刘绿柳，王国复，肖潺，2023. S2S 气候模式产品在黄河流域径流预测中的应用[J]. 气象，49(11)：1396-1404. Liu L L，Wang G F，Xiao C，2023. Application of S2S climate model products in runoff prediction in the Yellow River Basin[J]. Meteor Mon，49(11)：1396-1404(in Chinese).

S2S 气候模式产品在黄河流域径流预测中的应用*

刘绿柳 王国复 肖 潺

国家气候中心，北京 100081

提 要： 次季节气候和径流预测是主动减灾的一个关键。基于国家气候中心第三代气候模式系统的次季节到季节模式(CMA-CPS v3 S2S)的气候预测信息和 HBV 水文模型，应用集合预测技术研发了未来 40 d 时段平均径流量和时段内极端干旱概率预测模型，应用平均方差技巧评分、距平相关系数、相对操作特征曲线面积、布赖尔技巧评分开展了回报检验，并检验了 2021 年黄河流域径流异常预测效果。结果表明，所建模型能够以较高技巧预测黄河流域未来 40 d 时段平均的径流量，且表现出枯季预测技巧高、湿季技巧低的季节差异；对秋末 11 月和冬季 3 个月(12 月、1 月、2 月)的极端干旱概率预测也有较高技巧。对于 2021 年 5—8 月黄河上中游干旱和 9—10 月的秋汛，该方法正确预测了除 6 月、9 月外的其他 4 个月的径流异常方向，但异常程度与实况存在差异。对径流预测水平影响因素的进一步分析表明，S2S 降水预测能力影响径流预测水平，特别是丰水期的径流预测，但还有降水之外的其他因素影响径流预测技巧。

关键词： 次季节到季节，径流预测，干旱预测，黄河

中图分类号： P338，P463 **文献标志码：** A **DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.030703

Application of S2S Climate Model Products in Runoff Prediction in the Yellow River Basin

LIU Lüliu WANG Guofu XIAO Chan

National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: Sub-seasonal to seasonal (S2S) climate and runoff prediction is of great importance for active disaster reduction. The prediction models of runoff anomaly and extreme drought for the future 40 days are developed based on CMA-CPS v3 climate model by National Climate Center, China Meteorological Administration, and a hydrological model HBV. The performance of the models are evaluated with the indices of MSSS, ACC, AUC and BSS for hindcast, and verified for the runoff anomaly prediction over the Yellow River Basin in 2021. The results suggest that runoff mean prediction for the future 40 days is skillful, and the skill is higher in dry season than wet season. Moreover, the extreme drought prediction is skillful in later autumn (November) and the winter months (December, January and February). The direction of monthly runoff anomaly from May to October in 2021 are predicted correctly except in June and September, but the anomaly degrees are different from observation. Finally, the analysis of skill variation with lead time and seasons, and the skill difference between runoff and precipitation reveals that the skill of precipitation prediction by S2S climate model influences runoff skill, especially during wet season. However, there are also other factors than precipitation affecting the skill of runoff prediction.

Key words: sub-seasonal to seasonal, runoff prediction, drought prediction, Yellow River

---

* 国家重点研发计划(2016YFE010240004、2018YFE0196000)、公益性行业(气象)科研专项(GYH201406021)共同资助
2022 年 8 月 10 日收稿； 2023 年 9 月 11 日收修定稿

第一作者：刘绿柳，主要从事气候和气候变化影响评估. E-mail：liull@cma.gov.cn
通讯作者：肖潺，主要从事气候与气候变化研究. E-mail：xiaochan@cma.gov.cn

引　言

近年来,具有次季节尺度特征的极端气候和水文事件,如热带气旋、高温热浪以及强降水和流域洪涝等的强度和影响范围日益扩大(任宏利等,2015;李晓岚,2020)。由于缺乏足够早的预警信息,导致应对极端事件的准备和采取措施不充分,全球每年都会因此造成重大人员和财产损失(周佰铨和翟盘茂,2023)。例如,2008 年 1 月我国南方地区历史罕见的低温雨雪低温冰冻过程,2019 年 8 月台风利奇马,2021 年山西罕见秋汛等均造成了巨大的社会经济损失(丁一汇等,2008;李健等,2021);2003 年欧洲高温热浪造成 3.5 万人死亡(Mitton,2008),2015 年巴基斯坦高温热浪一周内造成 200 多人死亡(Nasim et al,2018)。对于许多管理决策层来说,次季节预测是主动减灾的一个关键,可为有效防灾减灾、科学风险管理决策提供重要信息,具有潜在的社会和经济价值(齐艳军和容新尧,2014;Vitart et al,2017)。2013 年世界气象组织(WMO)制定的次季节到季节(sub-seasonal to seasonal,S2S)气候预测计划(Robertson et al,2015)有效促进了次季节气候预测的发展,也为 S2S 水文预测的发展提供了契机。

次季节尺度河川径流可预测性主要来源于气候异常的可预测性和预测开始时刻的陆地水分条件(Mahanama et al,2008),将气候模式预测的气候异常和土壤湿度信息带入流域水文模型有助于提高次季节尺度的径流预测能力(Ying et al,2016),但两者对径流预测技巧的贡献具有时变特征(Wood and Lettenmaier,2008;Yuan et al,2016;Liu et al,2019;2021)。已有研究表明,基于国家气候中心第二代气候预测模式与水文模型耦合的延伸期、季节尺度的流域径流预测具有一定预测技巧,且干旱半干旱区的黄河流域预测技巧高于南方湿润区的长江、珠江(Liu et al,2019;2021)。目前,涵盖次季节、季节和年际气候预测的国家气候中心气候预测模式系统(China Meteorological Administration-Climate Prediction System version 3,CMA-CPS v3,原 BCC-CPS v3)已投入业务试运行阶段。与第二代相比,模式的物理过程参数化方案、动力框架等多个方面得以改进优化,水平和垂直分辨率进一步提高(Li et al,2019;Wu et al,2019;2020;Lu et al,2020)。本文将探讨 CMA-CPS v3 的 S2S 模式与水文模型耦合的黄河流域未来 40 d 内的径流及枯水期干旱预测能力,并尝试分析 S2S 降水预测能力对径流预测精度的影响。

1　数据与方法

1.1　基础数据

观测气候数据为 2004 年以来降水和气温逐日序列,该套数据来源于国家气象信息中心整编的 2000 多个国家级一般气象站和基准气候站逐日气候观测数据集。

国家气候中心研发的 CMA-CPS v3 气候模式预测业务系统基于高分辨率气候模式 BCC-CSM2-HR(大气水平分辨率:约 45 km,海洋水平分辨率:0.25°),发展了耦合同化和集合预测方法,包含 S2S、季节、年际气候预测。其中,S2S 预测子系统提供未来 60 d 的次季节尺度气候预测,季节预测子系统提供未来 7 个月的季节-年际尺度气候预测。受计算资源限制,S2S 历史回报只开展了 2006—2020 年部分起报日的气候回报,每次模拟包含 4 个成员。从 2021 年起的实时预测则每天运行,于当天北京时间 18:10 定时启动 4 个并行作业,构成 4 个集合成员。本研究所用的气候模式数据来自 S2S 气候预测子系统 2006 年以来的回报和实时预测数据集中的降水、气温数据,取离预测月第一天最近的前一个月最后 6 d 的逐日降水量和日平均气温。表 1 列出了每月 1 日径流回报所使用的气候驱动数据的起报日期及对应预测时段起止日期。

1.2　水文模型与径流回报

HBV 最初由瑞典国家水文气象局开发,之后不断改进,已经在几十个国家得到广泛应用(徐宗学,2009),包括在中国不同气候、不同地质地貌地区的应用(赵彦增等,2007;董立凡等,2016;米玛次仁等,2019)。本研究采用针对大尺度流域水文模拟开发的 HBV-D 模型(Krysanova et al,1999)模拟黄河流域花园口站的逐日径流,模拟过程中不考虑水库调度和人类取用水问题。前期研究表明该模型能够较好地模拟花园口站的月天然径流过程,率定期(1961—1980 年)和验证期(1981—1998 年)的纳什效率系数分别为 0.76 和 0.73,径流量模拟偏差均为 3.7%,相关系数分别为 0.88 和 0.86(Liu et al,2021)。在此基础上,进一步分析了该模型对 1961—1998 年枯水段 11—3 月的月径流模拟能力,逐月模拟径流与观测径流的相关系数分别为 0.91、

0.71、0.70、0.64、0.76，表明能较好地模拟枯水期月径流过程。因此用 2006—2020 年每月 1 日起 1～40 d 的 S2S 模拟气候和提前 2 年的观测气候驱动该水文模型开展径流回报，然后提取预测时段内的逐日径流建立径流回报数据集和径流异常预测模型，并开展检验评估。

从表 1 可以看出，径流集合回报成员对应的大气初值日期相差很大。考虑到预测时效和成员个数对集合预测技巧均有影响，按照预测时效由短到长、预测成员由少到多的顺序设计了不同的径流集合预测方案，对应的成员个数分别为 4、8、12、16、20、24 个，用以分析预测时效和集合成员个数对集合预测技巧的影响。图 1 给出了以 7 月 1 日为起报日的径流回报集合成员的构成方式。

表 1 CMA-CPS v3 S2S 气候模式回报起报日及径流预测时段

Table 1 Start date of hindcasts by CMA-CPS v3 S2S climate model and periods of runoff prediction

S2S 起报日期	径流预测时段
1 月 14、18、21、25、28、30 日	2 月 1 日至 3 月 12 日(闰年为 11 日)
2 月 18、20、22、24、25、27 日	3 月 1 日至 4 月 9 日
3 月 15、16、18、22、25、29 日	4 月 1 日至 5 月 10 日
4 月 22、23、26、27、29、30 日	5 月 1 日至 6 月 9 日
5 月 21、24、25、27、28、31 日	6 月 1 日至 7 月 10 日
6 月 21、22、24、25、28、29 日	7 月 1 日至 8 月 9 日
7 月 13、16、20、23、27、30 日	8 月 1 日至 9 月 9 日
8 月 13、17、20、24、27、31 日	9 月 1 日至 10 月 10 日
9 与 10、14、17、21、24、28 日	10 月 1 日至 11 月 9 日
10 月 12、15、19、22、26、29 日	11 月 1 日至 12 月 10 日
11 月 12、16、19、23、26、30 日	12 月 1 日至次年 1 月 9 日
12 月 14、17、21、24、28、31 日	次年 1 月 1 日至 2 月 9 日

1.3 径流预测模型

径流异常包括时段平均的确定性预测、集合概率预测，以及时段内干旱发生概率预测。确定性预测是指预测时段内集合平均值与历史同期多年平均值的距平百分率。时段平均的集合概率预测为三分类预测，指预测时段内累计径流量落在同期第 33.3%分位阈值以内、第 33.3%～第 66.7%分位阈值和超过第 66.7%分位阈值的成员个数百分比。多年平均值为 2006—2020 年平均的预测时段平均径流量，三分位阈值为 2006—2020 年预测时段内所有集合成员时段平均径流量样本序列的第 33.3%、第 66.7%分位阈值。

考虑到 11 月至次年 3 月黄河流域径流偏枯，用该时段历史回报的逐日径流序列定义干旱阈值。首先对所有集合成员 2006—2020 年 11 月至次年 3 月每个月 1 日起报的 1～40 d 的逐日径流进行 10 d 滑动平均，然后对滑动平均值按从小到大排序，计算第 15%、第 10%分位数值，分别对应 1 级干旱阈值、2 级干旱阈值。在此基础上，基于实时预测的 1～40 d 逐日径流计算 10 d 滑动平均值，通过式(1)计算 1、2 级干旱发生概率。

$$p_{\text{drought}} = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j}^{M} f(R_{ij})}{N \times M}$$

$$f(R_{ij}) = \begin{cases} 1 & R_{ij} \ll \text{Threshld}_{\text{drought}} \\ 0 & R_{ij} > \text{Threshld}_{\text{drought}} \end{cases} \quad (1)$$

式中：p 为极端径流发生概率；$\text{Threshld}_{\text{drought}}$ 为干旱阈值；N 为预测时段内的 10 d 滑动平均值个数，40 d 的预测共得到 30 个滑动平均值；M 为集合预

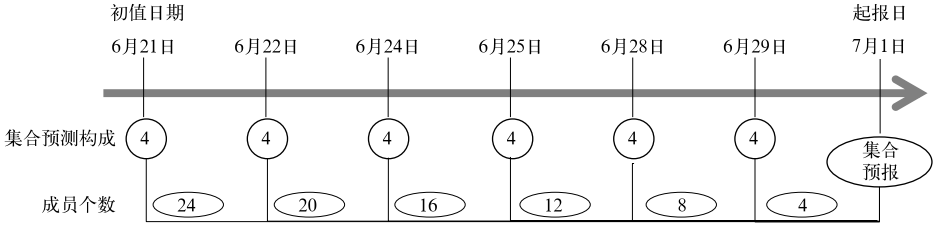


图 1 以 7 月 1 日起报为例的 CMA-CPS v3 气候模式耦合 HBV 水文模型的径流集合预测成员构成示意图

Fig. 1 An example of ensemble member of runoff prediction from 1 July by the CMA-CPS v3 S2S climate model and the HBV hydrological model

测成员个数,这里用 6 d 初始场、每天 4 个样本,共构成 24 个集合成员。

1.4　径流预测能力评估及其变化原因分析

用平均方差技巧评分(mean square skill score,MSSS)、距平相关系数(anomaly correlation coefficient,ACC)评估径流确定性预测技巧,相对操作特征曲线面积(area under the relative operating characteristic curve,AUC)评估三分类概率预测技巧。MSSS 越接近 1 预测技巧越高,小于 0 表示预测技巧低于多年平均值预测;ACC 正值表明预测偏差与观测偏差正相关,越接近 1 表示相关程度越高;AUC 在[−1,1],值越接近 1 预测技巧越高,0.5 表明无技巧。用这 3 个指标检验评估每个月 1～40 d 逐日径流,1～30 d、11～40 d 时段平均径流的预测技巧。在此基础上,用 12 个月 1～40 d 逐日径流预测技巧评分的算术平均值直观反映预测技巧随预测时效的变化。

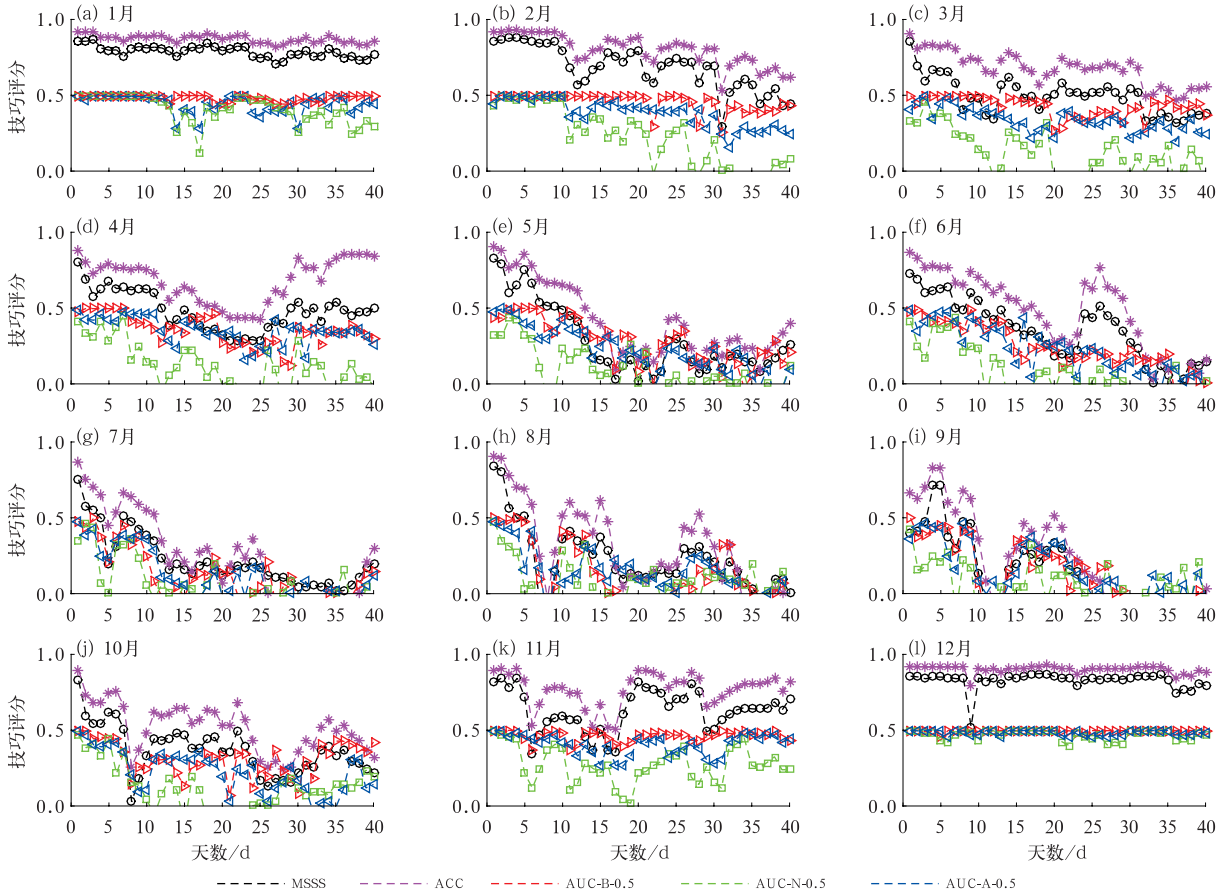
用布赖尔技巧评分(Brier score,BSS)评估干旱预测技巧。BSS 在[−1,1],值越大预测技巧越高,大于 0 表示预测技巧高于多年平均值预测。为了保证较多的极端事件样本,只评估由 24 个成员构成的集合预测性能,不评估 2、4、8、12、20 个成员的集合预测性能。考虑到干旱的时间持续性,用 10 d 滑动平均流量计算干旱概率。

在径流预测技巧评估基础上,通过对比观测降水和观测径流相关性、S2S 降水预测技巧和径流预测技巧的同期变化,进一步分析 S2S 模式降水预测能力对径流预测技巧的影响。

2　结果分析

2.1　径流回报能力评估

图 2 展示了黄河流域每月1日起报的 MSSS、ACC、AUC 随预测时效的逐日变化。由图可见,12 月



注:AUC-B-0.5、AUC-N-0.5、AUC-A-0.5 分别表示负异常级、正常级、正异常级的 AUC 值减去 0.5。

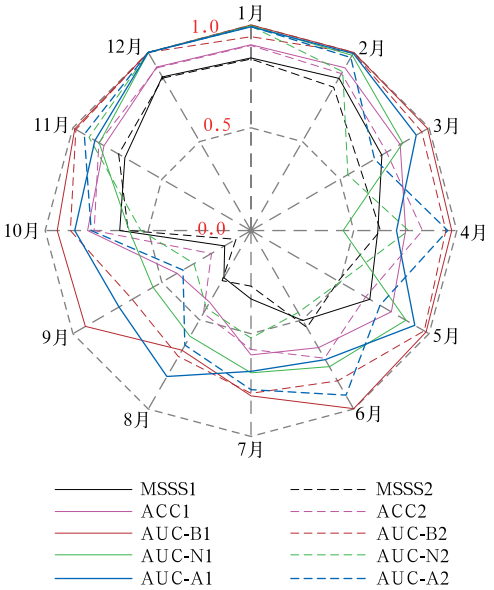
图 2　CMA-CPS v3 气候模式耦合 HBV 水文模型的 2006—2020 年 24 个成员的黄河流域逐月集合径流回报技巧评分随预测时效的变化

Fig. 2　Skill variation with lead time for the monthly ensemble runoff hindcast with 24 members in the Yellow River Basin during 2006−2020 by the CMA-CPS v3 S2S climate model and the HBV hydrological model

1 日和 1 月 1 日起报的未来 40 d 内的预测技巧随时间变化不明显，所有值接近 1.0；7、8、9 月 25 d 之后的 MSSS、ACC 预测技巧出现较多负值，AUC 低于 0.5；4、6、9、11 月时段内波动较大；其他月份下降趋势明显，但 MSSS、ACC 基本为正值，AUC 高于 0.5。总体呈现出预测技巧随预测时效延长逐渐降低的变化特征，1～30 d 预测技巧高于 11～40 d。冬季 3 个月（12、1、2 月）的预测技巧相对高，7、8、9 月的预测技巧相对低，其他月份处于中间（图 3）。对于三分类概率预测，1～30 d 的所有月份正异常级、负异常级、正常级的 AUC 平均值分别为 0.94、0.85、0.77，11～40 d 内的值分别为 0.89、0.81、0.66，表明异常级预测技巧通常高于正常级，正异常级预测技巧高于负异常级（图 3）。

图 4 展示了 4、8、12、16、20 个成员与 24 个成员的径流集合预测技巧之差。可以看出，9 月 16 个成员的 ACC 值最高，10 月 8 个成员的集合预测 MSSS 和 ACC 值最高，其余多数月份 MSSS 和 ACC 值通常随集合成员增多而增高，即 24 个成员时集合预测技巧最高，4 个成员时集合预测技巧最低。

对于干旱概率预测，表 2 列出了 11 月至次年 3 月干旱概率预测的 BSS 评分。其中，11 月至次年 2 月的预测技巧在 0.774～0.998，明显高于 3 月的



注：AUC-B、AUC-N、AUC-A 分别表示负异常级、正常级、正异常级，其后的 1、2 分别表示 1～30 d 和 11～40 d。

图 3 CMA-CPS v3 气候模式耦合 HBV 水文模型的 2006—2020 年 24 个成员的黄河流域逐月集合径流回报 1～30 d 和 11～40 d 技巧评分

Fig. 3 The 1－30 d 和 11－40 d skill scores for the monthly ensemble runoff hindcast with 24 members in the Yellow River Basin during 2006－2020 by the CMA-CPS v3 S2S climate model and the HBV hydrological model

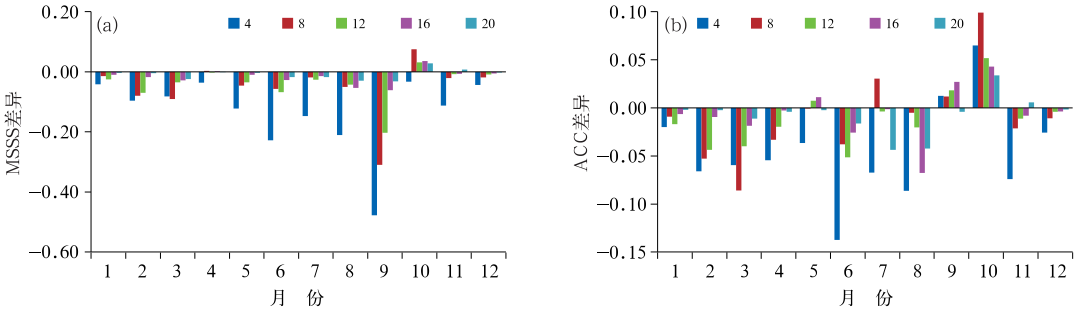


图 4 CMA-CPS v3 气候模式耦合 HBV 水文模型的 2006—2020 年 4、8、12、16、20 个成员与 24 个集合成员的黄河流域逐月集合径流回报之差

(a)MSSS，(b)ACC

Fig. 4 The difference of (a) MSSS and (b) ACC of the monthly ensemble runoff hindcast with 4, 8, 12, 16, 20 members relative to the 24 members in the Yellow River Basin during 2006－2020 by the CMA-CPS v3 S2S climate model and the HBV hydrological model

表 2 CMA-CPS v3 气候模式耦合 HBV 水文模型的 2006—2020 年 24 个成员的黄河流域干旱回报检验 BSS 值

Table 2 BSS of droughts hindcast with 24 members in the Yellow River Basin during 2006－2020 by the CMA-CPS v3 S2S climate model and the HBV hydrological model

干旱频率	1 月	2 月	3 月	11 月	12 月
15%（1 级）	0.986	0.874	0.010	0.997	0.998
10%（2 级）	0.936	0.774	—	0.998	0.920

注：“—”表示无技巧。

预测技巧,且发生频率较高的 1 级干旱预测技巧通常高于较少发生的 2 级干旱预测。

2.2　2021 年月径流异常预测检验

2.2.1　2021 年流域水资源异常实况

2021 年黄河经历了中上游的严重夏旱和中游的严重秋汛。5 月下旬至 8 月中旬,中等程度的气象干旱从甘肃南部局地逐步扩展到甘肃南部、宁夏、陕西中北部等地,部分地区出现了重旱甚至极旱,至 9 月底气象干旱基本解除(图 5)。持续干旱给当地的农业和水资源等带来了较大影响。上游的唐乃亥水文站在 7 月、8 月连续 2 个月出现流量偏枯,分别较 1956—2015 年同期均值偏少 14.4% 和 11.3%。9 月和 10 月受多次降水过程影响,黄河流域平均降水达 264.6 mm,较常年同期偏多 1.6 倍,为 1961 年以来历史同期最多,中下游出现严重秋汛,支流渭河、伊洛河、沁河发生有实测资料以来同期最大洪水。

2.2.2　2021 年地表水资源异常预测及与实况对比

图 6 给出了 2021 年 5—10 月黄河流域花园口以上集水区观测降水、预测降水、观测降水驱动的模拟径流、预测降水驱动的预测径流的逐月异常变化。图中显示,2021 年 5—10 月花园口以上集水区实况降水(实况模拟径流)在 5 月、7 月、8 月分别偏少 14.5%(13.7%)、26.7%(59.4%)、14.3%(52.5%),6 月、9 月、10 月依次偏多 2.2%(34.7%)、89.5%(29.3%)、172.4%(145.8%),二者均基本反映了 5—8 月气象干旱以及 9 月和 10 月水资源丰富、秋汛严重的情况。气候模式预测出了 5 月、7 月和 10 月的降水异常方向,但与 6 月、8 月、9 月实况降水异常方向相反。

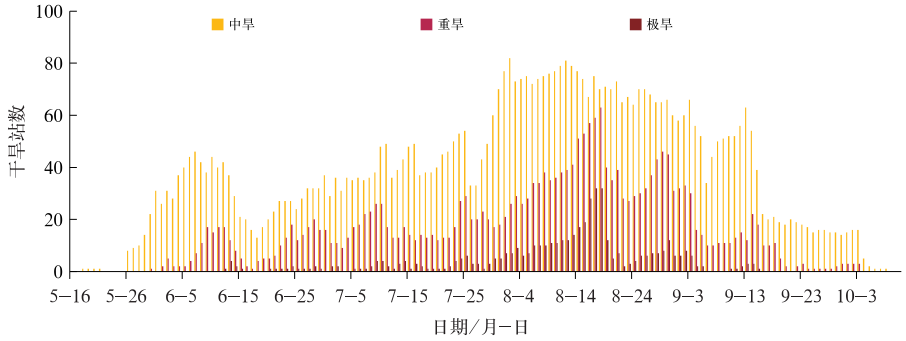
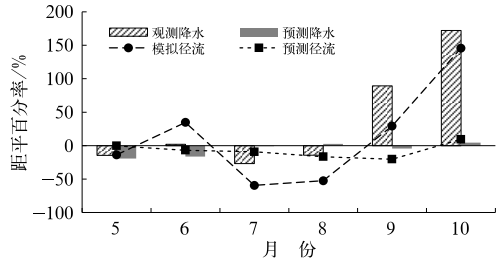


图 5　2021 年 5 月 16 日至 10 月 10 日黄河流域气象干旱站数逐日变化

Fig. 5　Daily number of meteorological drought stations in the Yellow River Basin from 16 May to 10 October 2021



注:预测降水量指 CMA-CPS v3 S2S 预测的降水量,模拟径流为观测气候驱动 HBV 水文模型的模拟结果,预测径流为 CMA-CPS v3 S2S 预测气候驱动 HBV 水文模型的模拟结果。

图 6　2021 年 5—10 月黄河花园口以上流域逐月观测降水量、预测降水量及模拟径流、预测径流的距平百分率

Fig. 6　Observed and predicted monthly precipitation in the upper-reach watershed of Huayuankou Station, as well as simulated and predicted runoff through Huayuankou Station from May to October 2021

5—10 月花园口站预测径流异常百分率分别为 −0.2%、−7.0%、−9.2%、−16.5%、−20.3%、9.5%,成功预测出了除 6 月、9 月外的其他 4 个月的径流异常方向,但异常程度存在差异。也就是说,气候模式和水文模型都没能成功预测 6 月和 9 月的降水和径流异常,但是尽管气候模式没能预测出 8 月降水异常方向,水文模型却提供了正确的径流异常预测方向。表明除了降水,径流预测技巧还受其他因素的影响(Yuan et al,2016;Liu et al,2021)。

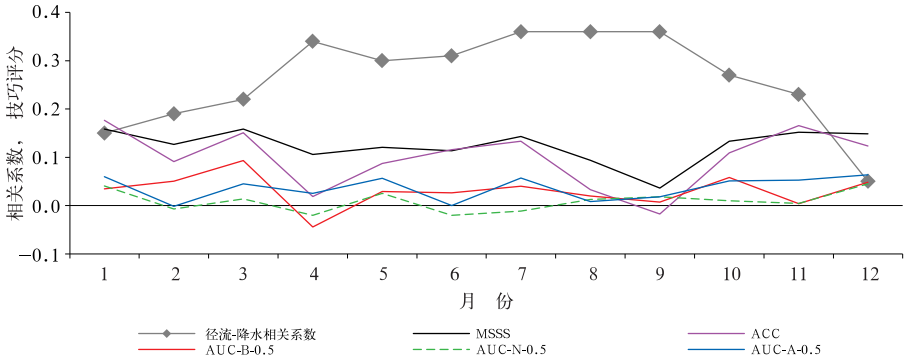
2.3　径流预测技巧变化原因分析

图 7 展示了 2006—2020 年每月 1 日起未来 40 d 的观测径流量和观测降水量的相关系数(以下简称降水径流系数),以及 24 个集合成员的径流回报预测技巧逐月变化,可以看出枯水期的径流预测技巧

高于丰水期，径流预测技巧年内变化与降水-径流相关系数变化互为反位相，即径流预测技巧低时降水-径流相关程度高，反之相关程度低。表明当降水对径流影响大时，S2S 模式预测降水偏差易导致径流预测技巧降低；而降水影响小时，预测技巧相对要高。

图 8 展示了 2006—2020 年 24 个集合成员的每月 1 日起未来 40 d 的径流量和降水量逐日预测技巧，可以看出径流量和降水量的预测技巧均随预测时效延长而下降，但降水量的三分类概率预测技巧在 2 个星期后几乎没有趋势性的变化。与降水相比，径流的预测技巧评分更高，其三分类预测技巧向下变化趋势更明显。表 3 给出了逐月回报的 1～30 d 的径流和降水回报预测技巧之差(11～40 d 图略)，可以看出径流预测技巧明显高于降水预测技巧。这些均表明，还有降水之外的其他因素在影响径流预测技巧。

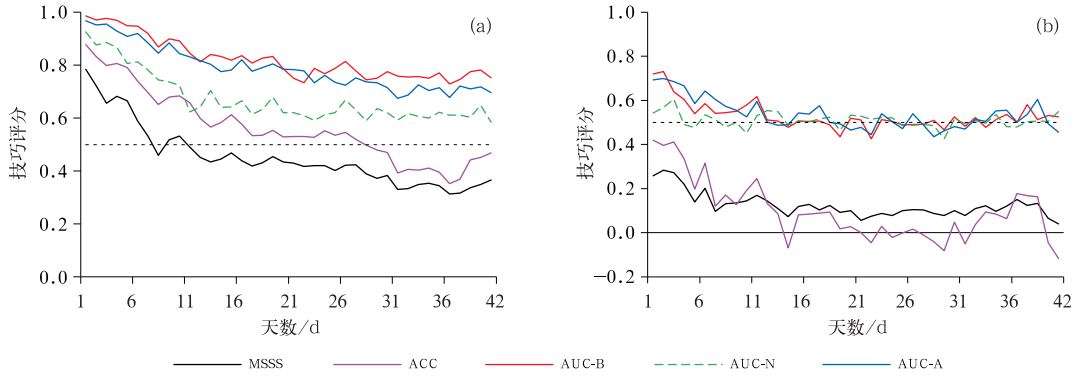
郝立生等(2020)和彭阳等(2021)认为水文初值



注：AUC-B-0.5、AUC-N-0.5、AUC-A-0.5 分别表示负异常级、正常级、正异常级的 AUC 值减去 0.5。

图 7 2006—2020 年每月 1 日起未来 40 d 黄河流域观测径流量和观测降水量相关系数，以及 CMA-CPS v3 S2S 气候模式耦合 HBV 水文模型的 24 个集合成员的径流回报预测技巧逐月变化

Fig. 7 Correlation coefficient between observed runoff and observed precipitation in the period of 1—40 d starting from the first day of each month and MSSS, ACC and AUC of the monthly runoff hindcast with 24 members in the Yellow River Basin during 2006—2020 by the CMA-CPS v3 S2S climate model and the HBV hydrological model



注：AUC-B、AUC-N、AUC-A 分别表示负异常级、正常级、正异常级。

图 8 CMA-CPS v3 S2S 气候模式耦合 HBV 水文模型的 2006—2020 年黄河流域 24 个集合成员的每月 1 日起未来 40 d 的(a)径流量、(b)降水量逐日回报预测技巧

Fig. 8 Daily forecasting skill of (a) runoff and (b) precipitation hindcast with 24 members for the period of 1—40 d starting from the first day of each month in the Yellow River Basin during 2006—2020 by the CMA-CPS v3 S2S climate model and the HBV hydrological model

表 3　CMA-CPS v3 S2S 气候模式耦合 HBV 水文模型的 2006—2020 年黄河流域 24 个集合成员的每月 1 日初起报的 1～30 d 径流预测技巧与降水回报预测技巧之差

Table 3　The skill difference between runoff and precipitation hindcasts for the period of 1－30 d starting from the first day of each month with 24 members in the Yellow River Basin during 2006－2020 by the CMA-CPS v3 S2S climate model and the HBV hydrological model

技巧评分	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
MSSS	0.675	0.698	0.674	0.740	0.694	0.744	0.694	0.741	0.809	0.689	0.667	0.674
ACC	0.734	0.776	0.752	0.904	0.758	0.826	0.776	0.857	0.925	0.754	0.695	0.729
AUC-B	0.475	0.430	0.388	0.546	0.448	0.481	0.468	0.481	0.485	0.439	0.497	0.436
AUC-N	0.434	0.501	0.478	0.516	0.472	0.524	0.523	0.487	0.471	0.477	0.483	0.450
AUC-A	0.411	0.485	0.444	0.478	0.412	0.501	0.412	0.483	0.474	0.438	0.435	0.415

和大气驱动是影响径流预测的主要因素,水文初始状态在枯水期对径流影响的持续时间比丰水期长,基于流量的干旱预测技巧可长达 1 个月。另外,预测时间为冬季且起报时 MJO 为强信号的情况下,多数 S2S 模式的 MJO 具有高预测技巧,而 MJO 可影响东亚副热带和中纬度地区的降水。结合这几方面的分析,在水文模型能够较好地模拟径流过程从而得到较好的水文初值的情况下,有理由认为 S2S 降水预测精度是影响丰水期径流预测水平的一个重要因素。

3　结论与讨论

基于 CMA-CPS v3 S2S 气候模式和 HBV 水文模型,尝试开展了黄河流域花园口站 1～40 d 的径流确定性预测、概率预测以及极端干旱概率预测,应用 WMO 推荐的几个指标定量评估了所建模型的预测技巧,得到如下结论:

(1)模型能够以较高的技巧提供未来 40 d 的时段平均的黄河流域径流预测信息。预测技巧总体上呈现随预测时效延长而下降的趋势,1～30 d 的预测技巧高于 11～40 d 预测,但逐日预测技巧不确定性高。

(2)集合成员个数对径流集合预测技巧有一定影响。在几个设计方案中,4 个成员的集合预测方案技巧低,24 个成员的集合预测方案技巧高。

(3)冬季预测技巧高于夏季预测技巧,异常级预测技巧高于正常级,正异常级预测技巧高于负异常级预测。S2S 降水模拟精度是影响丰水期径流预测准确性的一个重要因素。

(4)秋末和冬季各月干旱概率预测有一定预测技巧,出现频率高的 1 级干旱预测技巧高于出现频率较低的 2 级干旱预测。

本研究尝试分析了 40 d 内降水和径流日预测技巧的变化以及模式降水对径流预测能力的影响,丰富了 S2S 尺度上水文初值、大气驱动对径流预测影响的相关研究内容。预测技巧的逐日变化反映了当前 S2S 气候模式的预测水平,2 周特别是 3 周之后的逐日气候预测不确定性高,但时段平均的气候异常预测具有一定技巧 。虽然 BSS 对于小样本和罕见极端事件的检验评估具有一定局限性,但在预测用户能够根据预测干旱意见采取预防措施的情景下,集合预测的经济价值可达 60% (Fundel et al, 2013)。筛选更为合适的指标开展干旱预测和检验评估,以及改进气候预测模式,都有望提高径流异常预测的可靠性。

参考文献

丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等,2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报,66(5):808-825. Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al, 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming[J]. Acta Meteor Sin, 66(5):808-825(in Chinese).

董立凡,雷向杰,王倩,2016. HBV 模型在汉江流域的适用性研究[J]. 陕西气象,(4):23-26. Dong L F, Lei X J, Wang Q, 2016. Research on the suitability of HBV model in the Hanjing River Basin[J]. J Shaanxi Meteor,(4):23-26(in Chinese).

郝立生,Li T,马宁,等,2020. MJO 对 2018 年华北夏季降水的影响[J]. 大气科学,44(3):639-656. Hao L S, Li T, Ma N, et al, 2020. Influence of MJO on summer precipitation in North China in 2018[J]. Chin J Atmos Sci, 44(3):639-656(in Chinese).

李健,侯一筠,刘清容,等,2021. 台风"利奇马"对渤海风暴潮影响研究[J]. 海洋预报,38(1):35-43. Li J, Hou Y J, Liu Q R, et al, 2021. Research on the impact of Typhoon "Lekima" on storm surges in the Bohai Sea[J]. Mar Forecast, 38(1):35-43(in Chinese).

李晓岚,2020. 二十一世纪初极端天气气候事件特征研究[J]. 农村科学实验,(2):18-19. Li X L, 2020. Research on extreme weather

and climate events in the beginning of the 21st century[J]. Rural Sci Exp,(2):18-19(in Chinese).

米玛次仁,顿玉多吉,次旦央宗,2019. 基于HBV水文模型的青藏高原卡鲁雄曲流域径流预报[J]. 西藏科技,(8):60-64. Mi M C R, Dun Y D J,Ci D Y Z,2019. Runoff forecasting in the Karushionqu Basin based on HBV hydrological model[J]. Tibets Sci Technol,(8):60-64(in Chinese).

Mitton S,2008. 2003年欧洲热浪如何影响生态系统[J]. 黄矛,译. 科学观察,3(1):61-62. Mitton S,2008. How the European heat wave affected ecosystems in 2003[J]. Huang M,trans. Sci Focus,3(1):61-62(in Chinese).

彭阳,李晓静,姚永红,等,2021. 11个S2S模式对MJO预报效果的评估分析[J]. 气象科学,41(3):339-348. Peng Y,Li X J,Yao Y H,et al,2021. Predictability of the Madden-Julian oscillation in the subseasonal-to-seasonal prediction models[J]. J Meteor Sci,41(3):339-348(in Chinese).

齐艳军,容新尧,2014. 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,4(3):74-75. Qi Y J,Rong X Y,2014. Prospect and outlook of sub-seasonal to seasonal forecasting-review of sub-seasonal to seasonal meeting[J]. Adv Meteor Sci Technol,4(3):74-75(in Chinese).

任宏利,吴捷,赵崇博,等,2015. MJO预报研究进展[J]. 应用气象学报,26(6):658-668. Ren H L,Wu J,Zhao C B,et al,2015. Progresses of MJO prediction researches and developments[J]. J Appl Meteor Sci,26(6):658-668(in Chinese).

徐宗学,2009. 水文模型[M]. 北京:科学出版社:281-282. Xu Z X,2009. Hydrological Models[M]. Beijing:Science Press:281-282(in Chinese).

赵彦增,张建新,章树安,等,2007. HBV模型在淮河官寨流域的应用研究[J]. 水文,27(2):57-59,6. Zhao Y Z,Zhang J X,Zhang S A,et al,2007. Application of HBV model in the Guanzhai watershed of the Huaihe River Basin[J]. J China Hydrol,27(2):57-59,6(in Chinese).

周佰铨,翟盘茂,2023. 未来的极端天气气候与水文事件预估及其应对[J]. 气象,49(3):257-266. Zhou B Q,Zhai P M,2023. The future projections of extreme weather,climate and water events and strategic responses[J]. Meteor Mon,49(3):257-266(in Chinese).

Fundel F,Jörg-Hess S,Zappa M,2013. Monthly hydrometeorological ensemble prediction of streamflow droughts and corresponding drought indices[J]. Hydrol Earth Syst Sci,17(1):395-407.

Krysanova V,Bronstert A,Müller-Wohlfeil D I,1999. Modelling river discharge for large drainage basins:from lumped to distributed approach[J]. Hydrol Sci J,44(2):313-331.

Li W P,Zhang Y W,Shi X L,et al,2019. Development of land surface model BCC_AVIM2.0 and its preliminary performance in LS3MIP/CMIP6[J]. J Meteor Res,33(5):851-869.

Liu L L,Wu Y,Zhang P Q,et al,2021. Predictability of seasonal streamflow forecasting based on CSM:case studies of top three largest rivers in China[J]. Water,13(2):162.

Liu L L,Xiao C,Du L M,et al,2019. Extended-range Runoff forecasting using a one-way coupled climate-hydrological model:case studies of the Yiluo and Beijiang Rivers in China[J]. Water,11(6):1150.

Lu Y X,Wu T W,Xu X,et al,2020. Improved simulation of the Antarctic stratospheric final warming by modifying the orographic gravity wave parameterization in the Beijing climate Center atmospheric general circulation model[J]. Atmosphere,11(6):576.

Mahanama S P P,Koster R D,Reichle R H,et al,2008. The role of soil moisture initialization in subseasonal and seasonal streamflow prediction - a case study in Sri Lanka[J]. Adv Water Resour,31(10):1333-1343.

Nasim W,Amin A,Fahad S,et al,2018. Future risk assessment by estimating historical heat wave trends with projected heat accumulation using SimCLIM climate model in Pakistan[J]. Atmos Res,205:118-133.

Robertson A W,Kumar A,Peña M,et al,2015. Improving and promoting subseasonal to seasonal prediction[J]. Bull Amer Meteor Soc,96(3):ES49-ES53.

Vitart F,Ardilouze C,Bonet A,et al,2017. The subseasonal to seasonal(S2S) prediction project database[J]. Bull Amer Meteor Soc,98(1):163-173.

Wood A W,Lettenmaier D P,2008. An ensemble approach for attribution of hydrologic prediction uncertainty[J]. Geophys Res Lett,35(14):L14401.

Wu T W,Lu Y X,Fang Y J,et al,2019. The Beijing Climate Center Climate System Model(BCC-CSM):the main progress from CMIP5 to CMIP6[J]. Geosci Model Dev,12(4):1573-1600.

Wu T W,Zhang F,Zhang J,et al,2020. Beijing Climate Center Earth System Model version 1(BCC-ESM1):model description and evaluation of aerosol simulations[J]. Geosci Model Dev,13(3):977-1005.

Ying K R,Zhao T B,Zheng X G,et al,2016. Predictable signals in seasonal mean soil moisture simulated with observation-based atmospheric forcing over China[J]. Climate Dyn,47(7/8):2373-2395.

Yuan X,Ma F,Wang L Y,et al,2016. An experimental seasonal hydrological forecasting system over the Yellow River basin-Part Ⅰ:understanding the role of initial hydrological conditions[J]. Hydrol Earth Syst Sci,20(6):2437-2451.

(本文责编:王蕾 何晓欢)