

DOI: 10.14188/j.1671-8844.2023-03-004

文章编号: 1671-8844(2023)03-0281-15

# BCC-CPSv3-S2Sv2 模式对中国区域降水和气温预测的性能评价

杨露<sup>1,2</sup>, 陈杰<sup>1,2</sup>, 孔若杉<sup>3</sup>, 李威<sup>1,2</sup>, 林倩<sup>1,2</sup>, 陈华<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 武汉大学海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 武汉大学计算机学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 利用北京气候中心第 3 代气候模式预测业务系统的第 2 代次季节至季节预测子系统(Beijing Climate Center-climate prediction system version 3-subseasonal to seasonal version 2, BCC-CPSv3-S2Sv2)模式发布的次季节至季节(sub-seasonal to seasonal, S2S)回算数据,从确定性预报和概率性预报这 2 方面对该模式降水和气温的预测性能进行系统评价,并与上一代北京气候中心第 2 代气候模式预测业务系统的第 1 代次季节至季节预测子系统(Beijing Climate Center-climate prediction system version 2-subseasonal to seasonal version 1, BCC-CPSv2-S2Sv1)模式和欧洲中期天气预报中心综合预报系统(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts-integrated forecasting system, ECMWF-IFS)模式预测结果的表现对比,研究现有模式较上一代在预测表现方面是否有所提升,且其是否达到国际先进水平。结果表明:现有模式整体预测效果优于上一代,但差于 ECMWF-IFS 模式。在提前 1 周时,现有模式对降水和气温的预测技巧有明显改进,但在提前 3、4 周时,预测效果仍较差,降水预测相关系数的平均值在提前 4 周时为 0.11。BCC-CPSv3-S2Sv2 春季降水预测对青藏高原中部地区在各个起报时间始终有较好的预测效果,相关系数均大于 0.4。此外,现有模式冬季降水预测表现与 ECMWF-IFS 模式相近。对于气温预测,提前 4 周时其在西北、华北部分区域的预测技巧比提前 3 周、甚至 2 周更高,表明模式能较好把握 S2S 尺度上气温预测的可预报性来源。从概率预报的表现来看,现有模式降水和气温预测的欠离散问题更突出,但均值误差变小。此外,现有模式降水预测对负异常事件的预测表现更好。

**关键词:** 次季节至季节预测; BCC-CPSv3-S2Sv2 模式; 预测技巧; 降水预测

**中图分类号:** P 457 **文献标志码:** A

## Performance evaluation of BCC-CPSv3-S2Sv2 for precipitation and temperature prediction over China

YANG Lu<sup>1,2</sup>, CHEN Jie<sup>1,2</sup>, KONG Ruoshan<sup>3</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>, LIN Qian<sup>1,2</sup>, CHEN Hua<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Provincial Key Lab of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. School of Computer Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** This study evaluates the performance of Beijing Climate Center-climate prediction system version 3-subseasonal to seasonal version 2 (BCC-CPSv3-S2Sv2) in sub-seasonal to seasonal (S2S) precipitation and temperature prediction over China by using both deterministic and probabilistic metrics. Apart from this, forecasts from Beijing Climate Center-climate prediction system version 2-subseasonal to seasonal version 1 (BCC-CPSv2-S2Sv1), the previous forecast system of China Meteorological Administration, the BCC-CPSv3-S2Sv2, and European Centre for Medium-Range Weather Forecasts-integrated forecasting

收稿日期: 2022-05-16

作者简介: 杨露(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事气象水文预报研究, E-mail: joyceyang@whu.edu.cn。

通讯作者: 陈杰(1982-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事气候变化与水文水资源研究, Email: jiechen@whu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 52079093); 湖北省自然科学基金项目(编号: 2020CFA100)。

system (ECMWF-IFS) are also evaluated so as to compare the performance of three models to investigate whether the current model has improved its forecast performance compared with the previous generation and whether it has reached the international advanced level. Results show that the overall prediction performance of BCC-CPSv3-S2Sv2 is better than that of the BCC-CPSv2-S2Sv1, but worse than that of the ECMWF-IFS. When predicting precipitation and temperature one week in advance, the prediction accuracy of precipitation and temperature of BCC-CPSv3-S2Sv2 is improved obviously, but when predicting precipitation three or four weeks in advance, it is still poor, and the average correlation coefficient of precipitation forecast four weeks in advance was 0.11. Specifically, the precipitation prediction of BCC-CPSv3-S2Sv2 shows a persistent good prediction result over the central Qinghai-Tibet Plateau at each onset time in spring, and the correlation coefficient is greater than 0.4. Moreover, the winter precipitation prediction of BCC-CPSv3-S2Sv2 performs similarly with that of ECMWF-IFS. For temperature prediction, the performance for 4-week ahead is more accurate than 3-week ahead, even 2-week ahead in Northwest and North China, which means that BCC-CPSv3-S2Sv2 can better grasp the source of the predictability of temperature prediction at S2S scale. From a probabilistic forecast perspective, the underdispersion problem of precipitation and temperature forecast is more prominent in the existing model, but the mean error is smaller. In addition, existing model precipitation forecasts are better at predicting negative abnormal events

**Key words:** S2S prediction; BCC-CPSv3-S2Sv2 model; prediction performance; precipitation prediction

数值气象预报按起报时间可分为短中期天气预报、次季节至季节(sub-seasonal to seasonal, S2S)预测以及季节性气候预测<sup>[1]</sup>。其中,S2S预测(2周~2个月)可衔接起天气预报和气候预测,帮助建立起无缝隙天气/气候预测系统,将天气服务和气象服务联系为一个整体,更好地满足水利、农业和公共卫生等部门的服务需求。但是由于其可预报性来源复杂,预测难度大,预测结果存在较大不确定性,因此研究与业务化进展相对缓慢<sup>[1-5]</sup>。近年来,为了提高该尺度上的预测技巧以及增进对其可预报性来源和应用的理 解,世界气候研究计划等组织发起了 S2S 预测研究项目<sup>[6]</sup>。该项目发布的数据集包括中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)、欧洲中期天气 预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)等 11 个预报中心发布的近实时预测和回算数据。目前,S2S 预测已被用于预测高温热浪<sup>[7]</sup>、热带气旋<sup>[8]</sup>、骤发干旱<sup>[9]</sup>、极端水文事件<sup>[10]</sup>、电力系统的供需<sup>[11]</sup>、疟疾<sup>[12]</sup>以及无缝隙水文预报<sup>[13]</sup>、极端事件的归因分析等<sup>[14]</sup>。

为了增加 S2S 预测的应用性,对其进行检验至关重要<sup>[15]</sup>。目前,DelSole 等<sup>[16]</sup>评价了美国国家环境预报中心 S2S 提前 3~4 周平均气温和降水预测在美国的预测技巧;Coelho 等<sup>[17]</sup>检验了 ECMWF S2S 降水数据在南美的预测表现;贺铮等<sup>[18]</sup>评估了 CMA S2S 预测对亚洲季风区准双周振荡预测能

力,同时分析了模式预测误差来源;林倩等<sup>[19]</sup>对 S2S 预测研究项目 11 个预报中心发布的降水预测在全球尺度上进行了确定性评价;庞轶舒等<sup>[20]</sup>分析了 S2S 模式预测四川汛期极端降水的技巧。此外,国内外学者还对次季节尺度上的可预测性来源进行了研究。结果表明:土壤水等陆面因子<sup>[21]</sup>、平流层和对流层的耦合作用<sup>[22]</sup>、海冰<sup>[23]</sup>、热带季节内振荡(Madden-Julian oscillation, MJO)<sup>[24]</sup>等均可影响 S2S 的可预测性,这些研究可指导各机构进一步完善模式结构,提高预测技巧。

作为 S2S 预测研究项目的参与成员和数据存储中心之一,CMA 在 2015—2019 年之间采用北京气候中心第 2 代气候模式预测业务系统的第 1 代次季节至季节预测子系统(Beijing Climate Center-climate prediction system version 2-subseasonal to seasonal version 1, BCC-CPSv2-S2Sv1)模式进行预测,自 2019 年 11 月开始采用北京气候中心第 3 代气候模式预测业务系统的第 2 代次季节至季节预测子系统(Beijing Climate Center-climate prediction system version 3-subseasonal to seasonal version 2, BCC-CPSv3-S2Sv2)模式开展 S2S 预测。目前尚未发现对 BCC-CPSv3-S2Sv2 模式 S2S 降水和气温预测在中国区域进行评价的相关文献。因此,本文将从确定性预报和概率预报这 2 方面,对 CMA 现有业务模式的降水、2 m 处最高气温和最低气温预测进行系统评价,并与上一代模式的预测技巧进行对

比,研究预测表现是否有所提升。此外,本文还将对比其与欧洲中期天气预报中心综合预报系统(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts-integrated forecasting system, ECMWF-IFS)模式的S2S预测表现,研究现有模式是否达到国际先进水平,以期为后续应用提供理论依据。

## 1 数据和研究区域

### 1.1 S2S数据

本文使用了BCC-CPSv2-S2Sv1模式、BCC-CPSv3-S2Sv2模式和ECMWF-IFS模式的3套S2S预测数据。在此先对3个模式进行简要介绍。

BCC-CPSv2-S2Sv1模式是北京气候中心第2代气候预测模式中的S2S预测系统,其大气环流模式是北京气候中心大气环流模式版本2.2(Beijing Climate Center-atmospheric general circulation model version 2.2, BCC-AGCM2.2),水平分辨率为T106(约110 km),垂直分辨率为40层,模式上界为0.5 hPa;海洋模式为模块化海洋模式版本4(modular ocean model version 4, MOM4),水平分辨率为 $(1/3)^{\circ}\sim 1^{\circ}$ (中高纬地区为 $1^{\circ}$ ,热带地区为 $(1/3)^{\circ}$ ),垂直分辨率为40层;陆面过程模式采用北京气候中心大气植被相互作用模式版本2(Beijing Climate Center-atmospheric vegetation interaction model version 2, BCC-AVIM2);海冰模式采用地球物理流体动力学实验室-海冰模拟器版本4(geophysical fluid dynamics laboratory-sea ice simulator version 4, GFDL SIS4)<sup>[25,26]</sup>;集合预测方案为滞后平均预报<sup>[27]</sup>。

BCC-CPSv3-S2Sv2模式是国家气候中心次季节-季节-年际尺度一体化气候模式预测业务系统中的S2S预测系统。其大气环流模式是北京气候中心大气高分辨率通用模式版本3(Beijing Climate Center-atmospheric general model version 3-high resolution, BCC-AGCM3-HR),水平分辨率为T266(约45 km),垂直分辨率为56层,模式上界为0.1 hPa;海洋模式为模块化海洋模式版本5(modular ocean model version 5, MOM5),水平分辨率为 $(1/4)^{\circ}$ ,垂直分辨率为50层;陆面过程模式采用BCC-AVIM2,海冰模式采用地球物理流体动力学实验室-海冰模拟器版本5(geophysical fluid dynamics laboratory-sea ice simulator version 5, GFDL SIS5);集合预测方案仍为滞后平均预报。

ECMWF-IFS模式是ECMWF的预测系统,其大气环流模式为集成大气层模式(ensemble-

atmosphere model, EAM),水平分辨率在提前0~15 d时为T639(约16 km),大于15 d时为T319(约32 km),垂直分辨率均为91层,模式上界为0.01 hPa;其海洋模式为核心欧洲海洋模式版本3.4.1(nucleus for European modelling of the ocean version 3.4.1, NEMO3.4.1),水平分辨率为 $(1/4)^{\circ}$ ,垂直分辨率为75层;其海冰模式采用Louvain-la-Neuve海冰模式版本2(Louvain-la-Neuve sea-ice model version 2, LIM2);此外,其耦合了集成海浪模式(Ensemble Wave Model, ENS-WAM)。本文下载的数据对应的模式版本为CY47R1。有关各中心模式的详细资料可在<https://confluence.ecmwf.int/display/S2S/Models>获得,在此不再赘述。

BCC-CPSv3-S2Sv2模式于2019年11月11日开始准业务化运行,并以动态(on the fly)的方式对过去15 a开展回算试验。相较于BCC-CPSv2-S2Sv1,其在模式分辨率、积分步长和同化系统等方面有了较大提升。具体来说,其大气模式模拟的垂直范围扩展至65 km,海洋模式水平分辨率提高到 $25^{\circ}$ ,垂直深度达5 500 m,大气和海洋等模式分辨率大大提高;积分步长由7.5 min减少为2 min;采用多圈层耦合同化子系统对大气、海洋及海冰等多源资料进行协调同化,以获得更精准的初始场<sup>[28]</sup>。从模式的物理过程来看,S2Sv2在大气模式的动力核心物理过程上有一些新的发展,如采用散度场的空间变化阻尼去控制平流层以上的高频噪音以改善极地地区平流层的大气温度模拟;优化调整了边界层湍流和浅积云对流过程等物理过程参数化方案,显著提高了云和平流层关键动力过程等的模拟能力,“双赤道辐合带”偏差显著减小<sup>[29,30]</sup>。此外,S2Sv2优化了模式动力框架算法和数据结构等,整体性能得到提升,对MJO的向东传播特征和对流强度预测技巧提升显著,对准2年振荡厄尔尼诺与南方涛动指数等一些关键指标具有较高的预报技巧等<sup>[29,31,32]</sup>。

本文将首先对BCC-CPSv3-S2Sv2模式发布的S2S回算数据进行检验,分析该模式在中国区域对降水、2 m处最高气温和最低气温的预测效果。同时,对比其与BCC-CPSv2-S2Sv1模式和ECMWF-IFS模式的预测表现。由于所选的气象预测产品存在差异,因此通过以下几点来保持其一致性:1)预测时长均选取提前28 d;2)均使用 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 分辨率;3)回算时段采用数据集的共有时段,即2005—2014年;4)考虑到回算数据的发布频率不同,在此都只利用周1、周4发布的数据。此外,为了行文简



洁,下文将用 S2Sv1、S2Sv2、EC 分别代表 BCC-CPSv2-S2Sv1 模式、BCC-CPSv3-S2Sv2 模式和 ECMWF-IFS 模式的预测结果。

预测数据的原始时间分辨率为 1 d(降水)和 6 h(气温)。由于在对 S2S 预测进行评价时,一般考虑气象变量的逐周变化值或者每周均值,如每周的累积降水<sup>[33,34]</sup>、每周的平均气温<sup>[35,36]</sup>。因此,本研究将 28 d 的预测时长划分为 4 周:第 1 周(1~7 d)、第 2 周(8~14 d)、第 3 周(15~21 d)、第 4 周(22~28 d),并将原始数据转化为每周的累积降水、每周平均最高气温及平均最低气温来进行评价。

为了更详细地对预测结果在不同气候条件和不同区域下的预测效果进行评价,本文将时间划分为 4 个季节:春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)及冬季(12~次年 2 月)。同时,地理区划基于《中国气象产品地理分区》(GB/T 36109-2018)标准,以全国各地年降水量、气温分布等气候指标差异性为主要依据,以行政区域界限、地形和地理方位分布等特点为参考,将中国陆地部分划分为 8 个大区,具体分区见图 1(审图号:GS(2021)5387 号)。



图 1 地理分区图

Fig.1 Geographical partition map of China

注:1)由于 GB/T 36109-2018 标准<sup>[37]</sup>中,所划西南地区整体海拔差异较大,因此本文将四川、重庆、贵州和云南四省(市)定义为西南地区,将西藏自治区和青海省合并为青藏高原地区,以更好地分析预测的区域差异;此外,由于所划江汉、江淮与黄淮区域偏小,评估时模式格点数较少,因此将这 3 个区域合并为江淮地区,以保证评估结果的可靠性。2)由于台湾省资料暂缺,因此华南地区的计算结果仅指广东、广西、海南三省(区)和福建南部、香港特别行政区、澳门特别行政区。

## 1.2 实测数据

本研究的实测数据来自中国地面降水和气温日值格点数据集,其分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,其构建基于中国区域 2 472 个观测站点,通过薄盘样条方法插值得到。该数据集已经过严格地质量控制,且已被用于学术研究<sup>[38-40]</sup>。数据集的详细介绍见文献<sup>[41,42]</sup>。选用的数据时段为 2005—2014 年。

## 2 评价方法

为了更全面地检验模式的预测能力,本文将从确定性预报和概率性预报这 2 方面来进行评价。其中,确定性预报即评价集合预报的均值,概率性预报则是考虑各集合预报成员预测值进行的评价。

### 2.1 确定性预报评估方法

采用相关系数  $r$ 、平均绝对误差 MAE、平均相对误差绝对值 MARE 对预测结果进行确定性评价。其中,相关系数可以评价预测数据和实测数据的关联程度,系数越接近于 1,表明其相关性越好;平均绝对误差和平均相对误差绝对值可分别用于评价气温预测和降水预测的误差大小,指标值越小,表明预测误差越小。此外,为了更好地对比模式之间的预测能力差异,计算了模型之间相关系数的差异值  $\Delta r$ 、平均绝对误差的差异值  $\Delta \text{MAE}$  和平均相对误差绝对值的差异值  $\Delta \text{MARE}$ 。在计算指标差异值时,被减数均用 S2Sv2 的相应指标计算结果,以更清晰地反映 S2Sv2 模式的预测性能。

各指标计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (1)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \quad (2)$$

$$\text{MARE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{S_i - O_i}{O_i} \right| \quad (3)$$

$$\Delta X = X_{\text{S2Sv2}} - X_{\text{S2Sv1/EC}} \quad (4)$$

式中: $O_i$  和  $S_i$  分别为实测值和 S2S 预测值; $\bar{O}$  和  $\bar{S}$  分别为实测值均值和 S2S 预测均值; $n$  为样本数量; $i=1, 2, \dots, n$ ;  $\Delta X$  为指标差异值; $X$  为指标  $r$ 、MAE 或 MARE; $X_{\text{S2Sv2}}$  为基于 BCC-CPSv3-S2Sv2 回算数据计算得到的相应指标值; $X_{\text{S2Sv1/EC}}$  为基于 BCC-CPSv2-S2Sv1 或 ECMWF-IFS 回算数据计算得到的相应指标值。

### 2.2 概率预报评估方法

采用秩直方图和 Brier 评分(Brier score, BS)对预测结果进行概率性评价。其中,秩直方可用于评价集合预报的可靠性,其形状能够反映集合预报的离散度和均值误差<sup>[43]</sup>。具体来说,平直的秩直方图是体现集合预报可靠性的一个必要非充分条件。秩直方图呈凹形,表明集合预报欠离散,反之说明集合预报离散度过大;秩直方图倾斜,则表明存在均值误差。Brier 评分本质上是概率预报的均方误

差,其取值范围为 $0\sim 1$ <sup>[44]</sup>。BS越趋近于0,说明预测表现越好,计算公式如下:

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i)^2 \quad (5)$$

式中: $f_i$ 和 $o_i$ 分别为预报值和观测值对某一事件的预报概率。

本文根据历史实测数据的66.7%、33.3%分位数,将事件划分为正异常(AN)、正常(N)和负异常事件(BN),并计算各个事件的BS评分,以更细致地评价模型预测能力。

### 3 确定性预报评价结果

#### 3.1 降水预测确定性评价结果

本文计算了S2Sv2降水预测在各季节、各起报时间的 $r$ ,在此仅展示其在春夏两季提前1~4周时的计算结果,如图2所示。由图2可知:提前1周时预测表现最好,春季和夏季降水预测在大部

分区域的 $r$ 都分别大于0.6和0.4;随着起报时间的提前,各个季节降水预测相关系数均减小,表明预测效果变差。而从预测表现变化的速度来看,提前2周时的预测表现在大部分区域明显差于第1周,但第3周和第4周的预测表现相近,几乎无变化。从季节来看,春、秋季的预测表现整体优于夏、冬季节,且各个季节的预测技巧有明显的空间差异性。具体来说,春季在青藏高原中部始终有较好的预测能力,在各起报时间的 $r$ 都大于0.4;虽然夏季整体预测效果差,但能较好把握青藏高原西部的预测。此外,春、夏季对西北、江南和江淮地区的预测能力较弱,在S2S预测的尺度上(提前3~4周) $r$ 几乎都小于0.2。提前1~2周时,超85%格点通过了0.05的显著性检验;提前3~4周时,超过75%格点通过0.05的显著性检验,未通过显著性检验的格点主要集中在西北地区。

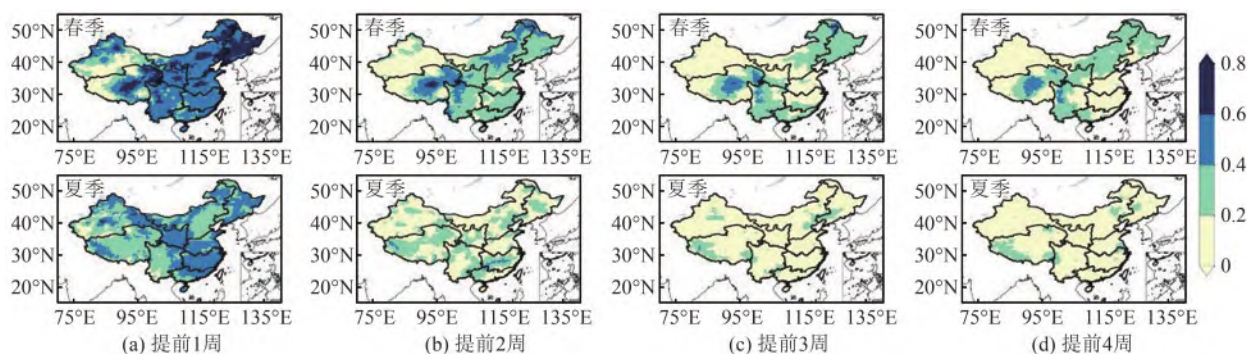


图2 S2Sv2春夏季降水预测在各个起报时间的相关系数

Fig.2 Correlation coefficient of precipitation prediction by S2Sv2 in spring and summer at each onset time

S2Sv2在提前1周和2周时的秋冬季节降水预测的 $r$ 计算结果以及S2Sv2与S2Sv1、EC的 $\Delta r$ 结果见图3。其中图3第2行为S2Sv2较S2Sv1的 $\Delta r$ 结果,第3行为S2Sv2较EC的 $\Delta r$ 结果。由图可得:S2Sv2整体预测效果优于S2Sv1,在提前1周时,降水预测技巧有明显改进,特别是在西北、江淮部分区域, $\Delta r$ 超过0.3;但提前3、4周时,预测技巧有限,且在西北、华北部分区域的预测表现略差于S2Sv1, $\Delta r$ 约为-0.1。与EC相比,S2Sv2在提前1周时的冬季降水预测效果与EC相近,且对青藏高原西藏地区的预测技巧更高,但在华南、江南和华北部分区域的预测能力差于EC, $\Delta r$ 超过-0.2,甚至-0.3。此外,S2Sv2在春季对西北、青藏高原西部等地,秋季对华南、东北、江淮等地的预测表现差于EC, $\Delta r$ 超过-0.2。

此外,3个模式的降水预测表现出一定的区域

相似性。它们在秋季对西南大部分区域及西北、华北部分区域有较好的预测表现, $r$ 在0.4~0.6之间;在冬季对江南、江淮等东部季风区表现出较高的预测能力;在提前1周时,都对新疆西北部有一定预测能力;但对青藏高原西部、西北地区的预测技巧十分有限, $r$ 小于0.2。

S2Sv2降水预测的各分区的MARE格点均值计算结果见图4。图中,横坐标 $w1$ 、 $w2$ 、 $w3$ 、 $w4$ 分别表示提前1、2、3、4周。由图可得:S2Sv2在夏季的预测表现较好,且预测能力较稳定,在各起报时间MARE均小于2。但是模式对青藏高原和西北地区的冬季降水模拟能力较差,其中冬季青藏高原地区在各起报时间的MARE(9.0、9.7、9.5、9.4)远大于其他季节和地区。

为了更好地对比模式之间的预测效果,计算了MARE的差异值,记为 $\Delta MARE$ ,见图5。图5(a)中



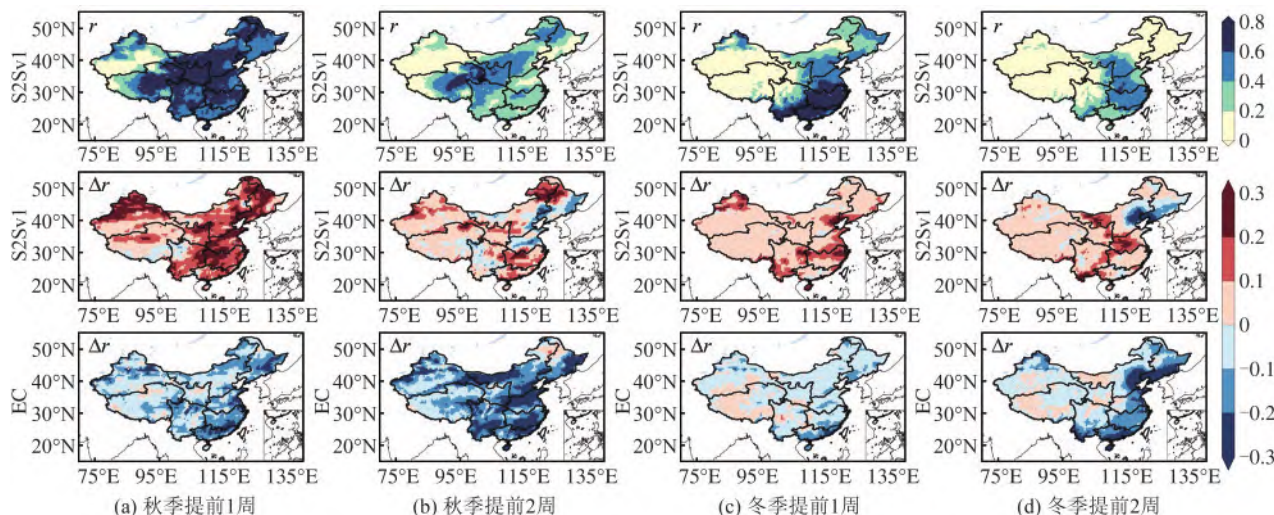


图3 S2Sv2秋冬季降水预测在提前1、2周的相关系数,以及S2Sv2与S2Sv1、EC的相关系数差值

Fig.3 Correlation coefficient of precipitation prediction in autumn and winter for 1-week and 2-week ahead by S2Sv2, and the difference of correlation coefficient between S2Sv2 and S2Sv1, S2Sv2 and EC, respectively

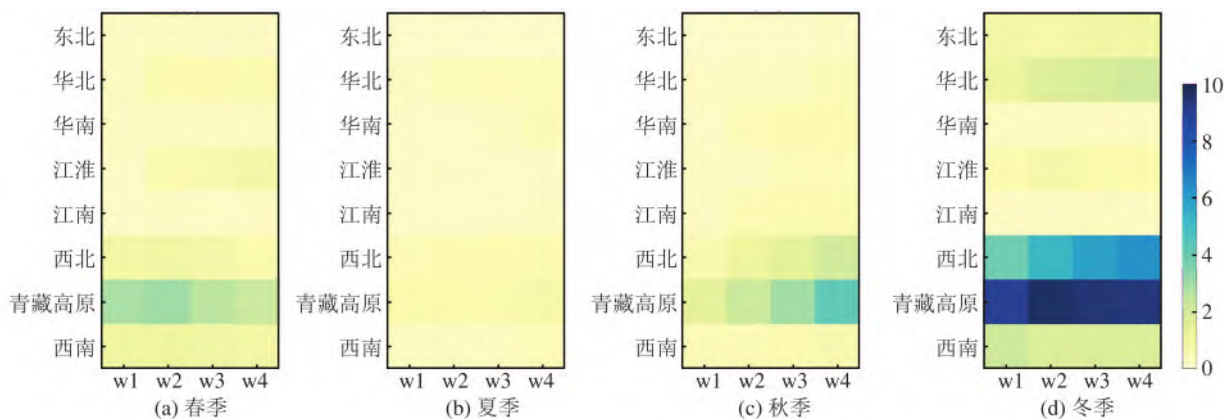


图4 S2Sv2降水预测平均相对误差绝对值

Fig.4 Mean absolute relative error of precipitation prediction of S2Sv2

4个子图为S2Sv2较S2Sv1的 $\Delta$ MARE,图5(b)中4个子图为S2Sv2较EC的 $\Delta$ MARE。由图可得:S2Sv2的降水预测能力整体优于S2Sv1,对青藏高原、西北和华北地区的冬季预测技巧明显高于S2Sv1, $\Delta$ MARE在 $-4\sim 0$ 之间。与EC相比,S2Sv2对青藏高原、西北地区预测能力还有较大的提升空间, $\Delta$ MARE大于2。

### 3.2 气温预测确定性评价结果

S2Sv2冬季低温预测、夏季高温预测在各个起报时间的 $r$ 计算结果如图6所示。从预测的气象要素来看,S2Sv2对最低气温的预测能力优于最高气温。提前1周时,各季节气温预测的 $r$ 几乎都大于0.8,随起报时间的提前, $r$ 呈现减小的趋势。但是,提前4周时S2Sv2对西北、华北部分区域的气温预测能力优于第3周,甚至是第2周。说明在S2S尺

度上S2Sv2对气温预测的气候影响因子有较好地识别和模拟。此外,春秋季节的气温预测表现整体优于夏冬季节。从地区来看,冬季对青藏高原的最低气温预测能力相对较差;夏季对青藏高原东南部、西南地区滇南、华南等地的最高气温预测表现相对较差。超过95%格点通过了0.05的显著性检验。

S2Sv2在提前2周、3周时的冬季最低气温、夏季最高气温的 $r$ 和 $\Delta r$ 计算结果见图7。由图可得:S2Sv2对气温的预测技巧整体高于S2Sv1,差于EC。从地区来看,S2Sv2在西北、江南和华南部分区域的冬季低温和夏季高温预测能力优于S2Sv1, $\Delta r$ 约为 $-0.2\sim 0$ ;但在提前3周时,S2Sv2夏季高温预测在江淮区域的表现略差于S2Sv1, $\Delta r$ 约为 $-0.3\sim -0.1$ ,且其在华南、江淮、华北和东北部分区域的表现也差于EC, $\Delta r$ 约为 $-0.3\sim -0.2$ 。

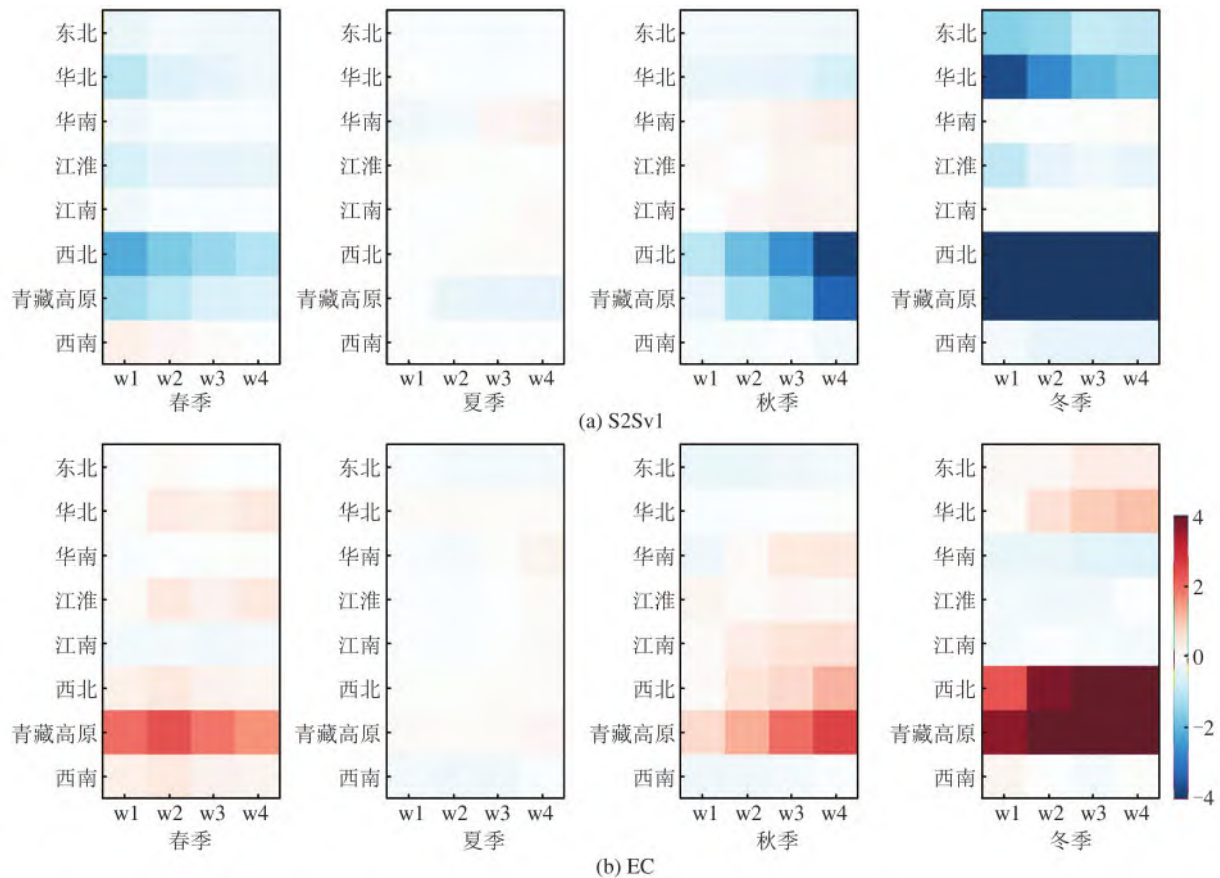


图5 降水预测平均相对误差绝对值的差异值

Fig.5 Differences of mean absolute relative error of precipitation prediction

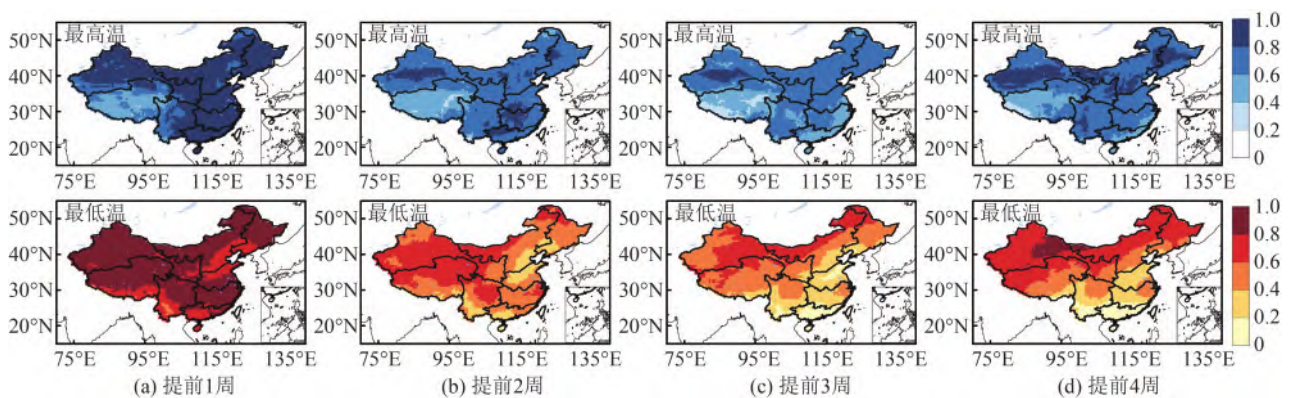


图6 S2Sv2气温预测相关系数

Fig.6 Correlation coefficient of temperature prediction by S2Sv2

S2Sv2对各分区气温预测的MAE格点均值计算结果见图8。从预测的气象要素来看,S2Sv2对最低气温的预测误差整体小于最高气温。随着起报时间的提前,S2Sv2各个季节气温预测的MAE均呈现增加的趋势,预测效果变差。从季节来看,冬季最低气温,春、冬季最高气温的预测表现略差于其他情境。从地区来看,S2Sv2在西北、青藏高原地区表现相对较差,MAE大于 $4^{\circ}\text{C}$ ;在江淮、江南地

区最低气温预测能力更高且更稳定,MAE在 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 之间。

图9展示了S2Sv2较S2Sv1、EC春夏季高温预测与秋冬季低温预测的MAE差异值,记为 $\Delta\text{MAE}$ 。从模式来看,S2Sv2气温预测表现整体优于S2Sv1。具体来说,S2Sv2春季高温预测在西北、青藏高原、华北和东北等地的预测表现明显优于S2Sv1, $\Delta\text{MAE}$ 超过 $-2^{\circ}\text{C}$ 。与EC相比,S2Sv2春季



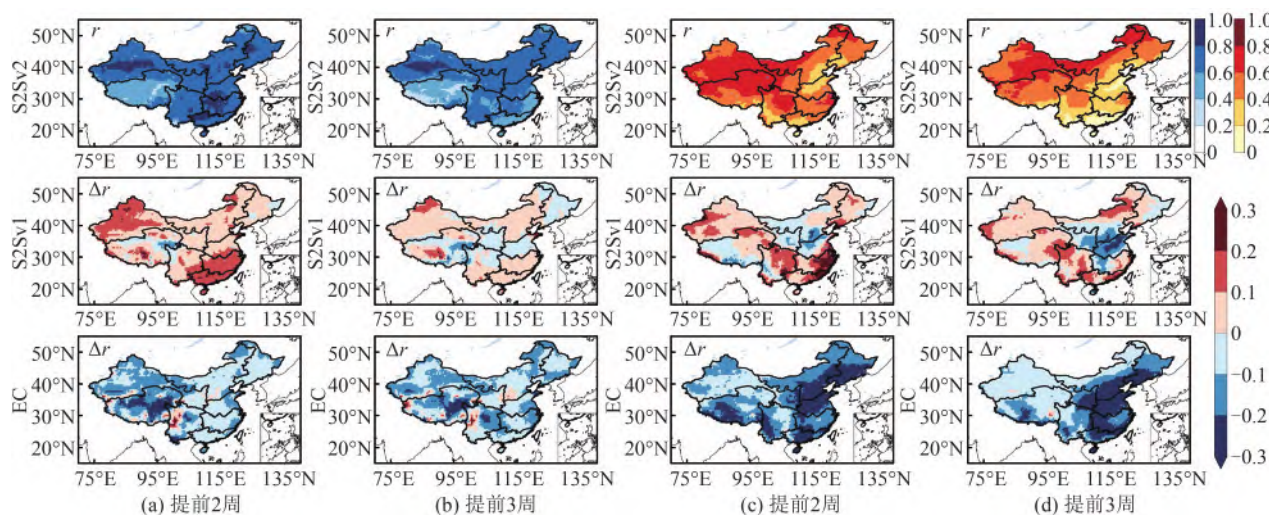


图 7 S2Sv2 冬季低温和夏季高温预测提前 2 周和 3 周时的相关系数, 以及此时 S2Sv2 与 S2Sv1 和 EC 的相关系数差异值

Fig.7 Correlation coefficient of minimum temperature prediction in winter and maximum temperature prediction in summer for 2-week and 3-week ahead by S2Sv2, and the differences of correlation coefficients between S2Sv2 and S2Sv1, S2Sv2 and EC, respectively

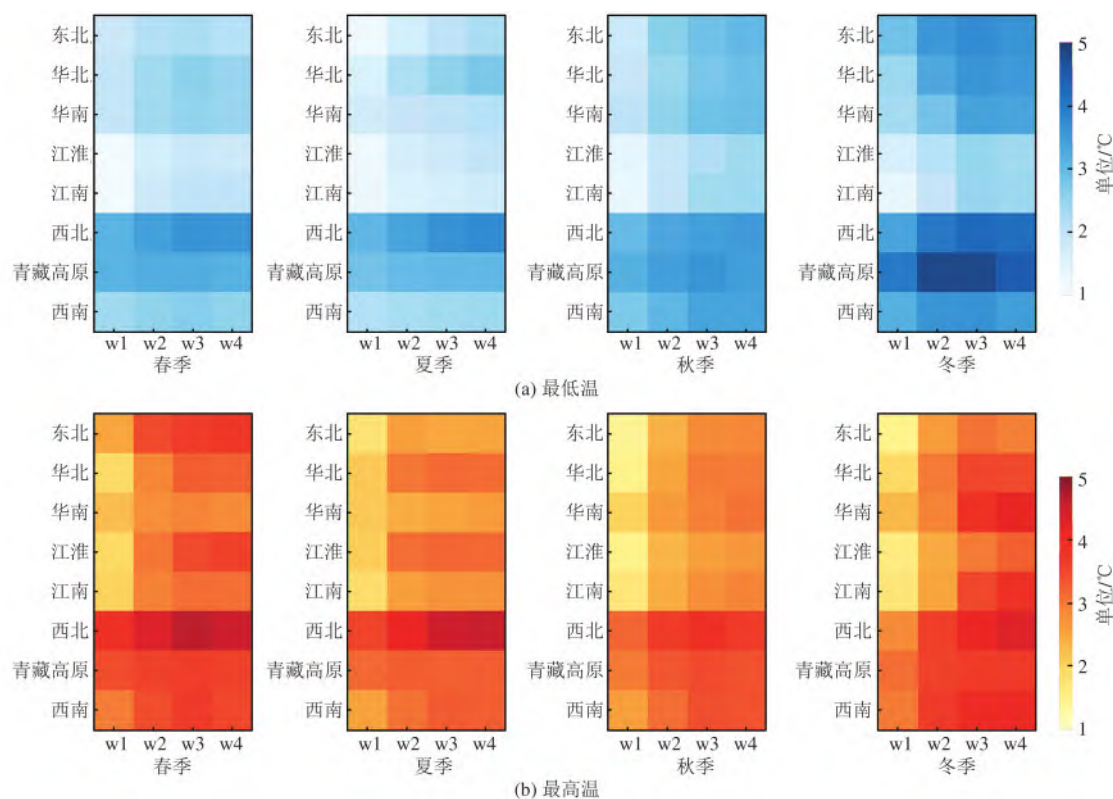


图 8 S2Sv2 气温预测平均绝对误差

Fig.8 Mean absolute error of temperature prediction by S2Sv2

高温预测对西北、青藏高原的预测技巧更高,  $\Delta\text{MAE}$  为  $-2\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 但对江淮、华北和东北地区的春夏季高温预测能力较弱,  $\Delta\text{MAE}$  超过  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

#### 4 概率性预报评价结果

本文绘制了 S2Sv1、S2Sv2、EC 预测结果在各

季节、各地理分区的秩直方图。此外, 计算了降水 and 气温预测对正异常事件 (AN)、正常事件 (N)、负异常事件 (BN) 在各个情境下的 Brier 评分。在此仅展示部分计算结果。

##### 4.1 降水预测概率性评价结果

S2Sv2 夏季青藏高原、西北地区降水预测在各



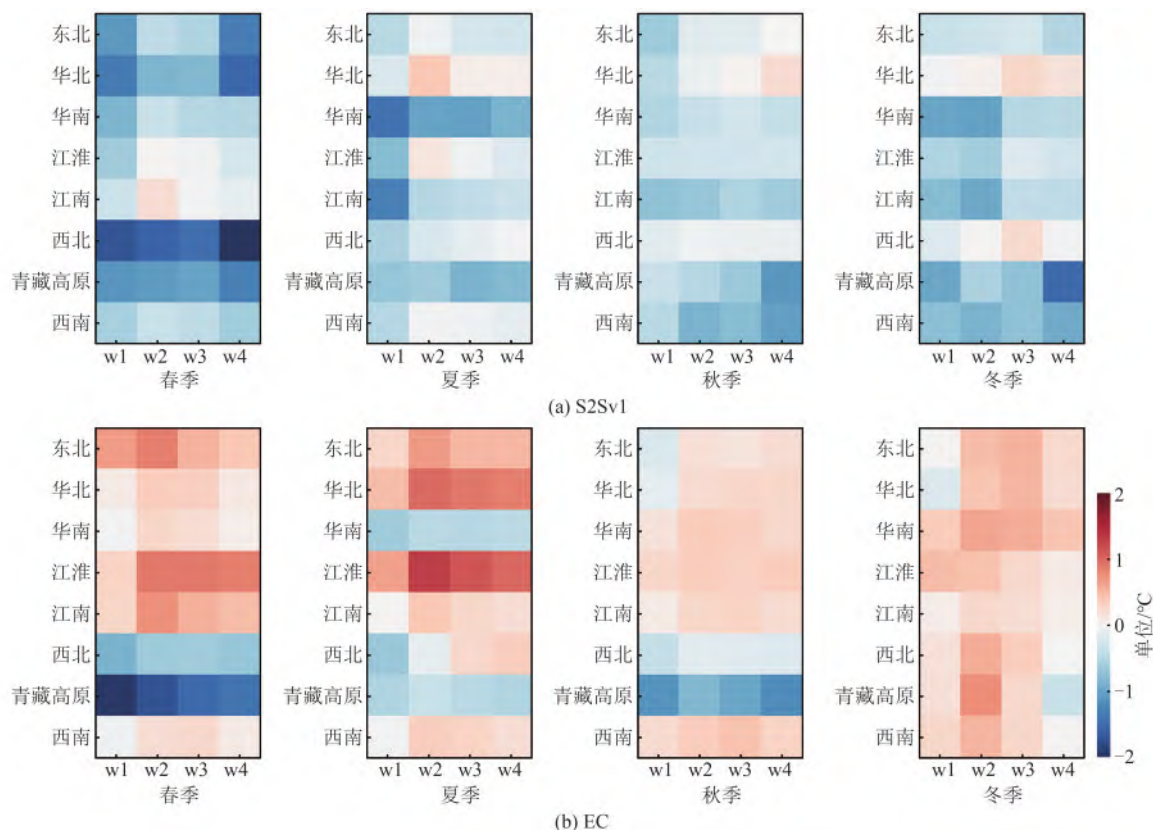


图9 气温预测平均绝对误差的差异值

Fig.9 Differences of mean absolute error of temperature prediction

起报时间的秩直方图表现见图10。由图可得:S2Sv2集合预报的离散度较小,且都存在一定的均值误差。随着起报时间的提前,离散度变大。从季节来看,S2Sv2在冬季对各个地区预测的降水都偏

多,且在华北、东北等地区的误差大于华南、江南地区;而夏季对除青藏高原、西南和华南地区外的区域都预测偏少。从地区来看,青藏高原和西南地区全年降水预测都偏多。

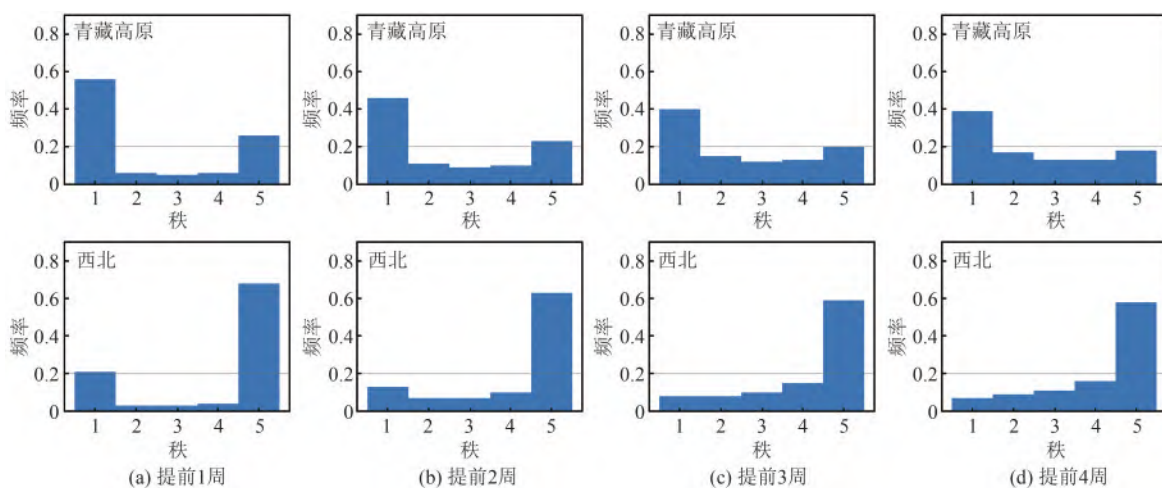


图10 S2Sv2降水预测在各个起报时间的秩直方图

Fig.10 Rank histogram of precipitation prediction by S2Sv2 at each onset time

3个模式提前1周时对青藏高原地区在各季节降水预测的秩直方图表现见图11。由图可得,3个模式都存在欠离散问题,且S2Sv2的欠离散问题较

S2Sv1更突出。尽管EC成员更多,但是离散度也偏小。此外,3个模式在青藏高原地区各个季节的降水结果都预测偏多。

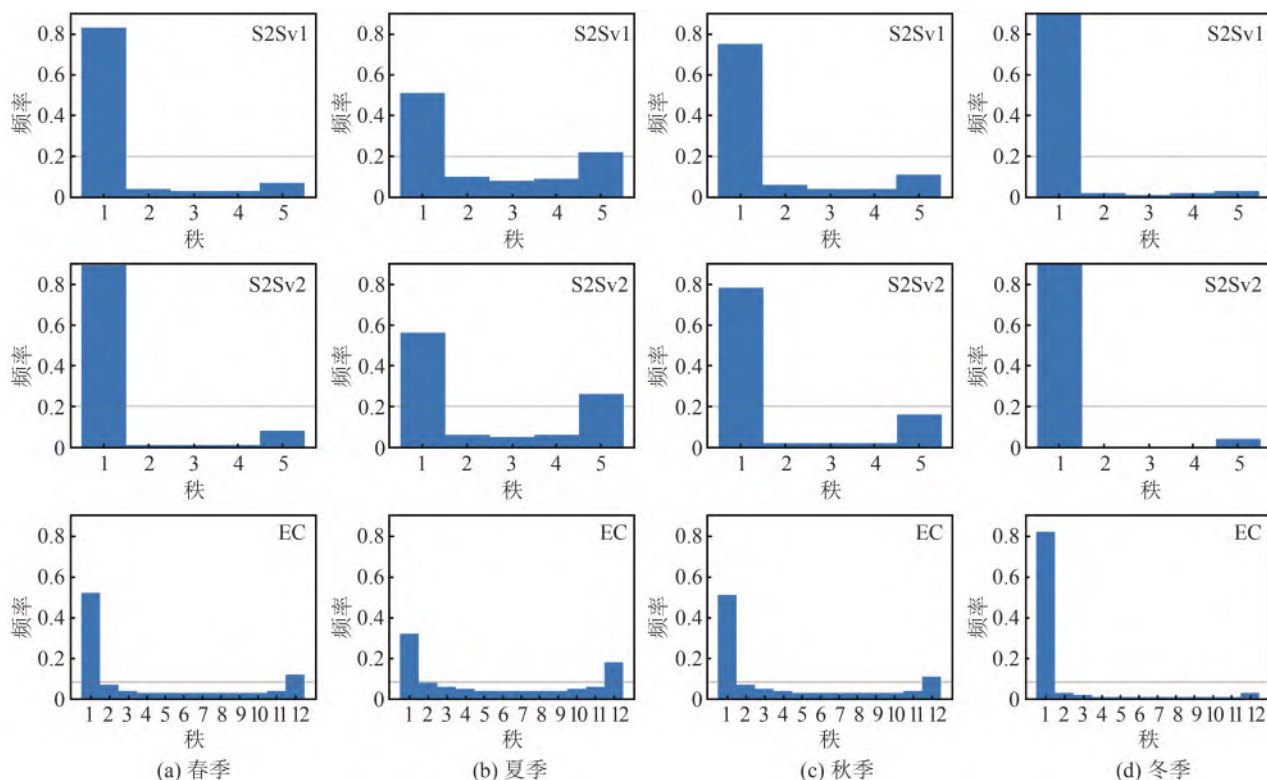


图 11 各模式青藏高原地区各个季节降水预测在提前 1 周时的秩直方图

Fig.11 Rank histogram of precipitation prediction in Qinghai-Tibet Plateau for 1-week ahead by each model

S2Sv2 夏季降水预测在不同起报时间下的各地区各事件的 BS 计算结果见图 12。图中,每个区域对应的柱子从左到右表示提前 1~4 周的 BS 值。由图可得,随着起报时间的提前, S2Sv2 降水预测的 BS 值呈现增加的趋势,即预测能力变差。从事件来看, S2Sv2 对负异常(BN)事件的预测表现优于其他 2 个事件,尤其是提前 1 周时。从地区来看,对江淮地区的夏季正异常(AN)事件预测效果差于其他地区,其 BS 值大于 0.4。从整体预测效果来说,西北、青藏高原地区的预测表现略差于其他地区。

各个模式在春、秋、冬 3 季,提前 1 周时各个地区的 BS 计算结果见图 13。由图可得: S2Sv2 对 3 种事件的整体预测效果明显优于 S2Sv1 模式,特别是在江淮、华南和东北地区,具体表现为 S2Sv2 的 BS 比 S2Sv1 低了约 0.2;此外, S2Sv2 秋季华南地区的预测表现优于 EC。3 个模式在冬季的预测表现更好,夏季更差,且冬季 BN 事件的预测效果明显优于其他事件。

3 个模式最低气温预测提前一周在华北地区各季节的秩直方图表现见图 15。由图可得: 3 个模式都存在欠离散问题。与降水预测一样, S2Sv2 气温集合预测的离散度比 S2Sv1 小,但是均值误差也

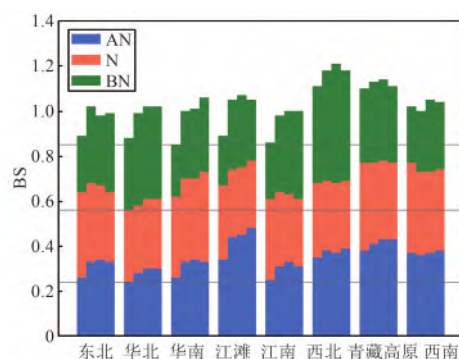


图 12 S2Sv2 夏季降水 BS 评分

Fig.12 Brier score of precipitation prediction in summer by S2Sv2

#### 4.2 气温预测概率性评价结果

S2Sv2 冬季最低气温预测在华北、西南地区在各个起报时间的秩直方图表现见图 14。从地区来看, S2Sv2 冬季在华北、江淮、西北等地预测的最低气温偏高,而在青藏高原和西南地区最低气温预测有负偏差,即预测偏冷。从季节来看,各个模式在不同情境下的表现没有特定的规律。

小。此外, 3 个模式在青藏高原和西南地区各个季节的预测都有负偏差。

S2Sv2 最高气温集合预测也存在欠离散问题。3 个模式在青藏高原、西南地区各个季节的预测都



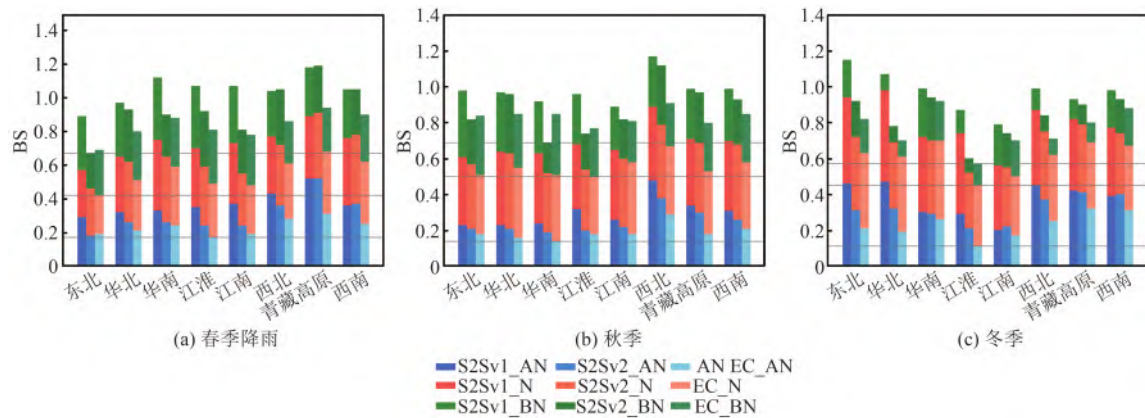


图13 各模式春夏秋冬降水预测在提前1周时的BS计算结果

Fig.13 Brier scores of precipitation prediction in spring, autumn and winter for 1-week ahead by each model

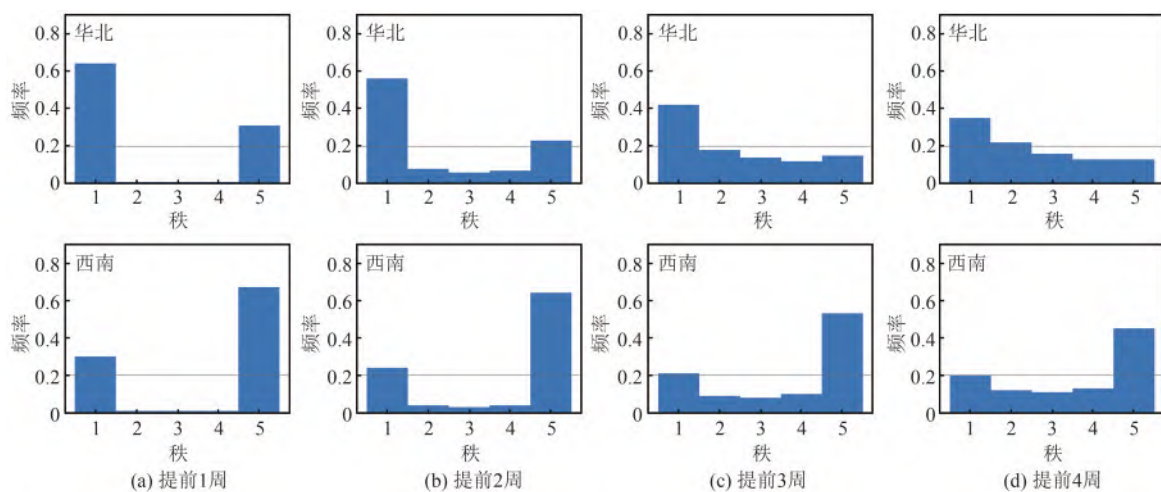


图14 S2Sv2最低气温预测在华北和西南地区各个起报时间的秩直方图

Fig.14 Rank histogram of minimum temperature prediction in North China and Southwest China at each onset time by S2Sv2

偏低。而EC在所有情况下,预测的最高气温都偏低,即整体有负偏差。S2Sv1、S2Sv2模式在各情境下的预测表现无一般规律。秩直方图结果在此不再展示。

3个模式春夏季高温预测和秋冬季低温预测在提前3周时的BS评分计算结果见图16。从预测变量来看,S2Sv2对最低气温的预测能力优于最高气温。从季节来看,S2Sv2春、秋季的整体BS较夏、冬季低约0.25,即气温预测在春秋季节的预测表现优于夏冬季。从地区来看,S2Sv2在华南、青藏高原地区的预测效果明显差于其他地区。从事件来说,S2Sv2对正异常事件和负异常事件的预测技巧高于正常事件。而从模式来看,S2Sv2的预测效果整体优于S2Sv1,总体BS评分比S2Sv1低约0.13;但在冬季的低温预测表现整体比S2Sv1差,比如江淮、华北地区。与EC相比,S2Sv2在春、秋季的气温预测能力更强,比如华南、华北、东北和西

北地区;但在夏、冬季对华南、江淮地区的低温预测能力差于EC。

## 5 结论

本文针对BCC-CPSv3-S2Sv2模式S2S降水、气温预测在中国区域的预测表现从确定性预报和概率预报的角度进行了评价,得出以下结论:

1)随着起报时间的提前,S2Sv2降水和气温确定性预报技巧呈下降趋势,降水预测相关系数的平均值从0.42(提前1周)减小到0.11(提前4周)。提前3、4周时,降水预测对西北地区等几乎没有预测能力,相关系数小于0.2。但是对于气温预测,提前4周时模式对西北、华北部分区域的预测能力比提前3周、甚至2周更优,说明S2Sv2在S2S尺度上对气温预测的可预报性来源能较好地识别和模拟。同时,随着起报时间的提前,集合预报的离散度增大,其可预报性和可信度降低。

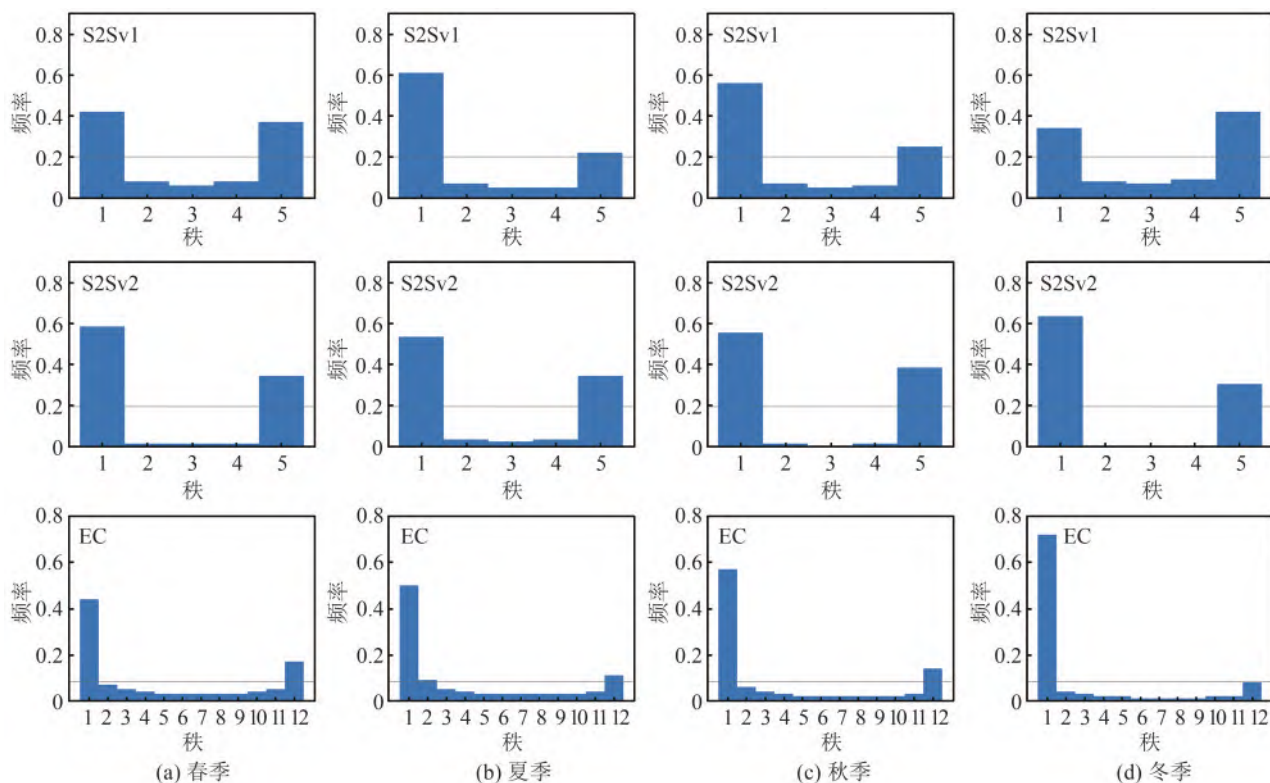


图 15 各模式在华北地区各季节最低气温预测提前 1 周时的秩直方图

Fig.15 Rank histogram of minimum temperature prediction in North China at each season for 1-week ahead by each model

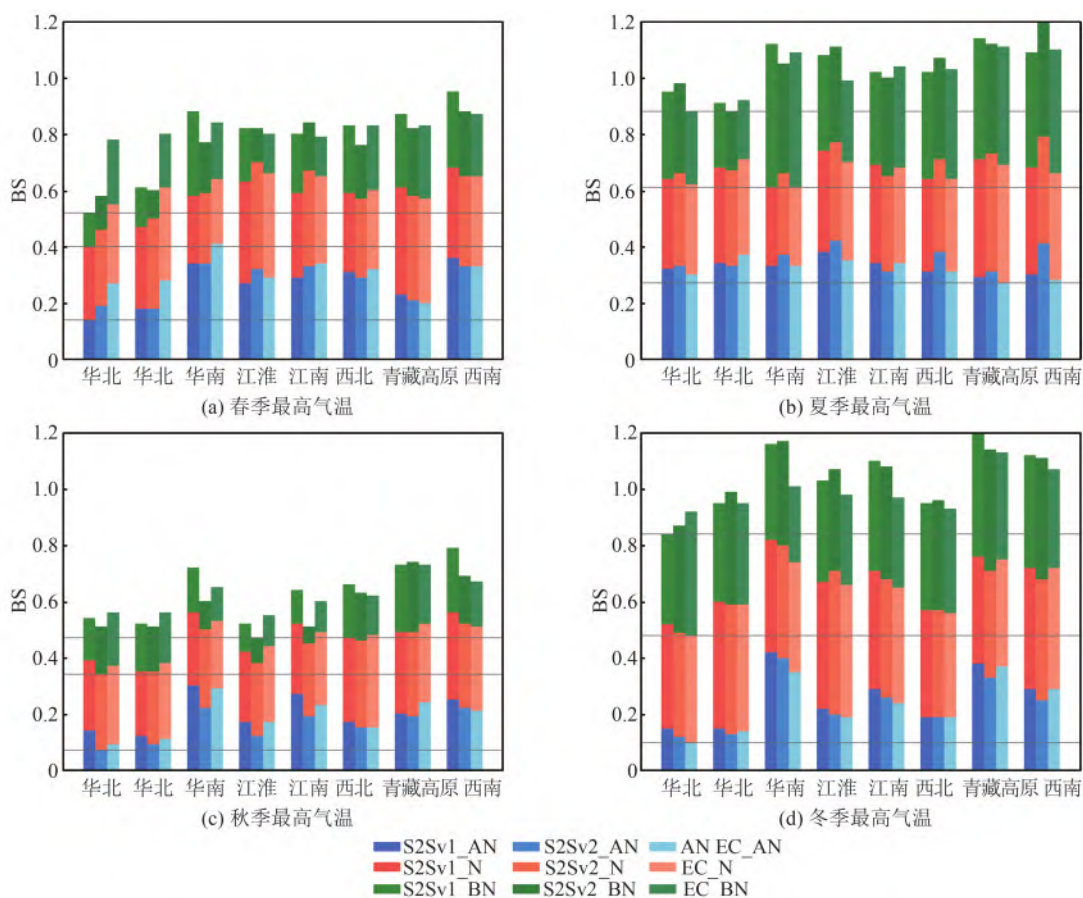


图 16 各模式各季节气温预测提前 3 周时 BS 计算结果

Fig.16 Results of BS calculation when the air temperature prediction of each season in each model is advanced by 3 weeks



2) S2Sv2对不同气象要素的预测效果存在差异:对气温的预测能力优于降水;对最低气温的预测能力优于最高气温。从季节来看,气温和降水预测在春秋季节的相关系数、BS评分的表现整体优于夏、冬季节。

3) 对比各模式的预测能力, S2Sv2整体预测效果明显优于S2Sv1,略差于EC。提前1周时, S2Sv2降水预测在西北、江淮等地的预测效果明显优于S2Sv1,  $\Delta r$ 超过0.3;但提前3、4周时,预测技巧仍有较大提升空间。从集合预报的表现来看, S2Sv2离散度小于S2Sv1。由于本研究并没有选取相应指标来度量离散度,因此无法评价哪个模式的离散度更适宜。此外, S2Sv2集合预报的均值误差小于S2Sv1。与EC相比, S2Sv2冬季降水预测效果与EC模式相近,但其对西北、青藏高原春季降水,华南、东北、江淮秋季降水预测技巧有限。此外, S2Sv2模式对青藏高原和西南地区的降水预测误差始终较大,这可能是由于这些地方地形复杂,具有独特的热力动力作用,如高原低涡等天气系统,且气候成因复杂,使得模式对该地降水的预测技巧较差<sup>[45-47]</sup>。未来可以通过提高模式分辨率,以更好地刻画地形的变化;同时改进对模式参数化方案,如水汽凝结的云微物理过程、对流参数化等方案,增强对大气环流过程的模拟能力,以更准确地把握降水过程,减少预测误差<sup>[48,49]</sup>。

本文仅对3个模式的S2S预测效果进行了评价。之后可以考虑利用多个模式的预测结果开展多模式超级集合预报,以研究其是否能改进S2S的预测技巧,提高预测可靠性。此外,可考虑对预测结果进行后处理,以改善集合预报欠离散问题并校正系统性偏差,并将其用于水文预报等领域。

#### 参考文献:

- [1] Vitart F, Robertson A W, Anderson D L. Subseasonal to seasonal prediction project: bridging the gap between weather and climate[J]. Bulletin of the World Meteorological Organization, 2012, 61(2):23.
- [2] 丑纪范,郑志海,孙树鹏. 10~30 d 延伸期数值天气预报的策略思考——直面混沌[J]. 气象科学, 2010, 30(5): 569-573.  
Chou Jifan, Zheng Zhihai, Sun Shupeng. The think about 10-30 d extended-range numerical weather prediction strategy—facing the atmosphere chaos[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, 30(5): 569-573.
- [3] 杨秋明. 10~30 d 延伸期天气预报方法研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(9):970-984.
- Yang Qiuming. Prospects and progresses in the research of the methods for 10-30 days extended-range weather forecast[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(9): 970-984.
- [4] Mariotti A, Ruti P M, Rixen M. Progress in subseasonal to seasonal prediction through a joint weather and climate community effort[J]. Npj Climate and Atmospheric Science, 2018, 1(1):1-4.
- [5] 金荣花,马杰,任宏昌,等. 我国10~30天延伸期预报技术进展与发展对策[J]. 地球科学进展, 2019, 34(8): 814-825.  
Jin Ronghua, Ma Jie, Ren Hongchang, et al. Advances and development countermeasures of 10-30 days extended-range forecasting technology in China[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(8): 814-825.
- [6] 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.
- [7] Ford T W, Dirmeyer P A, Benson D O. Evaluation of heat wave forecasts seamlessly across subseasonal timescales[J]. Npj Climate and Atmospheric Science, 2018, 1(1): 1-9.
- [8] Robertson A W, Vitart F, Camargo S J. Subseasonal to seasonal prediction of weather to climate with application to tropical cyclones[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(6): e2018JD029375.
- [9] Pendergrass A G, Meehl G A, Pulwarty R, et al. Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(3):191-199.
- [10] Li W, Chen J, Li L, et al. Evaluation and bias correction of S2S precipitation for hydrological extremes[J]. Journal of Hydrometeorology, 2019, 20(9): 1887-1906.
- [11] Bloomfield H C, Brayshaw D J, Gonzalez P L M, et al. Sub-seasonal forecasts of demand and wind power and solar power generation for 28 European countries [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(5): 2259-2274.
- [12] Tompkins A M, di Giuseppe F. Potential predictability of malaria in Africa using ECMWF monthly and seasonal climate forecasts[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2015, 54(3): 521-540.
- [13] Wetterhall F, di Giuseppe F. The benefit of seamless forecasts for hydrological predictions over Europe[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(6): 2259-2274.

- 3409-3420.
- [14] 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.
- [15] White C J, Carlsen H, Robertson A W, et al. Potential applications of subseasonal-to-seasonal (S2S) predictions[J]. *Meteorological Applications*, 2017, 24 (3): 315-325.
- [16] DelSole T, Trenary L, Tippett M K, et al. Predictability of week-3-4 average temperature and precipitation over the contiguous United States[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(10): 3499-3512.
- [17] Coelho C A S, Firpo M A F, de Andrade F M. A verification framework for South American sub-seasonal precipitation predictions[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2018, 27(6): 503-520.
- [18] 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.
- He Zheng, Xu Bangqi, 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.
- [19] 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.
- 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.
- [20] 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.
- 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.
- [21] Guo Z C, Dirmeyer P A, Delsole T. Land surface impacts on subseasonal and seasonal predictability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(24): L24812.
- [22] Butler A, Charlton-Perez A, Domeisen D I V, et al. Sub-Seasonal Predictability and The Stratosphere[M]. Amsterdam: Elsevier, 2019: 223-241.
- [23] Lenetsky J E, Tremblay B, Brunette C, et al. Subseasonal predictability of Arctic Ocean Sea ice conditions: Bering strait and ekman-driven ocean heat transport[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(11): 4449-4462.
- [24] Grimm A M, Hakoyama L R, Scheibe L A. Active and break phases of the South American summer monsoon: MJO influence and subseasonal prediction[J]. *Climate Dynamics*, 2021, 56(11): 3603-3624.
- [25] 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.
- 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.
- [26] 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.
- 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.
- [27] Wu T, Song L, Li W, et al. An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28(1): 34-56.
- [28] 辛晓歌, 吴统文, 张洁, 等. BCC 模式及其开展的 CMIP6 试验介绍[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 533-539.
- Xin Xiaoge, Wu Tongwen, Zhang Jie, et al. Introduction of BCC models and its participation in CMIP6[J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(5): 533-539.
- [29] Wu T W, Lu Y X, Fang Y J, et al. The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6[J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12(4): 1573-1600.
- [30] Lu Y X, Wu T W, Li Y B, et al. Mitigation of the double ITCZ syndrome in BCC-CSM2-MR through improving parameterizations of boundary-layer turbulence and shallow convection[J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14(8): 5183-5204.
- [31] Liu X, Yao J, Wu T, et al. Development of coupled data assimilation with the BCC climate system model: highlighting the role of sea-ice assimilation for global analysis[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, 13(4): e2020MS002368.
- [32] Wu T W, Yu R C, Lu Y X, et al. BCC-CSM2-HR: a high-resolution version of the Beijing Climate Center Climate System Model[J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14(5): 2977-3006.
- [33] Wang Y, Ren H L, Zhou F, et al. Multi-model ensemble sub-seasonal forecasting of precipitation over



- the maritime continent in boreal summer[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(5): 515.
- [34] Specq D, Batté L, Déqué M, et al. Multimodel forecasting of precipitation at subseasonal timescales over the southwest tropical Pacific[J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(9): e2019EA001003.
- [35] Weigel A P, Baggenstos D, Liniger M A, et al. Probabilistic verification of monthly temperature forecasts[J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(12): 5162-5182.
- [36] Vigaud N, Tippett M K, Yuan J, et al. Probabilistic skill of subseasonal surface temperature forecasts over North America[J]. *Weather and Forecasting*, 2019, 34(6):1789-1806.
- [37] 中华人民共和国国家标准. GB/T 36109—2018. 中国气象产品地理分区[S]. 北京:中国标准出版社,2018. State Standard of the People's Republic of China. GB/T 36109—2018. Geographical partition of meteorological products in China[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [38] Gu L, Chen J, Yin J B, et al. Responses of precipitation and runoff to climate warming and implications for future drought changes in China[J]. *Earth's Future*, 2020, 8(10):e2020EF001718.
- [39] 徐粒,李倩,王瑛,等.气候变化情景下泥石流危险性响应分析[J].*气候变化研究进展*, 2020, 16(4):415-423. Xu Li, Li Qian, Wang Ying, et al. Analysis of the changes in debris flow hazard in the context of climate change[J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(4): 415-423.
- [40] 胡桃,吕世华,常燕,等. CMIP6模式对青藏高原多年冻土变化的分析预估[J].*高原气象*, 2022, 41(2): 363-375. Hu Tao, Lü Shihua, Chang Yan, et al. Analysis and prediction of permafrost changes in Qinghai-Xizang Plateau by CMIP6 in climate models[J]. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(2):363-375.
- [41] 赵煜飞,朱江,许艳.近50 a中国降水格点数据集的建立及质量评估[J].*气象科学*, 2014, 34(4):414-420. Zhao Yufei, Zhu Jiang, Xu Yan. Establishment and assessment of the grid precipitation datasets in China for recent 50 years[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2014, 34(4): 414-420.
- [42] 张强,阮新,熊安元.近57年我国气温格点数据集的建立和质量评估[J].*应用气象学报*, 2009, 20(4): 385-393. Zhang Qiang, Ruan Xin, Xiong Anyuan. Establishment and assessment of the grid air temperature data sets in China for the past 57 years[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(4): 385-393.
- [43] Hamill T M. Interpretation of rank histograms for verifying ensemble forecasts[J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(3): 550-560.
- [44] Wilks D S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (4th Edition)[M]. Elsevier, 2020.
- [45] 孙辉,刘晓东,刘长海,等.青藏高原夏季降水日变化的高分辨率数值模拟[J].*热带气象学报*, 2013, 29(6): 1008-1018. Sun Hui, Liu Xiaodong, Liu Changhai, et al. High-resolution numerical simulation of the diurnal cycle in summertime precipitation over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2013, 29(6): 1008-1018.
- [46] 张歆然,陈昊明. CMIP6模式对青藏高原东坡暖季降水的模拟评估[J].*气候变化研究进展*, 2022, 18(2): 129-141. Zhang Xinran, Chen Haoming. Assessment of warm season precipitation in the eastern slope of the Tibetan Plateau by CMIP6 models[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(2):129-141.
- [47] 尹家波,郭生练,顾磊,等.中国极端降水对气候变化的热力学响应机理及洪水效应[J].*科学通报*, 2021, 66(33): 4315-4325. Yin Jiabo, Guo Shenglian, Gu Lei, et al. Thermodynamic response of precipitation extremes to climate change and its impacts on floods over China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(33): 4315-4325.
- [48] Zhou X J, Zhao P, Chen J M, et al. Impacts of thermodynamic processes over the Tibetan Plateau on the Northern Hemispheric climate[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(11): 1679-1693.
- [49] Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.