

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.

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

刘颖^{1,2} 任宏利¹ 张培群¹ 贾小龙^{1,2} 刘向文¹ 孙林海¹

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

摘 要 2014 年夏季我国南方出现严重洪涝、北方大部干旱, 国内绝大多数预测模型在三月起报的汛期预测中均未能抓住位于南方地区的异常雨带, 导致预测准确率明显偏低。基于模式对东亚地区夏季海平面气压场的高预报技巧和青藏高原冬季积雪与南方地区夏季降水的高相关性, 本文提出一个针对我国夏季降水异常的组合统计降尺度预测新方法 (Hybrid Statistical Downscaling Prediction, 简称 HSDP), 该方法综合利用了气候模式输出的高可预报性环流信息和前期观测的高原积雪异常信号, 从而实现对我国南方夏季降水进行动力—统计相结合的改进预报。据此方法建立了一个基于国家气候中心气候预测模式的统计降尺度模型。对我国南方夏季降水进行跨季节预测的交叉检验结果显示, HSDP 方法对于南方地区多年平均空间距平相关系数从模式原始预报的 -0.006 提高到 0.24 , 且在大多数年份均有改进。基于 HSDP 方法于三月份制作的 2014 年夏季降水预测, 能够很好地抓住南涝北旱的基本形势和我国南方的降水大值区, 空间距平相关系数达到 0.43 。这表明, 该方法对于我国夏季降水预测具有较好业务应用前景。

关键词 气候预测 夏季降水预测 2014 南方洪涝 气候模式 统计降尺度

文章编号 1006-9895(2017)02-0313-08

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1605.16104

Improve the Prediction of Summer Precipitation in South China by a New Approach with the Tibetan Plateau Snow and the Applicable Experiment in 2014

LIU Ying^{1,2}, REN Hongli¹, ZHANG Peiqun¹, JIA Xiaolong^{1,2}, LIU Xiangwen¹, and SUN Linhai¹

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

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

Abstract Sever floods occurred in southern China and droughts were prevalent in northern China in the summer of 2014. Most predicted models in China missed the southern rain band in their flood season predictions conducted in March

收稿日期 2016-01-06; **网络预出版日期** 2016-06-22

作者简介 刘颖, 副研究员, 主要从事短期气候预测研究. E-mail: liuying@cma.gov.cn

通讯作者 任宏利, E-mail: renhl@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金 41405080, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2015CB453203, 中国气象局气候研究开放实验室基金 (2014 年)

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 41405080), National Basic Research Program of China (973 Program)(Grant 2015CB453203), Open Subject of Laboratory for Climate Study in CMA (2014)

2014, which led to relatively low prediction accuracy. Based on the higher prediction skill for summer sea level pressure of climate models and the significant relationship between the preceding winter Tibetan Plateau Snow and summer precipitation in the south, a new Hybrid Statistical Downscaling Prediction (abbreviated as HSDP) method for summer precipitation anomaly prediction in China was proposed in this paper. The method can integrate the information of the highly predictable circulation from climate models and the influential signal of Tibet Plateau Snow in the preceding winter to improve the dynamical-statistical combination prediction for summer precipitation in the south. Using this method, a statistical downscaling model was established based on the climate prediction model of National Climate Center of China. The cross validation of seasonal prediction for the summer precipitation in the south was performed and the results showed that the HSDP improved the multi-year average of anomaly correlation coefficient from -0.006 to 0.24 , and it had a higher predicting skill than the original climate model in most years. Using HSDP, the precipitation prediction for the summer of 2014 could well capture the basic situations, i.e. floods in southern China and droughts in northern China, and the positive precipitation anomaly in the south. The anomaly correlation coefficient could reach 0.43 . This result indicated that the HSDP has a great operational application prospect with regard to summer precipitation prediction in China.

Keywords Climate prediction, Summer precipitation, Floods occurred in southern China, Climate model, Statistical downscaling

1 引言

我国地处东亚季风区, 多因子的共同作用导致夏季降水年际变化复杂、预测难度较大。国家气候中心多年业务预报显示出一定技巧, 但年际起伏大、总体上预报能力较低(钱维宏和陆波, 2010)。例如 1998 年的世纪大洪水, 无论是动力模式还是统计模型均对其做出较成功预测(王会军, 2000; 2001), 很大程度上得益于对厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)现象发展演变的准确把握(黄荣辉等, 1998; 陶诗言等, 1998; Guo et al., 2002)。然而, 对于 2014 年发生在我国南方的洪涝和北方的干旱状况, 基于模式、统计和经验的绝大多数预测模型在三月份全国会商未能给出合理预测(如图 1)。这客观上反映出必须要在预报认知和方法论上进行深入探索。

目前针对我国夏季降水的影响因子和预测方法已有大量的研究成果。一方面, 在影响中国夏季降水的众多信号中, ENSO 一直是最为重要的预测参考, 然而自 2000 年以来其信号减弱是不争的事实, 尤其是 2014 年春夏季 ENSO 的变化不定可能是汛期降水预测不利的主要因素。相比之下, 青藏高原冬春积雪是我国夏季降水预测另一个重要前期因子, 它反映了高原的热状况, 其异常可以通过积雪本身的持续性、土壤湿度异常影响后期大气环流、亚洲季风及夏季降水等(郭其蕴和王继琴, 1986; 陈兴芳和宋文玲, 2000; 吴国雄等, 2004)。进一步研究表明, 高原冬春积雪与我国夏季降水尤

其是长江流域降水有显著的相关关系(韦志刚等, 1998; Wu and Qian, 2003)。虽然高原积雪信息已经在经验预测、统计模型预测以及业务预测中得到应用, 但由于资料时效性等原因高原积雪至今未能有效运用到汛期降水的统计降尺度客观定量实时预测中, 亟待加强以其为基础的预报方法研究。

另一方面, 现阶段气候模式对东亚季风区降水的模拟和预测效果仍不理想, 短时期内实现模式大幅改进难度较大。为此, 统计方法与动力模式相结合已成为一种有效改进预报的方法(Ren and Chou 2007; 郑志海等, 2009; Lang, 2011; Fan et al., 2012; Wang et al., 2015)。这其中, 基于模式的统计降尺度方法能够从模式预报效果较好的大尺度环流场中提取信息推算出降水, 较模式直接预测降水更加准确, 我国学者近年来在这方面取得了较多研究进展(贾小龙等, 2010; Sun and Chen, 2012; Liu and Fan, 2012a; 刘颖等, 2013)。为此, 本文将基于已有研究, 提出将高原积雪前期信号引入到气候模式统计降尺度预报框架中, 发展一个动力—统计相结合的降尺度季节预测新方法, 以期显著改善我国特别是南方地区夏季降水预测效果。

2 数据和方法

观测数据为中国气象局国家气候中心整编的全国 160 台站月平均降水资料; NCEP/NCAR 再分析资料中的海平面气压场(SLP), 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al., 1996); 青海、西藏 52 个基本气象台站逐日积雪深度观测数据, 该数据已经

过剔除缺测较多的站点，并处理成月平均资料。

模式数据为国家气候中心第二代季节预测模式系统 BCC-CSM1.1m 模式（以下简称 BCC 模式）中 1991~2014 年的 SLP 场、降水场的月平均资料，水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。该模式每月初进行对未来 1~13 个月的预测，包含 24 个集合样本，文中使用 24 个样本的集合平均数据。由于全国汛期会商预测结果在 3 月下旬发布，本文选取 3 月初起报的 6、7、8 月 SLP 以及降水资料。

BCC 模式已经能够合理模拟出全球基本气候态、年平均降水以及热带降水年循环模态等大尺度气候要素的基本特征（张莉等 2013; Wu et al., 2013），但由于模式自身不完善以及初始场等因素影响，BCC 模式针对中国夏季降水的直接预测结果还不够理想，对 2014 年夏季预测结果与实测相差较大（如图 1）。统计降尺度方法能够提取 BCC 模式最优预报信息、剔除系统性预报偏差，提高对我国夏季降水的预测能力。本文所要提出的方法主要是基于场信息耦合型技术的统计降尺度预测方法，其优点在于能够针对预测因子和预测量空间场的主要信息，通过提取两变量场之间的最优耦合变化型建立统计降尺度模型，详见（Liu and Fan, 2012b,

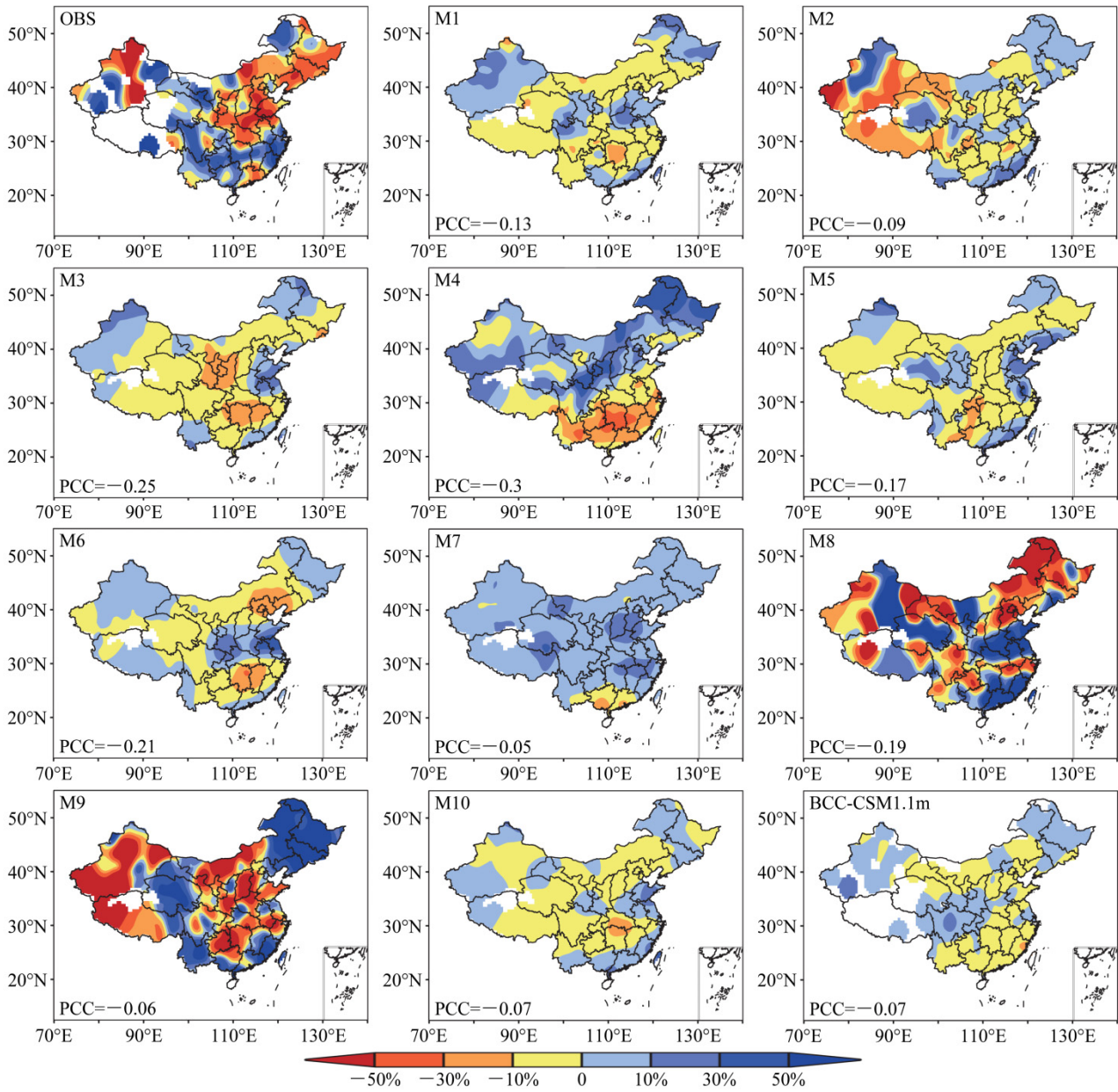


图 1 2014 夏季我国降水异常观测和 3 月份全国汛期会商各参加单位预测的距平百分率空间分布。M1~M10 表示会商单位的预测结果
Fig. 1 Spatial patterns of precipitation anomaly percentages for the summer of 2014 from observations and real-time predictions by various institutions in China

2013; Liu and Ren, 2015)。在此基础上, 我们提出将高原积雪前期信号引入到这一模式统计降尺度预报框架中, 同样按照场信息耦合型技术形成新的预报因子, 从而发展出一个组合统计降尺度预测新方法 (HSDP)。

3 统计降尺度新方法检验与预测结果

由于东亚地区天气气候条件复杂, 模式参数化方案估计降水的误差通常较大, 导致气候模式对于东亚大陆夏季降水预报技巧总体偏低。另一方面, 气候模式对于大尺度环流变量预测能力相对较好, 例如, SLP 场能够很好地反映大气质量随着东亚夏季风环流的变化特征, 可直接影响降水等气候要素变化。因此, 充分利用耦合气候模式输出的具有较高可预报性的大尺度环流变量对较低可预报性的夏季降水进行统计降尺度预测, 有望显著改善后者的预报性能。因此, 本文选取 BCC 模式的 SLP 变量 (区域为 $5^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 作为夏季降水统计降尺度模型中的预测因子。图 2a 为 1991~2014 年夏季 BCC 模式与 NCEP/NCAR 再分析资料 SLP 的相关系数空间分布场。可以看到, 我国大部分地区均为正相关, 但高相关区集中在 30°N 以南, 覆盖中国长江流域及以南地区。而且模式与再分析资料的 SLP 距平空间相关系数的多年平均为 0.17, 24 年中超过 83% 的年份相关系数为正。由此可见, BCC 模式对东亚特别是我国长江流域以南地区的夏季 SLP 具有较好的预测能力。因此, 本文选取东亚区域 SLP 场作为统计降尺度模型中预测因子。

我国长江流域及以南地区位于青藏高原下游, 高原大地形的热力和动力作用对该地区的气候异常具有重要而直接的作用, 前期冬季积雪与长江中下游夏季降水有着显著的正相关关系 (如图 2b)。值得注意的是, 春季高原积雪也是影响我国夏季降水异常的因素之一, 但春季积雪一般是冬季积雪的延续且积雪异常持续时间较短, 3 月以后积雪迅速减少 (郑益群等, 2000), 同时考虑到实际降水预测的应用实效性, 本文选取冬季高原积雪作为夏季降水预测因子。众多模式和统计模型均未准确预测出 2014 年我国夏季降水的空间分布, 尤其没有抓住长江及以南地区的降水大值区, 很可能是未能有效刻画高原积雪的影响作用。HSDP 方法将前期冬季高原积雪影响引入到模式统计降尺度预测中, 以

期改进预测效果。

首先, 基于 HSDP 模型对 1991~2013 年中国夏季降水进行了回报试验, 回报采取逐次去掉一年的交叉检验方法。图 3 为我国南方地区 (31°N 以南, 100°E 以东) 空间距平相关系数的逐年变化曲线。可以看到, BCC 模式的多年距平相关系数平均值为 -0.006 , 而本文发展的 HSDP 方法距平相关系数的平均值提高到 0.24, 其数值在大多数年份都大于 BCC 模式的值, 所有年份的距平相关系数都在零以上, 最高接近 0.4。为了进一步考察两个因子在 HSDP 模型中的各自贡献, 我们也分别单独利用东亚地区 BCC 模式 SLP 和前冬高原积雪信息进行统计降尺度预测。交叉检验结果显示, 南方地区夏季降水的多年平均距平相关系数分别达到 0.19 (图 3 中 SD-SLP) 和 0.21 (图 3 中 SD-SNOW), 均显著高于模式直接预报结果。这充分表明统计降尺度模型无论基于模式环流信息还是前期高原积雪信息均能有效提升预报性能, 而综合运用两因子共同作用的 HSDP 模型更能发挥二者长处, 进一步提高预报技巧。

我们也看到, 统计降尺度模型在 1997 年和 2006 年夏季的回报技巧低于 BCC 模式结果, 原因在于, 这两年前期冬季青藏高原积雪偏多, 而在接下来的实际夏季降水中长江流域均偏少, 不符合两者之间存在的正相关统计规律, 因此, 青藏高原的作用在降尺度模型中效果不明显, 导致空间距平相关不高。可以注意到, HSDP 统计降尺度模型对于南方地区夏季降水的距平相关系数表现比较平稳且略有上升, BCC 模式的距平相关系数预报技巧出现明显下降趋势, 且年际变化较大, 表现不稳定。

综合以上结果可以看到, 经过 1991~2013 年的交叉检验, 相对于 BCC 模式原始结果, HSDP 模型能够有效显著提高我国长江及以南地区预测技巧。由于青藏高原前期冬春积雪通过影响感热、垂直运动和环流场等, 影响夏季风的强度, 进而影响中国长江流域夏季降水 (张顺利和陶诗言, 2001), 因此, 高原前期积雪在 HSDP 模型中起到了至关重要的作用。

根据 1991~2013 年交叉检验结果可以看到, HSDP 模型确实较 BCC 模式结果具有较高的预测能力。那么, 该模型是否能够提高 2014 年夏季中国降水的预测结果? 图 4 给出 BCC 模式和 HSDP 模型对 2014 年夏季中国降水距平的预测结果。对比

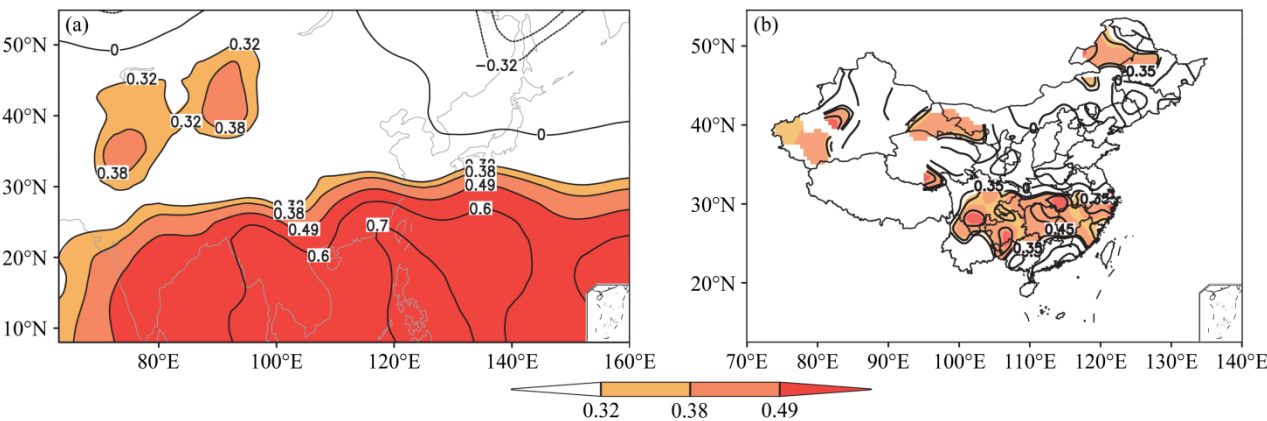


图 2 (a) 夏季 BCC 模式与 NCEP/NCAR 再分析资料 SLP 的相关; (b) 冬季高原积雪指数与夏季中国降水量相关。阴影区颜色由浅到深为正/负相关系数通过 90%、95%和 99%显著性检验的区域

Fig. 2 (a) The anomaly correlation coefficient of SLP between BCC-CSM1.1m model and NCEP/NCAR reanalysis data; (b) the correlation coefficient between wintertime Tibetan Plateau snow index and observed summer precipitation. The shaded areas (from light to dark) are for values significant at the 90%, 95%, and 99% confidence levels, respectively

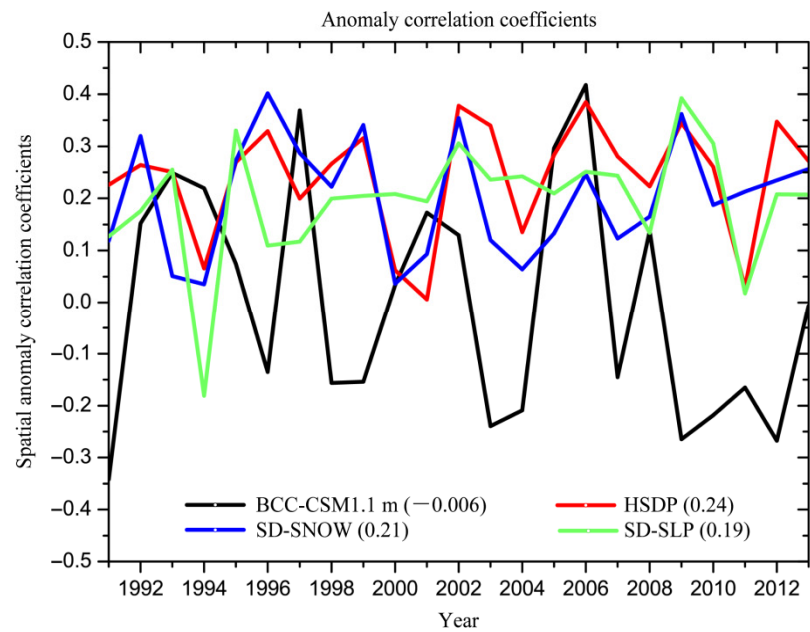


图 3 BCC 模式原始结果（黑色）、HSDP 结果（红色）、高原积雪预测结果（蓝色）和 SLP 降尺度预测结果（绿色）与观测之间的我国南方地区夏季降水空间距平相关系数

Fig. 3 The spatial anomaly correlation coefficients of summer precipitation observations and predictions of the BCC-CSM1.1m model(black), HSDP (Hybrid Statistical Downscaling Prediction, red), SD-SNOW (Statistical Downscaling only using Tibetan Plateau Snow, blue), and SD-SLP (Statistical Downscaling only using Sea Level Pressure, green). Multi-year average anomaly correlation coefficients of different model predictions and observations were given in corresponding brackets

前面图 1 的 OBS 结果，2014 年夏季实测降水大值区主要集中在长江以南的江南地区，北方地区普遍降水偏少。BCC 模式预测的正降水大值区出现在西南地区，长江以南地区均预测成了降水负值区（图 4a）。相比来讲，HSDP 模型回报出了发生在江南地

区的降水、黄淮地区的干旱（图 4b）。BCC 模式对 2014 年夏季中国降水的距平相关系数为 -0.05 ，经过 HSDP 之后提高到 0.35 ，而均方根误差则从 1.65 mm d^{-1} 下降到 1.51 mm d^{-1} 。同时，长江及以南的南方地区的 49 个站点的距平相关系数可以达到

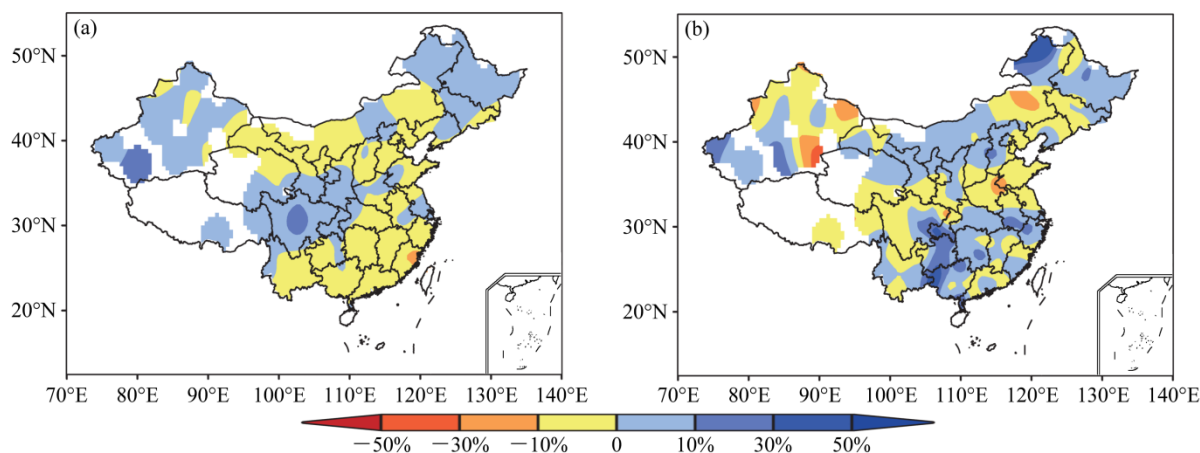


图4 预测的2014年夏季中国降水距平百分率空间分布型: (a) BCC模式结果; (b) HSDP结果

Fig. 4 Spatial patterns of precipitation anomaly percentages for the summer of 2014: (a) BCC-CSM1.1mm model; (b) HSDP

0.43。

如果单纯利用气候模式因子 SLP 建立预测模型,其回报的2014年降水大值区集中在华南地区、华北以及东北地区,长江流域及以南大部分地区为少雨区,与观测结果有一定差距(南方地区距平相关系数为0.12);而单纯利用青藏高原积雪建立预测模型,其2014年夏季回报结果为:长江及以南地区、东北北部多雨,华南、江淮、华北以及东北大部分地区为少雨区,与观测结果更加接近(南方地区距平相关系数为0.4)(图略)。2013/2014年冬季青藏高原积雪面积总体为正距平,累积积雪深度在大部分地区也为正距平。对于2014年夏季中国降水跨季节预测有效利用了前期青藏高原积雪的信号与长江及江南地区降水的密切关系,调整了前期预测方案进而得到与观测事实更加接近的预测结果。值得注意的是,通常 ENSO 是影响中国夏季降水的重要年际信号,但在其信号不显著的年份(如2013~2014年冬春季),通过考虑与 ENSO 相对独立的高原积雪信号(陶亦为等,2011),仍有望取得良好预测效果。

4 结语

青藏高原冬春积雪是影响中国夏季降水的重要外强迫因子之一,通过影响感热、大气环流以及东亚夏季风,进而影响到中国夏季降水。大部分模型对2014年夏季降水预测失效,尤其没有抓住南方地区的降水大值区,因此,本文提出了将前期青藏高原积雪引入到统计降尺度模型当中,发展了一个针对我国夏季降水异常的组合统计降尺度预报

新方法(HSDP)。该HSDP模型充分利用BCC模式对SLP变量在我国南方地区的高预报技巧以及青藏高原冬季积雪与我国南方降水之间的显著关系,对夏季降水进行了1991~2013年交叉检验,并对2014年夏季降水进行了预测试验。交叉检验结果显示,南方地区距平相关系数的平均值提高到0.24,相关系数值在大多数年份均大于BCC,最高可达0.4。2014年预测结果表明,该模型能够较好地将长江以南的降水大值区很好地预测出来,南方区域距平相关系数达到0.43,可能原因是充分利用了青藏高原前期冬季积雪与长江及以南的夏季降水具有显著的正相关关系,而观测到的2013/2014年冬季的青藏高原积雪面积与深度都是正距平值。

值得关注的是,2008/2009年冬季高原积雪显著偏少,HSDP模型较为准确的回报出了2009年夏季长江以南地区降水负值区以及华北、黄淮地区降水正值区,距平相关系数超过0.3,而BCC模式直接预报效果不佳(图略)。可能是由于模式对青藏高原热动力作用的模拟不够理想,因而未能将高原冬季积雪对夏季降水的影响有效表达出来,这需要进一步加以考察归因。当然,文中HSDP方法是交叉检验的结果,模型可靠性还需要更多实践检验。值得注意的是,由于我国南方和北方夏季降水异常分布的复杂性和非一致性(Wu et al., 2009, 2013),本文方法只针对有限个例中江南地区夏季降水预测效果改进明显,结论仍存在一定局限性。由于台站观测的积雪面积和深度数据一般要滞后3个月以上才能业务使用,因此如何使用时效性更好的卫星

遥感替代资料将是关系到本文 HSDP 方法能否在春季会商及时做出预测的关键。另外, 其他显著影响因子及高效预测方法, 如: 影响我国南方降水异常的影响因素——欧亚大陆积雪 (许立言和武炳义, 2012a, 2012b), 以及年际增量预测方法 (范可等, 2007; 2008) 的使用, 也需要在下一步工作中重点加以考虑。

致谢 感谢王会军院士和李维京研究员在本文研究过程中给予的指导和帮助。

参考文献 (Reference)

- 陈兴芳, 宋文玲. 2000. 冬季高原积雪和欧亚积雪对我国夏季旱涝不同影响关系的环流特征分析 [J]. 大气科学, 24 (5): 585–592. Chen X F, Song W L. 2000. Circulation analysis of different influence of snow cover over the Tibetan Plateau and Eurasia in winter on summertime droughts and floods of China [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 24 (5): 585–592, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.05.02.
- 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. 2008. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of Yangtze River valley summer rainfall [J]. Chinese Sci. Bull., 54 (4): 602–609, doi:10.1007/s11434-008-0083-1.
- 范可, 林美静, 高煜中. 2008. 用年际增量的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. 2009. Forecasting the summer rainfall in North China using the year-to-year increment approach [J]. Sci. China Ser. D: Earth Sci., 52 (4): 532–539, 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.
- 郭其蕴, 王继琴. 1986. 青藏高原的积雪及其对东亚季风的影响 [J]. 高原气象, 5 (2): 116–124. Guo Q Y, Wang J Q. 1986. The snow cover on Tibet Plateau and its effect on the monsoon over East Asia [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 5 (2): 116–124.
- Guo Y F, Zhao Y, Wang J. 2002. Numerical simulation of the relationships between the 1998 Yangtze River valley floods and SST anomalies [J]. Adv. Atmos. Sci., 19 (3): 391–404, doi:10.1007/s00376-002-0074-0.
- 黄荣辉, 徐子红, 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. (in Chinese), 3 (4): 300–313, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1998.04.02.
- 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 X L, Chen L J, Li W J, et al. 2010. Statistical downscaling based on BP-CCA: Predictability and application to the winter temperature and precipitation in China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68 (3): 398–410, doi:10.11676/qxxb2010.039.
- 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, 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.
- Liu Y, Fan K. 2012a. Improve the prediction of summer precipitation in the southeastern China by a hybrid statistical downscaling model [J]. Meteor. Atmos. Phys., 117 (3–4): 121–134, doi:10.1007/s00703-012-0201-0.
- Liu Ying, Fan Ke. 2012b. 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 Ying, Fan Ke. 2013. A new statistical downscaling model for autumn precipitation in China [J]. Int. J. Climatol., 33 (6): 1321–1336, doi:10.1002/joc.3514.
- 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): 1287–1296. Liu Y, Fan K, Zhang Y. 2013. A statistical downscaling model for summer rainfall over China stations based on the climate forecast system [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 37 (6): 1287–1296, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12143.
- 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.
- 钱维宏, 陆波. 2010. 我国汛期季度降水预报得分和预报技巧 [J]. 气象, 36 (10): 1–7. Qian W H, Lu B. 2010. Score and skill of seasonal forecasts of summer precipitation in China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36 (10): 1–7.
- Ren H L, Chou J F. 2007. Strategy and methodology of dynamical analogue prediction [J]. Sci. Chin. Ser. D: Earth Sci., 50 (10): 1589–1599, doi:10.1007/s11430-007-0109-6.
- Sun J Q, Chen H P. 2012. A statistical downscaling scheme to improve global precipitation forecasting [J]. Meteor. Atmos. Phys., 117 (3–4): 87–102, doi:10.1007/s00703-012-0195-7.
- 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 1998. 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件 [J]. 气候与环境研究, 3 (4): 290–299. Tao S Y, Zhang Q Y, Zhang S L. 1998. The great floods in the Changjiang River valley in 1998 [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 3 (4): 290–299, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1998.04.01.
- 陶亦为, 孙照渤, 李维京, 等. 2011. ENSO 与青藏高原积雪的关系及其对我国夏季降水异常的影响 [J]. 气象, 37 (8): 919–928. Tao Y W, Sun Z B, Li W J, et al. 2011. Relationships between ENSO and Qinghai-Tibetan Plateau snow depth and their influences on summer rainfall anomalies in China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 37 (8): 919–928.
- 王会军. 2000. 关于我国几个大水年大气环流特征的几点思考 [J]. 应用气象学报, 11 (S): 79–86. Wang H J. 2000. Characteristics of the atmospheric general circulation in three flood years in China [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 11 (S): 79–86, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2000.z1.010.
- 王会军. 2001. 1998 年夏季全球大气环流异常的预测研究 [J]. 地球物理学报, 44 (6): 729–735. Wang H J. 2001. A study on prediction of the anomalous atmospheric general circulation in 1998 [J]. Chinese J.

- Geophys. (in Chinese), 44 (6): 729–735, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2001.06.001.
- 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.
- 韦志刚, 罗四维, 董文杰, 等. 1998. 青藏高原积雪资料分析及其与我国夏季降水的关系 [J]. 应用气象学报, 9 (S): 40–47. Wei Z G, Luo S W, Dong W J, et al. 1998. Snow cover data on Qinghai–Xizang Plateau and its correlation with summer rainfall in China [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 9 (S): 40–47.
- Wu B Y, Zhang R H, Wang B, et al. 2009. On the association between spring Arctic sea ice concentration and Chinese summer rainfall [J]. Geophys. Res. Lett., 36 (9): L09501, doi:10.1029/2009GL037299.
- Wu B Y, Zhang R H, D'Arrigo R, et al. 2013. On the relationship between winter sea ice and summer atmospheric circulation over Eurasia [J]. J. Climate, 26 (15): 5523–5536, doi:10.1175/JCLI-D-12-00524.1.
- 吴国雄, 毛江玉, 段安民, 等. 2004. 青藏高原影响亚洲夏季气候研究的最新进展 [J]. 气象学报, 62 (5): 528–540. Wu G X, Mao J Y, Duan A M, et al. 2004. Recent progress in the study on the impacts of Tibetan Plateau on Asian summer climate [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 62 (5): 528–540, doi:10.11676/qxxb2004.054.
- Wu T W, Qian Z A. 2003. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall: An observational investigation [J]. J. Climate, 16 (12): 2038–2051, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<2038:TRBTTW>2.0.CO;2.
- Wu T W, Li W P, Ji J J, et al. 2013. Global carbon budgets simulated by the Beijing climate center climate system model for the last century [J]. J. Geophys. Res., 118 (10): 4326–4347, doi:10.1002/jgrd.50320.
- 许立言, 武炳义. 2012a. 欧亚大陆积雪与 2010 年中国春末夏初降水的关系 [J]. 高原气象, 31 (3): 706–714. Xu L Y, Wu B Y. 2012a. Relationship between Eurasian snow cover and late-spring and early-summer rainfall in China in 2010 [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 31 (3): 706–714.
- 许立言, 武炳义. 2012b. 欧亚大陆积雪两种物理效应对 2010 年春末夏初华南降水的影响 [J]. 大气科学, 36 (2): 271–282. Xu L Y, Wu B Y. 2012b. Two physical effects of Eurasian snow cover on the late-spring and early-summer rainfall in South China of 2010 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 36 (2): 271–282, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11054.
- 张莉, 吴统文, 辛晓歌, 等. 2013. BCC_CSM 模式对热带降水年循环模态的模拟 [J]. 大气科学, 37 (5): 994–1012. Zhang L, Wu T W, Xin X G, et al. 2013. The annual modes of tropical precipitation simulated by the Beijing climate center climate system model (BCC_CSM) [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 37 (5): 994–1012, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12126.
- 张顺利, 陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究 [J]. 大气科学, 25 (3): 372–390. Zhang S L, Tao S Y. 2001. Influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 25 (3): 372–390, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.07.
- 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 2000. 青藏高原积雪对中国夏季风气候的影响 [J]. 大气科学, 24 (6): 761–774. Zheng Y Q, Qian Y F, Miao M Q, et al. 2000. Effect of the Tibetan Plateau snow cover on China summer monsoon climate [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 24 (6): 761–774, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.06.04.
- 郑志海, 任宏利, 黄建平. 2009. 基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值实验 [J]. 物理学报, 58 (10): 7359–7367. Zheng Z H, Ren H L, Huang J P. 2009. Analogue correction of errors based on seasonal climatic predictable components and numerical experiments [J]. Acta Phys. Sinica (in Chinese), 58 (10): 7359–7367, doi:10.3321/j.issn:1000-3290.2009.10.114.