

•暴雨山洪水沙灾害预报预警•

DOI:10.15961/j.jsuese.202200745



BCC_S2S预报长江上中游流域夏季降水精度评估

李恒¹, 朱坚^{1,2*}

(1.河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2.中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室, 江苏南京 210098)

摘要: 为评估中国国家气候中心(Beijing Climate Center, BCC)季节-次季节(sub-seasonal to seasonal, S2S)预报模式预测系统(简称为BCC_S2S模式)在长江上中游流域对日降水和夏季极端降水事件的预报性能,基于BCC_S2S模式在2005—2020年每周两次滚动预报未来60 d降水回报的格点数据,把格点预报降水双线性插值到站点,将其与站点观测降水进行对比分析。通过相关系数(correlation, CC)、均方根误差(root mean square error, RMSE)和平均误差(mean error, ME)3个指标,评估模式预报日降水的性能;对于极端降水事件,依照百分位法定义极端降水,基于Heidke技巧评分(Heidke's skill score, HSS)指标评估单站极端降水,并利用层次聚类方法划分区域性极端降水类型,进一步评估预报性能。结果表明:BCC_S2S模式在各季节日降水的预报性能随预见期的增加而下降;在预见期大于5~10 d后,进入低预报技巧阶段。将长江上中游划分为6个子区域进一步分析,各区域平均的相关系数仍然是在预见期较短时较高;平均误差表明预报模式在流域中东部区域整体呈现出正偏差,金沙江流域则是负偏差;均方根误差同样在流域中东部偏大。通过分析3个指标的箱型分布图,表明在长江上中游的大多数区域,模式预报6月份的降水精度最佳,误差范围相对较小。对极端降水事件,单站极端降水事件的HSS评分随预见期增加而下降;对大多数区域,模式的预报技巧在月降水总量偏多、极端降水频发的月份较高。针对4类区域性极端降水,模式超前0~10 d预报的多雨带空间分布与观测较为一致,降水量值偏小;超前10 d以上预报时,效果较差。总体上,模式对长江上中游地区的日降水和极端降水事件的预报性能随预见期的增加而下降,6月预报精度相对较好,这可能与6月主要受大范围水汽输送或锋面这样较容易预报的天气系统有关。

关键词: 长江上中游; 季节次季节; 极端降水; 预见期; 预报精度

中图分类号: P435⁺²

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2022)06-0021-11

Accuracy Evaluation of BCC_S2S Summer Precipitation Forecast in the Upper and Middle Reaches of the Yangtze River

LI Heng¹, ZHU Jian^{1,2*}

(1.College of Hydrology and Water Resources, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2.CMA-HHU Joint Lab. for HydroMeteorological Studies, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to evaluate the forecast of the sub-seasonal to seasonal (S2S) forecasting system of the Beijing Climate Center (BCC), called BCC_S2S model for short, for daily precipitation and summer extreme precipitation events in the upper and middle reaches of the Yangtze River (UMRYR), based on the products of the BCC_S2S model, which reforecasts 60-day precipitation twice a week from 2005 to 2020, bilinear interpolation is implemented to downscale grid point data to station data. Then, various comparison is applied to evaluate the model performance. Three indexes are used to evaluate the daily precipitation forecasting, as correlation coefficient (CC), root mean square error (RMSE) and mean error (ME). For extreme precipitation events defined by percentile method, HSS index is used to evaluate individual station precipitation extremes. Hierarchical clustering method is used to classify regional precipitation extremes, and different precipitation extreme pattern is evaluated

收稿日期:2022-07-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1510703)

作者简介:李恒(1995—),男,硕士生。研究方向:应用水文气象。E-mail: henryhohai327@163.com

*通信作者:朱坚,副教授, E-mail: levoca@hhu.edu.cn

网络出版时间:2022-11-10 10:35:00

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.tb.20221108.1609.002.html>

<http://jsuese.ijournals.cn> <http://jsuese.scu.edu.cn>

by comparing to the observations. The results show that, for the daily precipitation, the BCC_S2S model performance decreases with the increase of the leading period in each season, and the forecast skill stays low when the leading period is longer than 5~10 days. Forecast skill is evaluated detailly in six sub-regions. The CC indexes show similar trend as decreasing with the leading period increasing. And the ME indexes indicate that the model may over estimate precipitation in the middle-east parts of UMRYP, while under estimate that in Jinsha River Basin. The RMSE indexes are high in the middle-east parts of UMRYP. The box plots show that in most parts of UMRYP, the BCC_S2S model performs more stable in June due to the small range of errors. For the precipitation extremes, the HSS decreases with the leading period increasing in forecasting station precipitation extremes. In most parts of the UMRYP, the model performs better in high total-precipitation months. In the perspective of spatial distribution, the model can well represent the strong rainfall pattern for the four regional precipitation extremes in short leading period (0~10 d), but not in long leading period over 10 days. Generally, the BCC_S2S model performance for the daily precipitation and precipitation extremes in the UMRYP shows decreasing trend with the leading period increasing. And it performs better in June, which may be related with the better model performance in representing large scale synoptical systems such as the water vapor transportation or the front.

Key words: the upper and middle reaches of the Yangtze River; sub-seasonal to seasonal (S2S); precipitation extremes; leading period; forecast accuracy

季节-次季节预报(sub-seasonal to seasonal, S2S)介于季节预测和天气预报之间,相较于季节预测,外部强迫因子不足以影响其变率,相较于天气预报尺度,初始值的记忆性已经消散,是目前气象预报业务的难点^[1]。由于相关的研究较少,也称为“预测沙漠”^[2-3]。次季节-季节时间尺度的预报是连接季节预测与天气预报的关键接口,也是政府部门应急减灾从被动应灾到主动减灾的关键预测时段^[4]。为填补这一“预测沙漠”,世界气候研究计划(World Climate Research Program, WCRP)和世界天气研究计划(World Weather Research Programme, WWRP)联合制定了S2S计划,目的是完善14~60 d预测时间尺度的关键接口,填补季节预测和天气预报之间的缝隙。

近年来,研究人员利用各国发布的S2S模式历史回报产品开展了包括热浪^[5]、降水^[6]、季风^[7-9]、热带大气季节内振荡(madden-julian oscillation, MJO)及遥相关特征^[10-12]、土壤湿度^[13]、极端事件^[1]、台风^[14]等方面的预测技巧分析工作。中国国家气候中心(Beijing Climate Center, BCC)参加S2S预测研究计划模式版本为BCC_CSM 1.1 m^[15],并基于此模式研发了第2代短期气候模式系统BCC_CSM 2.0^[16-18]。在本文中,将BCC_CSM 2.0模式中&S2S的预测系统称为BCC_S2S模式预测系统,简称BCC_S2S模式。吴统文^[19]和吴捷^[20]等评估了BCC_CSM 2.0模式的预报系统,结果表明:该模式在全球范围内,预报环流、气温和降水的性能较前一代有所提升,但在预报中国东部地区的夏季降水时预测技巧不高。郭渠等^[21]对BCC_S2S模式在西南地区的预测效果进行评估,结果表明:在夏季,随着预见期的增加,BCC_S2S模式的预报性能不断下降;在不同区域、不同年份,模式预报性能亦有差异。

中国长江上中游地区地势落差大,水能资源占全国一半以上,针对该区域的模式降水评估对水能

利用具有重要的意义。评估BCC_S2S模式的预测性能,可以更有效地利用模式预报信息^[22-23],从而充分利用S2S预测降水时所延长的预报时效,提升政府部门防备洪涝灾害的应急管理水平^[24]。

截至目前,对BCC_S2S模式的预测性能检验评估和应用,已开展部分工作^[25],主要聚焦于全国的月或季节降水总量的研究。然而,针对逐日降水及更强的极端降水事件的预报评估的研究较少。因此,拟对BCC_S2S模式提前0~30 d预报长江上中游流域夏季降水的预报精度进行评估,并从单站极端降水事件和区域极端降水事件两方面,综合评价模式对极端降水的预报表现,为提升模式预报精度,提高极端降水的预测技巧提供参考。

1 资料和方法

1.1 研究区域

选择长江上中游流域(upper and middle reaches of the Yangtze River, UMRYP)为研究区域(图1),主要位于中国中西部。长江上中游流域横跨中国陆地地势的3级阶梯,从西往东地势下降,落差较大,包括青藏高原、横断山脉、云贵高原等地形单元^[26]。长江上中游夏季降水类型复杂交错,从环流背景来看,受南亚高压、西太副高、中高纬度环流、热带季风输送的暖湿气流、海温等外部强迫因子影响^[27];从大范围或局地的天气系统来看,锋面、西南涡、局地强对流、地形抬升对流等,均能引发强降水甚至暴雨^[27-28],继而引发洪涝、泥石流、滑坡等自然灾害。

1.2 研究资料

观测降水数据均下载自国家气象科学数据中心(<http://www.nmic.cn/>),根据资料连续性、统一性和时间一致性等标准,选取长江上中游范围内140个观测站点的逐日降水资料。以自然流域为划分依据^[26],把长江上中游划分6个子区域。雨量站点分布及子区域

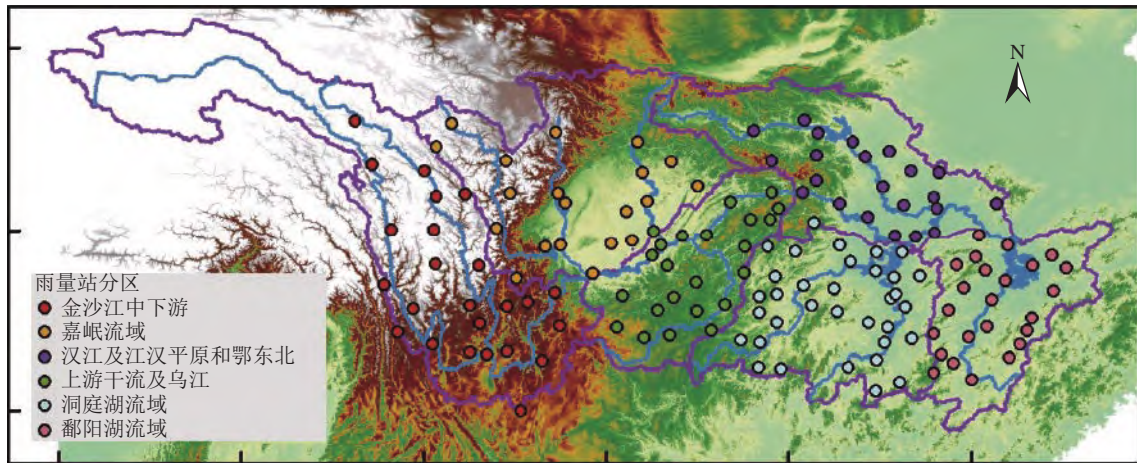


图1 长江上中游流域雨量站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in UMRYSR

划分如图1所示,除金沙江上游无测站外,有站点区域雨量站空间分布均匀,雨量站密度在 $0.78 \times 10^4 \sim 1.61 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{站}$ 之间,雨量站海拔范围在 $191.31 \text{ m} \sim 2452.36 \text{ m}$ 。

本文评估的预报降水数据来自BCC_S2S模式,该模式由大气分量模式BCC_AGCM2.2、陆面分量模式BCC_AVIM1.0、海洋分量模式MOM5、海冰分量模式通过耦合器CPL5.0直接动态耦合而成。进行气候预测时,选用美国国家环境预测中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)每日4次的高空再分析资料的风场、温度场和地面气压场作为大气初值,以NCEP全球海洋同化系统的海洋再分析资料作为海洋初值,构建初始驱动场。采用滞后平均预报(lagged average forecast, LAF)和奇异向量扰动(singular vector, SV)进行集合预报,共24个样本集合^[25],格点分辨率为 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 。关于BCC_S2S模式的更多技术细节参见文献[18]。

该模式回报试验数据为每周三、周六滚动预报未来60 d的环流要素和常规气象要素^[15],本文依据BCC_S2S在 $24^\circ \text{N} \sim 36^\circ \text{N}$, $96^\circ \text{E} \sim 120^\circ \text{E}$ 范围内的2005—2020年共16 a的日降水格点资料,采用双线性插值法将BCC_S2S格点降水数据降尺度到站点。

1.3 研究方法和定义

选择相关系数(correlation coefficient, CC)、均方根误差(root mean squared error, RMSE)和平均误差(mean error, ME)3个指标,定量评估BCC_S2S提前0~30 d预报日降水量的精度。评估指标的计算公式分别为:

$$CC = \frac{(s_i - \bar{s})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i) \quad (3)$$

式中, n 为样本总数; S_i 为BCC_S2S对样本 i 的预报降水; O_i 为样本 i 的站点观测降水; \bar{s} 为BCC_S2S预报降水平均值; \bar{o} 为站点观测降水平均值。

本文使用百分位法^[29]定义极端降水事件:将每年的日降水量按照升序排列,取95百分位数的降水量的多年平均值作为阈值。当某一单站某日降水量大于等于该值时,则认为发生了一次极端降水事件。在评估模式预报技巧时,对实测降水和模式预报降水均采用相同的阈值。

为评价BCC_S2S模式对长江上中游极端降水的预报性能,对于单站极端降水事件,采用Heidke技巧评分(Heidke's skill score, HSS)进行评估,该指标同时考虑了命中率和误报率,能够更好地反映模式定性预测极端降水事件的能力,该评分越高,说明模式对极端降水的预报技巧越好^[30-31]。该评分的计算公式如下:

$$HSS = \frac{2(N_{11} + N_{00})(N_{10} + N_{01})}{(N_{11} + N_{01})(N_{01} + N_{00}) + (N_{11} + N_{10})(N_{10} + N_{00})} \quad (4)$$

式中, N_{11} 为观测降水与预报降水均大于阈值的天数或站数记, N_{10} 为观测降水小于阈值且预报降水大于阈值的天数或站数记, N_{01} 为观测降水大于阈值且预报降水小于阈值的天数或站数记, N_{00} 为观测降水与预报降水均小于阈值的天数或站数记。

对于区域性极端降水事件的定义为:当日降水

量大于等于极端降水阈值的站点数占该区域总站点数的比率超过10%时,即认为发生了一次区域性极端降水事件^[32]。

聚类分析作为一种统计分类方法,已被应用于极端降水的研究^[33]。本文结合区域极端降水评估的需求,采用层次聚类^[34]的方法:1)先依照规定的范数计算出类与类之间的距离,把不同样本站点进行分组;2)依据聚类水平矩阵,把指标空间中最接近的两组逐步合并为一个新类。使用相关系数作为测度链接层次聚类:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}} \quad (5)$$

式中: r_{ij} 为相关系数测度, i 和 j 表示不同的时间点; k 表示空间点; m 表示空间点的总数; x_{ik} 和 x_{jk} 为站点降水观测值; \bar{x}_i 和 \bar{x}_j 表示所有站点在 i 和 j 时刻的空间平均值。利用平均轮廓系数图法进行验证,聚类方案是恰当的。将满足定义的2005—2020年夏季的157次极端降水事件分为4类,并依据每种类型的极端降水,对不同的预见期范围(0~10 d、11~20 d、21~30 d)内BCC_S2S预报的降水场进行合成分析。

2 结果与分析

2.1 日降水预报精度评估

按照以下步骤评估模式预报精度:以评估模式各季节的预报性能为例,先用双线性插值法,将模式预报的降水数据插值到各站点,再按照以下步骤操作:1)依照被预报日划分为4个季节,找出各年份中所有包含在该季节内的被预报日;2)计算该季节内被预报日的模式预报降水量和观测站点降水量的CC、RMSE和ME;3)若做区域的预报精度评估,把各站的统计结果取算术平均。

2.1.1 全流域各季节日降水预报精度

图2为BCC_S2S时长江上中游流域各季节日降水量预报精度(灰色虚线代表相关系数通过90%信度检验线)。如图2(a)所示:各季节模式预报降水与观测降水的相关系数在预报当日最高,随着预见期的增加而降低;至第10 d后,进入低相关系数阶段。模式预报的相关系数在各季节间相差不大,夏季的相关系数最低。据图2(b)可知:各季节均方根误差随预见期的增加而稍有增加,季节间差异较大;夏季均方根误差最大,达到15 mm/d左右。图2(c)给出了平均误差,模式预报夏秋季节降水整体偏多,而冬季偏少。

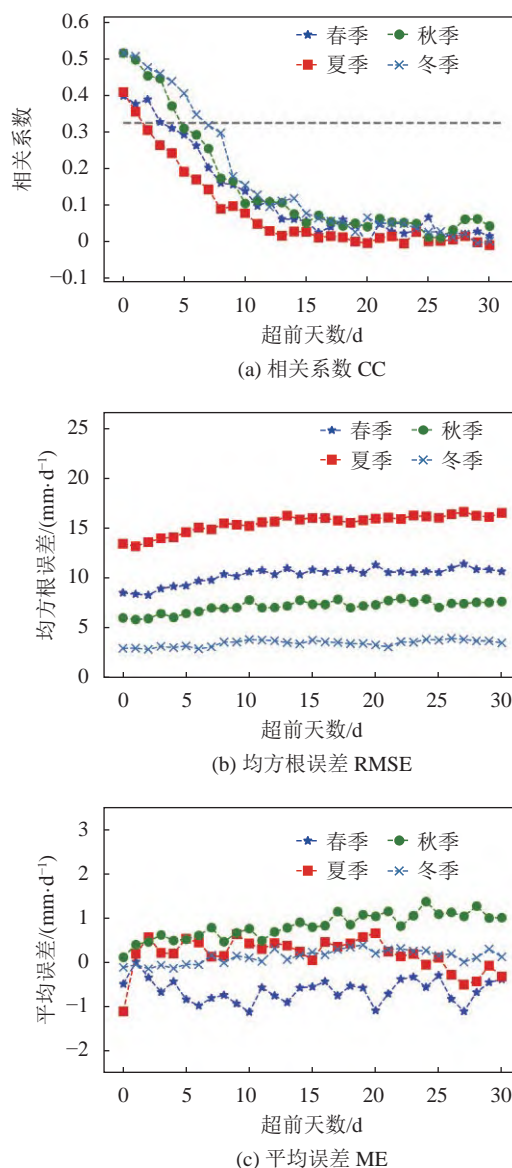


图 2 BCC_S2S 对长江上中游流域各季节日降水量预报精度
Fig. 2 BCC_S2S forecasting accuracy of daily precipitation in the UMRYSR in four seasons

2.1.2 子区域夏季日降水预报精度

由于夏季是长江上中游的主要降水季节,本文后续针对夏季降水进行细致分析。按照自然流域边界划分子区域,并分别计算相关系数、均方根误差和平均误差,如图3所示(灰色虚线代表相关系数通过90%信度检验线)。由图3可知,各子区域的统计值呈现趋势与全流域平均情况一致。相关系数在汉江及江汉平原最高,在金沙江流域最低(图3(a))。均方根误差空间分布特征明显,随预见期增加稍有增加;在金沙江流域最小,约10 mm/d;在其他区域较大,基本位于12~17 mm/d间(图3(b))。平均误差空间分布特征明显,金沙江流域为负偏差,说明模式对该地区降水预报值整体偏小,在其他流域则整体偏大(图3(c))。

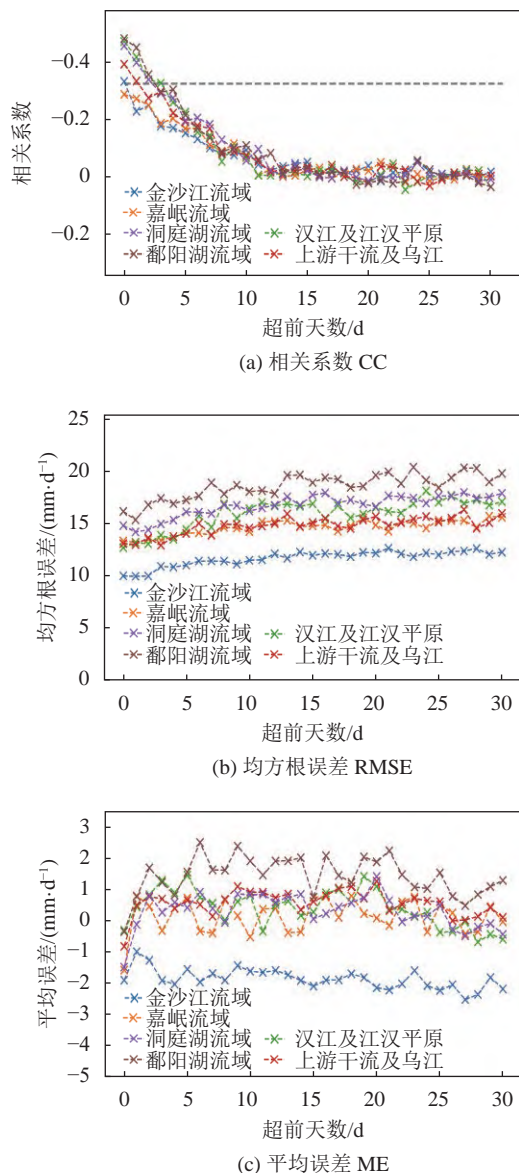


图3 BCC_S2S对长江上中游流域各子区域夏季日降水量预报精度

Fig. 3 BCC_S2S forecast accuracy of summer daily precipitation for each sub-region in UMYR

2.1.3 子区域夏季各月份日降水预报精度

为讨论本节中长江上中游各子流域夏季各月的日降水预报精度及第2.2节中的极端降水预报精度,图4给出了各子区域6—8月的月均降水量和月平均极端降水事件频数的区域平均值柱状图。由图4可知:长江上中游偏西偏北的3个子区域(金沙江流域、嘉岷流域、汉江及江汉平原)7月降水最多且易发生极端降水;偏东偏南的3个子区域(上游干流及乌江、洞庭湖流域、鄱阳湖流域)6月降水偏多且易发生极端降水。

同前面评估季节日降水预报精度一样,计算了月平均降水预报的相关系数、均方根误差、平均误差

3个指标。对于相关系数,变化趋势与图3(a)基本一致:在预报当日最高,随着预见期的增加而降低;至第10 d后,进入低相关系数阶段。由于各子区域各月的相关系数的中值、离散程度差别不大,因此箱线图略。

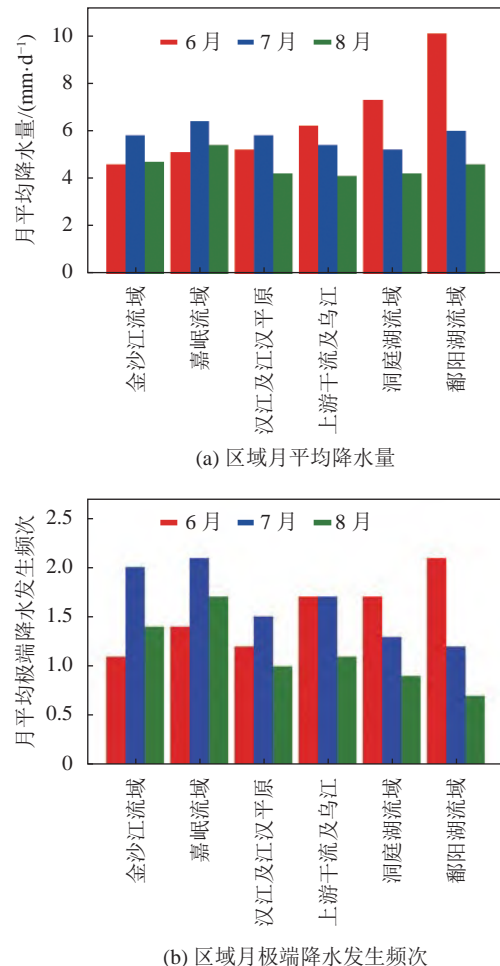


图4 各子区域地面观测站点夏季各月月平均降水量、极端降水发生次数的区域平均值

Fig. 4 Regional mean of monthly mean precipitation and occurrence frequency of precipitation extremes in each sub-region in summer

图5为日降水量预报的均方根误差的统计结果。在夏季各月份中,6月的中位值较小,且离散程度相对较小,表明6月预报误差较小且预报性能相对稳定。对比各子区域,可以看到嘉陵江、汉江及江汉平原流域预报性能较好。

图6为日降水量预报的平均误差。大部分情况下,平均误差在长江上中游的中东部子区域呈正偏差,西部子区域呈负偏差。整体上,6月各区域的平均误差更接近0且离散程度较小;对比各子区域,可以看到嘉陵江流域误差更接近0且离散程度较小。

对比图3的统计结果,模式平均误差在6月洞庭

湖流域(图6(m))的平均偏差呈负偏差,如图4(a)所示,在6—8月中,该区域在6月份月降水最高,极端降水频发,此时模式更易低估日降水量值。由于受到

较多的大异常值的影响,模式预报的均方根误差在鄱阳湖流域出现了中值低(图5(p)~(r))、均值高(图3(b))的现象。

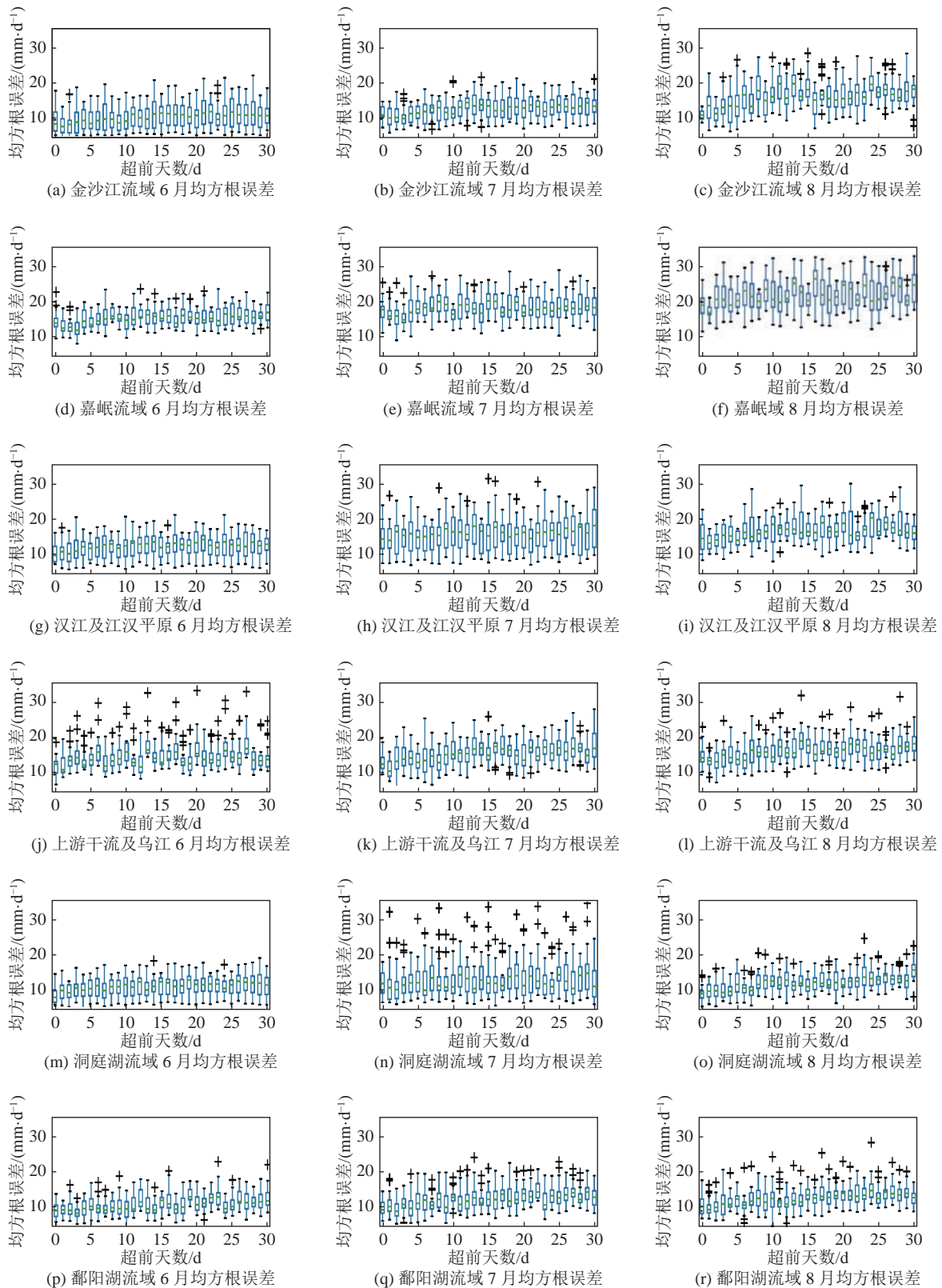


图 5 BCC_S2S 对各自区域6—8月日降水量预报均方根误差箱线图

Fig. 5 Boxplots of RMSE of daily precipitation forecast from June to August of BCC_S2S model in each sub-region

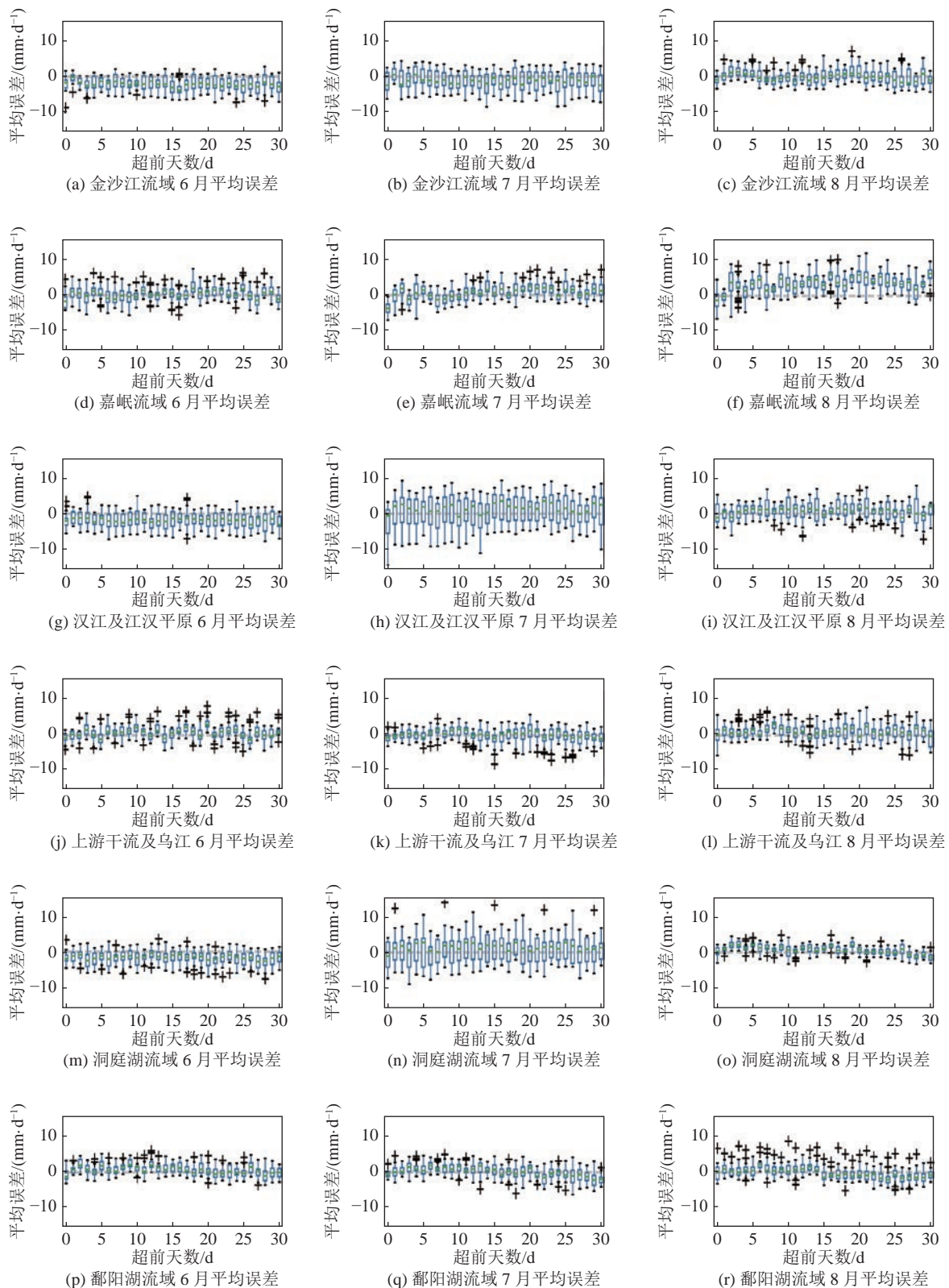


图6 BCC_S2S对各自区域6—8月日降水量预报平均误差箱线图

Fig. 6 Boxplots of ME of daily precipitation forecast from June to August of BCC_S2S model in each sub-region

2.2 夏季极端降水预报评估

2.2.1 夏季单站极端降水预报技巧

利用百分位法定义单站极端降水, 计算各站点

在夏季的HSS评分, 把各站的统计结果按子区域取算术平均, 结果如图7所示。可以看出: 各子区域极端降水的预报技巧在预见期为0时最高, 随预见期

增加而降低;在预见期到达5~10 d后,进入低预报技巧阶段,较好的预见期偏短;在汉江及江汉平原最高(HSS评分在0.15至0.64之间),在金沙江流域最低。

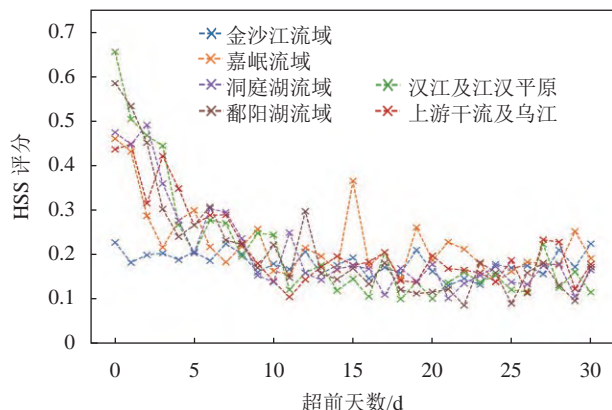


图 7 BCC_S2S 对长江上中游流域夏季单站极端降水预报技巧的各子区域平均HSS评分

Fig. 7 BCC_S2S forecasting skills (HSS index) of summer precipitation extremes in each sub-region of the UMYR

2.2.2 夏季各月份单站极端降水预报技巧

参照第2.1.3节的模式数据与观测数据分组方式,分析夏季各月份极端降水预报技巧,如图8所示。在各月份,模式对极端降水事件的预报技巧在6月最高,8月最低;随着预见期的增加,6月份进入低预报技巧的时间较其他月份更久,较好的预见期更长。各子区域模式对极端降水预报技巧取到最高、最低值所在的月份并不相同,偏东偏南的3个子区域(上游干流及乌江、洞庭湖流域、鄱阳湖流域)在6月,偏西偏北的3个子区域(金沙江流域、嘉岷流域、汉江及江汉平原)在7月预报技巧为高值,降水最多且易发生极端降水(图4(a)和(b)),说明模式预报极端降水技巧在降水较大、极端降水频发的月份更好。

2.3 夏季区域性极端降水事件的预报评估

参照区域极端降水事件的定义,根据聚类分析方法,以相关系数作为相似系数的测度,把2005—2020年发生的157次极端降水事件按照多雨带的位置划分为4类。将各类降水极端事件的所有降水场分别取算术平均值,得到合成场。合成场的计算结果如图9所示。第Ⅰ类的多雨带位于江西中部和湖南中部,第Ⅱ类的多雨带位于江西北部、湖南北部、湖北东部,第Ⅲ类的多雨带位于重庆、贵州北部、湖北西部,第Ⅳ类的多雨带位于四川中东部。

为检验模式对区域极端降水的预报效果,依照各类型的区域极端降水事件发生的日期,分别计算

BCC_S2S在预见期为0~10 d、11~20 d、21~30 d预报的当日降水场,并取算术平均值作为合成场。如图10所示:模式预报0~10 d的多雨带位置与原降水合成场基本一致,预报日雨量值偏小。模式预报合成场在预见期为11~20 d、21~30 d时,多雨带的范围及降水量均与原降水合成场相差较大,预报效果不理想。

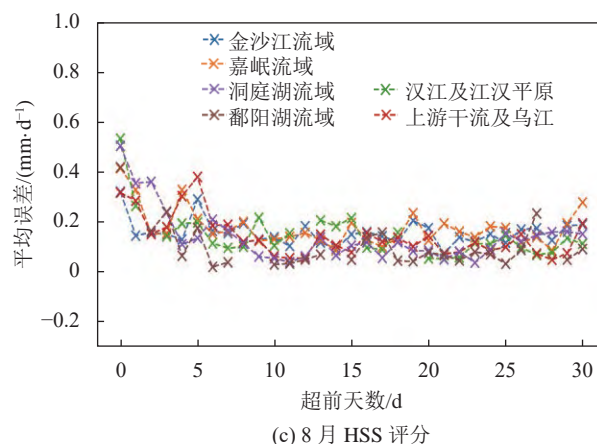
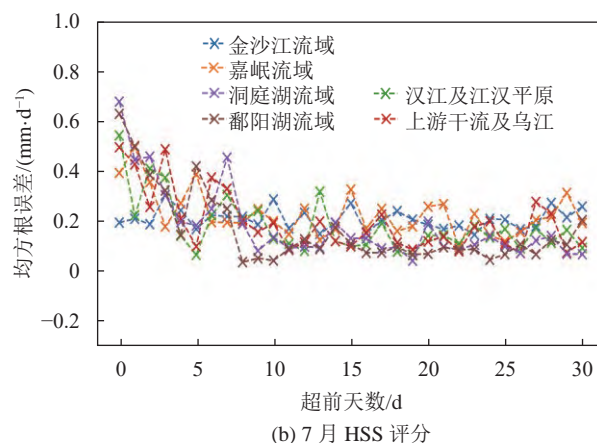
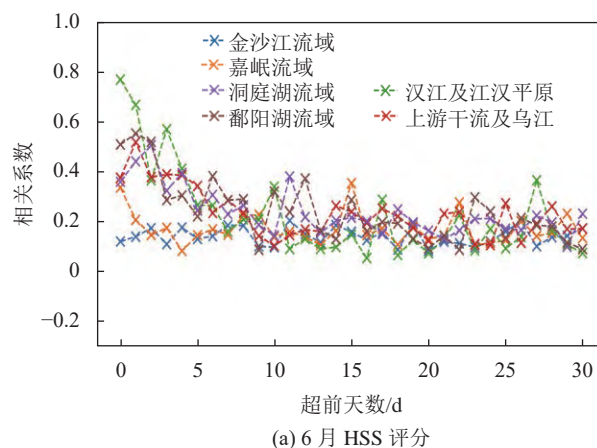


图 8 BCC_S2S模式对长江上中游流域各子区域不同月份极端降水的HSS评分随超前天数的变化

Fig. 8 Change of HSS index of BCC_S2S model for precipitation extremes of each month in each sub-region of the UMYR with lead days

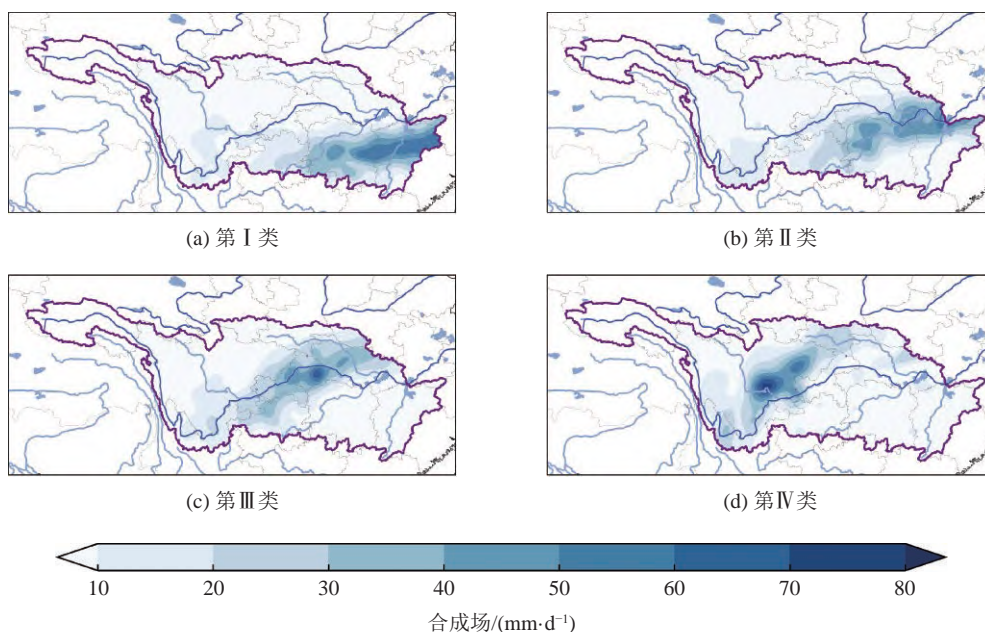


图9 4类长江上中游流域区域极端降水事件的合成场

Fig. 9 Composite fields of four types of precipitation extremes in UMRYS

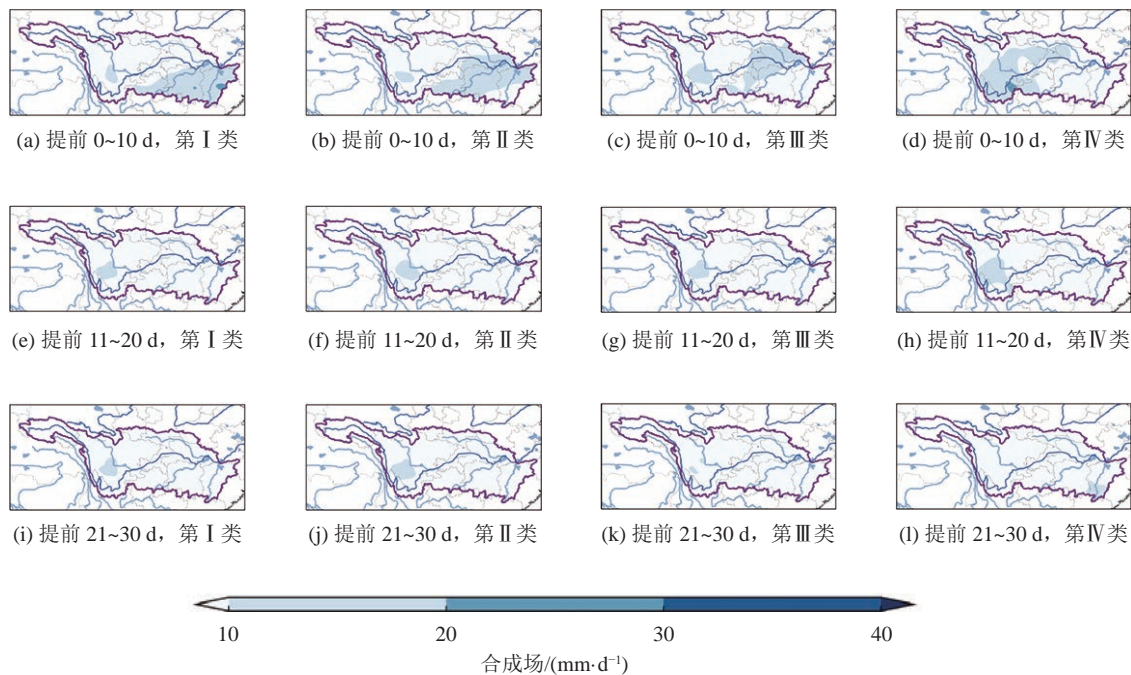


图10 BCC_S2S预见期为0~10 d、11~20 d、21~30 d预报结果的4类区域极端降水事件的合成场

Fig. 10 Composite fields of four types of regional precipitation extremes predicted by BCC_S2S 0~10 d in advance, 11~20 d in advance, and 21~30 d in advance

3 结 论

本文基于相关系数、均方根误差和平均误差3个指标,以及HSS评分,评估了中国国家气候中心季节-次季节预报模式产品(BCC_S2S)在长江上中游流域对日降水和夏季极端降水事件的预报性能。

针对长江上中游全流域、全季节的日降水预报,

BCC_S2S模式降水和观测降水相关系数在各季节之间差异不大,随预见期的增加而下降;在预见期为5~10 d以后,进入低预报技巧阶段。均方根误差季节差异较大,夏季最高。平均误差统计结果表明模式预报夏秋季节降水整体偏多,而冬季偏少。

针对长江上中游流域的6个子区域,模式在夏季预报的相关系数与全流域平均情况一致,随预见期

的增加而下降,在预见期为5~10 d以后进入低预报技巧阶段。均方根误差在金沙江流域最小,在其他区域较大。平均误差在金沙江流域为负偏差,其他流域为正偏差。在夏季各月,相关系数在各月 and 不同区域差异不大,均方根误差在6月相对较低且离散程度更小,平均误差的离散程度亦是6月相对较小。对比模式在各子区域各月的预报表现,模式在嘉岷流域预报日降水的精度相对较好。

对于各子区域夏季单站极端降水事件,模式预报技巧随预见期增加而降低,在预见期到达5~10 d后,进入低预报技巧阶段。对比不同月份的预报技巧发现,模式对极端降水预报技巧在月降水量偏多、极端降水事件频发的月份较高。

对区域性极端降水事件,将全流域157场极端降水划分为4种分布类型,模式在预见期为0~10 d时,均能较好地再现4类极端降水的多雨带范围,但预报降水量偏低;在预见期10 d之后,预报效果较差。

综上所述,模式对长江上中游地区的日降水和极端降水事件的预报性能随预见期的增加而下降。空间上,模式整体对长江上中游的偏西偏北地区预报较好;而在事件上,模式对6月降水的预报精度相对较高,这可能与6月主要受大范围水汽输送或锋面这样较容易预报的天气系统^[27-28]有关。以后还需要对模式再现天气气候系统、物理联系等方面进行进一步研究。

参考文献:

- [1] Vitart F, Robertson A W. The sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events[J]. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2018, 1: 3.
- [2] Waliser D E, Jin K, Kang I S, et al. AGCM simulations of intraseasonal variability associated with the Asian summer monsoon[J]. *Climate Dynamics*, 2003, 21(5/6): 423–446.
- [3] 齐艳军, 容新尧. 次季节-季节预测的应用前景与展望——“次季节-季节预测(S2S)”会议评述[J]. *气象科技进展*, 2014, 4(3): 74–75.
- [4] Pang Yishu, Qin Ningsheng, Liu Bo, et al. Analysis on prediction skills of S2S models for extreme precipitation during flood season in Sichuan Province[J]. *Meteorological Monthly*, 2021, 47(5): 586–600. [庞轶舒, 秦宁生, 刘博, 等. S2S模式对四川汛期极端降水的预测技巧分析[J]. *气象*, 2021, 47(5): 586–600.]
- [5] Hudson D, Marshall A G, Alves O. Intraseasonal forecasting of the 2009 summer and winter Australian heat waves using POAMA[J]. *Weather and Forecasting*, 2011, 26(3): 257–279.
- [6] Liang Ping, Lin Hai. Sub-seasonal prediction over East Asia during boreal summer using the ECCO monthly forecasting system[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 50(3/4): 1007–1022.
- [7] Marshall A G, Hendon H H. Subseasonal prediction of Australian summer monsoon anomalies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(24): 10913–10919.
- [8] Jie Weihua, Vitart F, Wu Tongwen, et al. Simulations of the Asian summer monsoon in the sub-seasonal to seasonal prediction project(S2S) database[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2017, 143(706): 2282–2295.
- [9] He Zheng, Hsu Pangchi, Gao Yingxia. Evaluation of quasi-biweekly oscillation prediction in the Asian summer monsoon regions by BCC S2S model[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2018, 29(4): 436–448. [贺铮, 徐邦琪, 高迎侠. BCC S2S模式对亚洲夏季风准双周振荡预报评估[J]. *应用气象学报*, 2018, 29(4): 436–448.]
- [10] Vitart F, Ardilouze C, Bonet A, et al. The subseasonal to seasonal(S2S) prediction project database[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(1): 163–173.
- [11] Zhou Yang, Yang Ben, Chen Haishan, et al. Effects of the Madden-Julian Oscillation on 2-m air temperature prediction over China during boreal winter in the S2S database[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52(11): 6671–6689.
- [12] Vitart F. Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, 140(683): 1889–1899.
- [13] Zhu Hanchen, Chen Haishan, Zhou Yang, et al. Evaluation of the subseasonal forecast skill of surface soil moisture in the S2S database[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2019, 12(6): 467–474.
- [14] Li Hui, Wang Xiaochun, Zhao Liqing, et al. Evaluating north-western Pacific tropical storm forecasting with the sub-seasonal to seasonal prediction project database[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2020, 36(1): 51–59. [李慧, 王晓春, 赵立清, 等. 西北太平洋台风在S2S时间尺度预报效果评估[J]. *热带气象学报*, 2020, 36(1): 51–59.]
- [15] Li Jiawei, Han Zhiwei. A modeling study of seasonal variation of atmospheric aerosols over east Asia[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(1): 101–117.
- [16] Wu Tongwen, Song Lianchun, Liu Xiangwen, et al. Progress in developing the short-range operational climate prediction system of China national climate center[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2013, 24(5): 533–543. [吴统文, 宋连春, 刘向文, 等. 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*, 2013, 24(5): 533–543.]
- [17] Dong Min, Wu Tongwen, Zuo Qunjie, et al. A simulation comparison study on the climatic characteristics of the south Asia high by the BCC climate system model[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(2): 455–468. [董敏, 吴统文, 左群杰, 等. 气候系统模式对南亚高压气候特征的模拟比较研究[J]. *高原气象*, 2018, 37(2): 455–468.]
- [18] Wu Tongwen, Yu Rucong, Zhang Fang, et al. The Beijing Climate Center atmospheric general circulation model: Description and its performance for the present-day climate[J]. *Climate Dynamics*, 2008, 34(1): 123–147.
- [19] Wu Tongwen, Song Lianchun, Li Weiping, et al. An overview on progress in Beijing Climate Center Climate System

- Model—Its development and application to climate change studies[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(1): 12–29. [吴统文, 宋连春, 李伟平, 等. 北京气候中心气候系统模式研发进展——在气候变化研究中的应用[J]. *气象学报*, 2014, 72(1): 12–29.]
- [20] Wu Jie, Ren Hongli, Zhang Shuai, et al. Evaluation and predictability analysis of seasonal prediction by BCC second-generation climate system model[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 41(6): 1300–1315. [吴捷, 任宏利, 张帅, 等. 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*, 2017, 41(6): 1300–1315.]
- [21] Guo Qu, Huang Anning, Fu Zhipeng, et al. Evaluation and bias correction on the subseasonal forecast of summer precipitation over southwestern China forecasted by the Beijing Climate Center Sub-seasonal to Seasonal predication system[J]. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(3): 644–655. [郭渠, 黄安宁, 付志鹏, 等. 北京气候中心次季节-季节预测系统对西南地区夏季降水次季节预报技巧评估及误差订正[J]. *高原气象*, 2021, 40(3): 644–655.]
- [22] Duan Chunfeng, Xu Min, Cheng Zhi, et al. Evaluation on monthly prediction of western Pacific subtropical high by DERF2.0 model[J]. *Meteorological Monthly*, 2017, 43(10): 1267–1277. [段春峰, 徐敏, 程智, 等. DERF2.0模式对月尺度西太平洋副热带高压预测能力评估[J]. *气象*, 2017, 43(10): 1267–1277.]
- [23] Cheng Zhi, Gao Hui, Zhu Yuejia, et al. Evaluation on the performance of BCC second-generation climate system model for east Asian summer climate prediction[J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(11): 1508–1519. [程智, 高辉, 朱月佳, 等. BCC第二代气候系统模式对东亚夏季气候预测能力的评估[J]. *气象*, 2020, 46(11): 1508–1519.]
- [24] White C J, Franks S W, McEvoy D. Using subseasonal-to-seasonal(S2S) extreme rainfall forecasts for extended-range flood prediction in Australia[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015, 370: 229–234.
- [25] Zhang Danqi, Sun Fenghua, Zhang Yaocun. Evaluation of seasonal prediction for summer rainfall in China based on BCC second-generation short-range climate forecast system[J]. *Plateau Meteorology*, 2019, 38(6): 1229–1240. [张丹琦, 孙凤华, 张耀存. 基于BCC第二代短期气候预测模式系统的中国夏季降水季节预测评估[J]. *高原气象*, 2019, 38(6): 1229–1240.]
- [26] Qiu Hui, Cao Hongwei, Li Chunlong. A statistical extended-range forecast model of upper and middle reaches of Yangtze River based on Spatial-Temporal Projection Method[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(7): 28–33. [邱辉, 曹红伟, 李春龙. 长江中上游延伸期降水时空投影法预报模型研究[J]. *人民长江*, 2016, 47(7): 28–33.]
- [27] Luo Yu, Fan Guangzhou, Zhou Dingwen, et al. Extreme precipitation trend of Southwest China in recent 41 years[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2015, 35(5): 581–586. [罗玉, 范广洲, 周定文, 等. 西南地区极端降水变化趋势[J]. *气象科学*, 2015, 35(5): 581–586.]
- [28] Zhang Jiaguo, Wang Jue, Wu Tao, et al. Weather system types of extreme precipitation in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2018, 37(1): 14–23. [张家国, 王珏, 吴涛, 等. 长江中游地区极端降水主要天气系统类型分析[J]. *暴雨灾害*, 2018, 37(1): 14–23.]
- [29] Jolliffe I T, Stephenson D B. *Forecast verification*[M]. Hoboken: Wiley, 2011.
- [30] Yang Yumeng, Du Juan, Cheng Linlin. Evaluation of accuracy and reliability of TRMM satellite precipitation data in Hunan Province[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(1): 26–32. [杨雨蒙, 杜鹃, 程琳琳. TRMM卫星降雨数据在湖南省的精度和可靠性评定[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(1): 26–32.]
- [31] Lin Qian, Chen Jie, Li Wei, et al. Performance of Sub-seasonal to Seasonal(S2S) Products for global precipitation forecasts[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2019, 8(6): 547–556. [林倩, 陈杰, 李威, 等. S2S次季节到季节预报对全球降水预报的性能评价[J]. *水资源研究*, 2019, 8(6): 547–556.]
- [32] Lu Rui, Zhu Zhiwei, Li Tim, et al. Objective clustering of spatial patterns of summer extreme precipitation frequency over the Huaihe River Basin and their formation mechanisms[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2021, 45(6): 1415–1432. [卢睿, 朱志伟, 李天明, 等. 淮河流域夏季极端降水频次空间分布的客观分类及其形成机理[J]. *大气科学*, 2021, 45(6): 1415–1432.]
- [33] Wang Xiaoci, Li Shuangjun, Meng Yingjie. Characteristics and difference analysis of main rainstorm processes in Yangtze River Basin from June to July during 2016–2020[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2021, 39(6): 921–929. [王孝慈, 李双君, 孟英杰. 2016–2020年6—7月长江流域主要暴雨过程特征及差异性分析[J]. *干旱气象*, 2021, 39(6): 921–929.]
- [34] Wang Xiaoying, Jing Yuanshu, Lu Yongxin. Analysis of spatial and temporal variability of extreme precipitation in Yunnan Province in the last 40 years[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(30): 12822–12831. [王晓莹, 景元书, 鲁永新. 近40年云南省极端降水时空变化特征分析[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(30): 12822–12831.]

(编辑 吴芝明)

引用格式: Li Heng, Zhu Jian. Accuracy evaluation of BCC_S2S summer precipitation forecast in the upper and middle reaches of the Yangtze River[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(6): 21–31. [李恒, 朱坚. BCC_S2S预报长江上中游流域夏季降水精度评估[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(6): 21–31.]