型,可以有效地结合前期预测因子与预测要素的综合作用,尤其可以抓住气象变量的空间分布特征,为

西北地区东部夏季降水预测提供有益的科学依据和技术支持。

参考文献

- 陈发虎,陈婕,黄伟,2021. 东亚夏季风减弱诱发我国西北干旱区降水增加[J]. 中国科学:地球科学,51(5):824-826. Chen F H, Chen J, Huang W, 2021. Weakened East Asian summer monsoon triggers increased precipitation in Northwest China[J]. Sci China Earth Sci, 51(5):824-826(in Chinese).
- 邓汝漳,储敏,任宏利,等,2021. BCC_CSM 北极海冰模拟性能的改

- 进对东亚冬季气候模拟的影响[J]. 大气科学学报, 44(1): 61-74. Deng R Z, Chu M, Ren H L, et al, 2021. Impact of BCC_CSM Arctic sea ice simulation improvement on East Asian winter climate simulation[J]. Trans Atmos Sci, 44(1): 61-74 (in Chinese).
- 龚志强, 赵俊虎, 封国林, 等, 2015. 基于年代际突变分量的东亚夏季降水动力-统计预报方案研究[J]. 中国科学: 地球科学, 45(2): 236-252. Gong Z Q, Zhao J H, Feng G L, et al, 2015. Dynamic-statistics combined forecast scheme based on the abrupt decadal change component of summer precipitation in East Asia[J]. Sci China Earth Sci, 45(2): 236-252 (in Chinese).
- 黄荣辉, 徐予红, 王鹏飞, 等, 1998. 1998年夏长江流域特大洪涝特征及其成因探讨[J]. 气候与环境研究, 3(4): 300-313. Huang R H, Xu Y H, Wang P F, et al, 1998. The features of the catastrophic flood over the Changjiang River Basin during the summer of 1998 and cause exploration[J]. Climatic Environ Res, 3(4): 300-313 (in Chinese).
- 李维京, 2012. 现代气候业务[M]. 北京: 气象出版社. Li W J, 2012. Modern Climate Service [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 李永生, 陈晨, 李忠贤, 等, 2023. 北大西洋和热带印度洋海温的协同作用对松花江流域暖季降水年代际变化的影响[J]. 气象学报, 81(2): 258-268. Li Y S, Chen C, Li Z X, et al, 2023. Joint effects of the sea surface temperatures over North Atlantic and the tropical Indian Ocean on the interdecadal variation of warm-season precipitation in the Songhua River Basin[J]. Acta Meteor Sin, 81(2): 258-268 (in Chinese).
- 马鹏里, 杨金虎, 卢国阳, 等, 2020. 西北地区东部气候的转折性变化[J]. 高原气象, 39(4): 840-850. Ma P L, Yang J H, Lu G Y, et al, 2020. The transitional change of climate in the east of Northwest China[J]. Plateau Meteor, 39(4): 840-850 (in Chinese).
- 庞雪琪, 李栋梁, 姚慧茹, 2017. 欧亚中高纬冬季地表感热异常与中国西北东部夏季降水的可能联系[J]. 高原气象, 36(3): 675-684. Pang X Q, Li D L, Yao H R, 2017. Possible linkage between winter surface sensible heat flux anomalies over the mid-high latitudes of the Eurasian Continent and summer precipitation in the eastern part of Northwest China[J]. Plateau Meteor, 36(3): 675-684 (in Chinese).
- 钱代丽, 管兆勇, 2019. 滤除 ENSO 信号前后夏季热带印度洋海盆尺度海温距平对西太平洋副热带高压的不同影响[J]. 气象学报, 77(3): 442-455. Qian D L, Guan Z Y, 2019. Impacts of tropical Indian Ocean sea surface temperature anomalies on the variation of Western Pacific subtropical high in the summer: dependent and independent of ENSO[J]. Acta Meteor Sin, 77(3): 442-455 (in Chinese).
- 任宏利, 丑纪范, 2007a. 数值模式的预报策略和方法研究进展[J]. 地球科学进展, 22(4): 376-385. Ren H L, Chou J F, 2007a. Study progress in prediction strategy and methodology on numerical model[J]. Adv Earth Sci, 22(4): 376-385 (in Chinese).
- 任宏利, 丑纪范, 2007b. 动力相似预报的策略和方法研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37(8): 1101-1109. Ren H L, Chou J F, 2007b. Strategy and methodology of dynamical analogue prediction[J]. Sci China Ser D: Earth Sci, 37(8): 1101-1109 (in Chinese).
- 汪棚加, 郑志海, 封国林, 等, 2015. BCC_CSM 模式夏季关键区海温回报评估[J]. 大气科学, 39(2): 271-288. Wang X J, Zheng Z H, Feng G L, et al, 2015. Summer prediction of sea surface temperatures in key areas in BCC_CSM model[J]. Chin J Atmos Sci, 39(2): 271-288 (in Chinese).
- 王会军, 任宏利, 陈活泼, 等, 2020. 中国气候预测研究与业务发展的回顾[J]. 气象学报, 78(3): 317-331. Wang H J, Ren H L, Chen H P, et al, 2020. Highlights of climate prediction study and operation in China over the past decades[J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 317-331 (in Chinese).
- 王雅琦, 冯娟, 李建平, 等, 2020. 西北地区东部夏季降水年际变化特征及其与环流的关系[J]. 高原气象, 39(2): 290-300. Wang Y Q, Feng J, Li J P, et al, 2020. Interannual variation of summer precipitation in the eastern of Northwest China and its relationship with circulation[J]. Plateau Meteor, 39(2): 290-300 (in Chinese).
- 魏娜, 巩远发, 孙娟, 等, 2010. 西北地区近 50a 降水变化及水汽输送特征[J]. 中国沙漠, 30(6): 1450-1457. Wei N, Gong Y F, Sun X, et al, 2010. Variation of precipitation and water vapor transport over the Northwest China from 1959 to 2005[J]. J Desert Res, 30(6): 1450-1457 (in Chinese).
- 吴捷, 任宏利, 张帅, 等, 2017. 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, 41(6): 1300-1315. Wu J, Ren H L, Zhang S, et al, 2017. Evaluation and predictability analysis of seasonal prediction by BCC second-generation climate system model[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6): 1300-1315 (in Chinese).
- 吴萍, 丁一汇, 柳艳菊, 2017. 厄尔尼诺事件对中国夏季水汽输送和降水分布影响的新研究[J]. 气象学报, 75(3): 371-383. Wu P, Ding Y H, Liu Y J, 2017. A new study of El Niño impacts on summertime water vapor transport and rainfall in China[J]. Acta Meteor Sin, 75(3): 371-383 (in Chinese).
- 吴统文, 宋连春, 刘向文, 等, 2013. 国家气候中心短期气候预测模式系统业务化进展[J]. 应用气象学报, 24(5): 533-543. Wu T W, Song L C, Liu X W, et al, 2013. Progress in developing the short-range operational climate prediction system of China National Climate Center[J]. J Appl Meteor Sci, 24(5): 533-543 (in Chinese).
- 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).
- 晏红明, 严华生, 谢应齐, 2001. 中国汛期降水的印度洋 SSTA 信号特征分析[J]. 热带气象学报, 17(2): 109-116. Yan H M, Yan H S, Xie Y Q, 2001. The SSTA signal characteristic analysis over India Ocean during flood season in China[J]. J Trop Meteor, 17(2): 109-116 (in Chinese).

- 杨建玲,胡海波,穆建华,等,2017.印度洋海盆模影响西北东部5月降水的数值模拟研究[J].高原气象,36(2):510-516. Yang J L, Hu H B, Mu J H, et al, 2017. Study of numerical model stimulation of the tropical Indian Ocean basin mode impacts on May precipitation anomaly in east of Northwest China[J]. Plateau Meteor, 36(2):510-516(in Chinese).
- 杨建玲,李艳春,穆建华,等,2015.热带印度洋海温与西北地区东部降水关系研究[J].高原气象,34(3):690-699. Yang J L, Li Y C, Mu J H, et al, 2015. Analysis of relationship between sea surface temperature in tropical Indian Ocean and precipitation in east of Northwest China[J]. Plateau Meteor, 34(3):690-699(in Chinese).
- 张舰齐,叶成志,陈静静,等,2019.印度洋偶极子对中国南海夏季西南季风水汽输送的影响[J].大气科学,43(1):49-63. Zhang J Q, Ye C Z, Chen J J, et al, 2019. Influence of the Indian Ocean dipole on water vapor transport from southwesterly monsoon over the South China Sea in the summer[J]. Chin J Atmos Sci, 43(1):49-63(in Chinese).
- 张洁,董敏,吴统文,等,2021. BCC模式对北半球阻塞高压的模拟偏差评估及原因[J].大气科学,45(1):181-194. Zhang J, Dong M, Wu T W, et al, 2021. Reproductions of Northern Hemisphere blocking in BCC models and possible reasons for the biases[J]. Chin J Atmos Sci, 45(1):181-194(in Chinese).
- 赵俊虎,陈丽娟,章大全,2022. 2021年夏季我国气候异常特征及成因分析[J].气象,48(1):107-121. Zhao J H, Chen L J, Zhang D Q, 2022. Characteristics and causes for the climate anomalies over China in summer 2021[J]. Meteor Mon, 48(1):107-121(in Chinese).
- 赵俊虎,熊开国,陈丽娟,2020. 东北夏季降水预测技巧偏低的原因探讨[J].大气科学,44(5):913-934. Zhao J H, Xiong K G, Chen L J, 2020. The causes of low predictive skills of precipitation in flood season in Northeast China[J]. Chin J Atmos Sci, 44(5):913-934(in Chinese).
- 周航,2014. 夏季南亚高压与北半球大气环流和中国降水的关系[D].南京:南京信息工程大学:46-47. Zhou H, 2014. Relationship between summer South Asia high and both atmospheric circulation in Northern Hemisphere and precipitation over China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology:46-47(in Chinese).
- Annamalai H, Liu P, Xie S P, 2005. Southwest Indian Ocean SST variability: its local effect and remote influence on Asian monsoons[J]. J Climate, 18(20):4150-4167.
- Bretherton C S, Smith C, Wallace J M, 1992. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data[J]. J Climate, 5(6):541-560.
- Chen C Z, Zhang X J, Lu H Y, et al, 2021. Increasing summer precipitation in arid central Asia linked to the weakening of the East Asian summer monsoon in the recent decades[J]. Int J Climatol, 41(2):1024-1038.
- Chen F H, Chen J, Huang W, 2021. Weakened East Asian summer monsoon triggers increased precipitation in Northwest China [J]. Sci China Earth Sci, 64(5):835-837.
- Chen F H, Chen J H, Huang W, et al, 2019. Westerlies Asia and monsoonal Asia: spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales [J]. Earth-Sci Rev, 192:337-354.
- Dai H X, Fan K, Tian B Q, 2018. A hybrid downscaling model for winter temperature over Northeast China[J]. Int J Climatol, 38(S1):e349-e363.
- Fan K, Tian B Q, 2013. Prediction of wintertime heavy snow activity in Northeast China[J]. Chin Sci Bull, 58(12):1420-1426.
- Fan K, Wang H J, 2010. Seasonal prediction of summer temperature over Northeast China using a year-to-year incremental approach [J]. J Meteor Res, 24(3):269-275.
- Fan K, Wang H J, Choi Y J, 2008. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of the Yangtze River Valley summer rainfall[J]. Chin Sci Bull, 53(4):602-609.
- Fu X H, Wang B, Bao Q, et al, 2009. Impacts of initial conditions on monsoon intraseasonal forecasting [J]. Geophys Res Lett, 36(8):L08801.
- Gong Z Q, Zhao J H, Feng G L, et al, 2015. Dynamic-statistics combined forecast scheme based on the abrupt decadal change component of summer precipitation in East Asia[J]. Sci China Earth Sci, 58(3):404-419.
- Huang G, Qu X, Hu K M, 2011. The impact of the tropical Indian Ocean on South Asian high in boreal summer[J]. Adv Atmos Sci, 28(2):421-432.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollbn J, et al, 2002. NECP-DOE AMIP-II reanalysis(R-2)[J]. Bull Amer Meteor Soc, 83(11):1631-1644.
- Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al, 2001. The NECP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bull Amer Meteor Soc, 82(2):247-268.
- Krishnamurti T N, Mitra A K, Kumar T S V V, et al, 2006. Seasonal climate forecasts of the South Asian monsoon using multiple coupled models[J]. Tellus A, 58(4):487-507.
- Liu Y, Fan K, 2012. Prediction of spring precipitation in China using a downscaling approach[J]. Meteorol Atmos Phys, 118(1/2):79-93.
- Liu Y, Fan K, 2013. A new statistical downscaling model for autumn precipitation in China[J]. Int J Climatol, 33(6):1321-1336.
- 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.
- 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.
- Liu Y, Ren H L, 2017. Improving ENSO prediction in CFSv2 with an analogue-based correction method[J]. Int J Climatol, 37(15):5035-5046.
- Liu Y, Ren H L, Klingaman N P, et al, 2021. Improving long-lead seasonal forecasts of precipitation over Southern China based on

- statistical downscaling using BCC_CSM1.1m[J]. *Dyn Atmos Oceans*, 94:101222.
- Ren H L, Chou J F, 2007b. Strategy and methodology of dynamical analogue prediction[J]. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 50(10): 1589-1599.
- Ren H L, Wu Y J, Bao Q, et al, 2019. The China multi-model ensemble prediction system and its application to flood-season prediction in 2018[J]. *J Meteor Res*, 33(3): 540-552.
- 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.
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al, 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean[J]. *Nature*, 401(6751): 360-363.
- 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.
- Wang H J, Zhou G Q, Zhao Y, 2000. An effective method for correcting the seasonal-interannual prediction of summer climate anomaly[J]. *Adv Atmos Sci*, 17(2): 234-240.
- Webster P J, Moore A M, Loschnigg J P, et al, 1999. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-98[J]. *Nature*, 401(6751): 356-360.
- Wen M, Yang S, Vintzileos A, et al, 2012. Impacts of model resolutions and initial conditions on predictions of the Asian summer monsoon by the NCEP climate forecast system[J]. *Wea Forecasting*, 27(3): 629-646.
- Wilks D S, 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (2nd ed.) [M]. New York: Wiley: 627.
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al, 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon[J]. *Geophys Res Lett*, 34(2): L02708.
- Yin Z C, Wang H J, 2017. Statistical prediction of winter haze days in the North China Plain using the generalized additive model[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 56(9): 2411-2419.
- Yuan Y, Yang S, Zhang Z Q, 2012. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between the Eastern and Central Pacific El Niño: possible effects of Indian Ocean SST[J]. *J Climate*, 25(22): 7867-7883.
- Yuan Y, Zhou W, Chan J C L, et al, 2008. Impacts of the basin-wide Indian Ocean SSTA on the South China Sea summer monsoon onset[J]. *Int J Climatol*, 28(12): 1579-1587.
- Zhang D P, Huang Y Y, Sun B, et al, 2019. Verification and improvement of the ability of CFSv2 to predict the Antarctic oscillation in boreal spring[J]. *Adv Atmos Sci*, 36(3): 292-302.
- Zhang Q, Yang J H, Wang W, et al, 2021. Climatic warming and humidification in the arid region of Northwest China: multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation[J]. *J Meteor Res*, 35(1): 113-127.

(本文责编:王蕾 何晓欢)