

# Performance of Sub-Seasonal to Seasonal (S2S) Products for Global Precipitation Forecasts

Qian Lin<sup>1,2</sup>, Jie Chen<sup>1,2\*</sup>, Wei Li<sup>1,2</sup>, Xiangquan Li<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Hubei Provincial Key Lab of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: qianlin@whu.edu.cn, \*jiechen@whu.edu.cn

Received: Oct. 8<sup>th</sup>, 2019; accepted: Nov. 11<sup>th</sup>, 2019; published: Nov. 18<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

The Sub-seasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project is established by the World Weather Research Program (WWRP) and World Climate Research Program (WCRP) to fill the gap between medium-range weather and long-range or seasonal forecasts. In recent years, the S2S forecasts have become to apply in monsoon and cold wave prediction. However, the performance of S2S products in forecasting daily precipitation is not evaluated at the global scale. Accordingly, this study evaluated the S2S precipitation products from 10 forecasting centers using five evaluation metrics including correlation coefficient, absolute bias, probability of detection, false alarm ratio and Heidke's skill score, aimed to provide reference for the application of S2S precipitation products in hydrology, agriculture and other fields. The results show that the skill of S2S precipitation forecasts decrease with the increase of the lead time, and they almost have no forecasting skill after the 10th lead time. Within the lead time of 10 days, precipitation products from ECMWF, UKMO, KMA, CNR-ISAC models have higher predictability than those from other models, while the HMCR model consistently performs worse than other models in terms of forecasting daily precipitation for most regions of the world, other models perform moderately. In terms of the spatial distribution, precipitation products from KMA and UKMO models are better at capturing the characteristics of observed precipitation than other models in Australia, Northern Europe and East Asia, while other precipitation forecasts perform slightly poor.

## Keywords

Sub-Seasonal to Seasonal Forecast, S2S Precipitation Forecast, Prediction Ability, Spatial Variability

# S2S次季节到季节预报对全球降水预报的性能评价

林倩<sup>1,2</sup>, 陈杰<sup>1,2\*</sup>, 李威<sup>1,2</sup>, 李翔泉<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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

Email: qianlin@whu.edu.cn, \*jiechen@whu.edu.cn

作者简介: 林倩(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事气象水文预报方面的研究。

\*通讯作者。

收稿日期：2019年10月8日；录用日期：2019年11月11日；发布日期：2019年11月18日

## 摘要

次季节到季节(Sub-seasonal to Seasonal, S2S)预报研究项目是由世界天气研究计划和世界气候研究计划联合发起的,旨在弥补中长期天气预报到季节预测之间的空隙,近年来被逐步应用于季风、寒潮预报等领域,但目前尚无在全球尺度上针对S2S降水产品的预报能力进行评估的研究。本研究采用了相关系数、绝对值偏差、探测率、空报率、Heidke技巧评分指数5项评价指标,对全球10个预报中心生成的S2S降水产品进行了综合评价,以期为该数据产品在水文、农业等领域的应用提供参考。结果表明:S2S降水预报的预报能力随预见期的增长而逐渐降低,在第10天后几乎丧失了预报能力。在10天预见期内,ECMWF、UKMO、KMA、CNR-ISAC的降水产品与其它预报中心相比在全球大部分区域都具有更高的可预报性;而HMCR的降水产品在全球大部分区域的可预报性较低,其它模型表现居中。空间分布而言,KMA、UKMO的降水产品在澳大利亚、北欧、东亚能够很好地捕捉实际降水特征,而其余的降水预报表现略差。

## 关键词

次季节到季节预报, S2S降水预报, 预报能力, 空间变率

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在目前的气象业务中,天气预报关注的预报时效是两周,气候预测则关注月以上的时间尺度,所以两周至一个月之间的延伸期预报一直是气象业务的空白领域。由世界天气研究计划和世界气候研究计划联合发起的次季节到季节(Sub-seasonal to Seasonal, S2S)预测研究项目,主要研究两周到六十天尺度的预报,重点关注两周以上的预报[1],旨在改善次季节至季节尺度预报能力,填补中长期天气预报到季节预测之间的沟壑[2]。目前,次季节尺度的预报正处于相对早期的发展阶段,它关注的预见期较长,以至于大气初始条件在这一时间尺度上对预报提供的帮助较小;同时,这一时间尺度相对于海冰条件变化来说太短,其能提供的预报信息也较少。因此,要进行次季节预报尤其困难。与中期天气预报和季节性气候预测相比,它的进展相对较慢[3]。所以,一直以来次季节到季节尺度的气候预测都被认为是一个“预测沙漠”[2]。

目前,对S2S时间尺度上进行的研究还主要集中在气象方面。以往研究已评估了次季节预报对热浪预测[4]、水文预测[5]、水资源管理[6]、水电生产管理[7]、以及作物产量预测[8]等方面的潜力。近几年,国内外学者还分别对降水和气温[3]、寒潮[9]以及东亚地区夏季的气候变化过程[10]和澳大利亚夏季风异常[11]在次季节尺度上的预报进行了综合评估。此外,Bombardi等[12]采用了S2S研究项目中的三个全球模型验证了南美、东亚和澳大利亚北部雨季开始和结束日期的次季节预报能力;赵崇博、任宏利等人[13]对S2S模型BCC\_CSM1.2进行了全面评估。这些研究都表明S2S预报具有一定的可靠性,但进行熟练的预报还存在一定的难度。

为了开展不同S2S数据产品的比较与应用,全球11个预报中心共同建立了一个基于现有次季节尺度业务预报产品的S2S数据库,该数据库类似于TIGGE(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)为中期天气预报和CHFP(the Climate-System Historical Forecast project)为季节预报所建立的数据库[14]。在将S2S数据产品应用于

水文、农业等领域之前,需要对其在不同时空尺度上的预报能力进行综合评价,然而目前尚未发现对 S2S 降水预报在全球尺度上评价的相关文献。因此,本文采用了相关系数、绝对值偏差、探测率、空报率以及 Heidke 技巧评分指数 5 项指标,对 S2S 降水产品在全球尺度上的降水预报能力进行评价,以期对 S2S 降水预报产品在水文、农业等领域的应用提供一定参考。

## 2. 研究数据

### 2.1. S2S 数据

S2S 数据集包括预见期长达 62 天的近实时集合预报和回算集合预报数据。这些数据来自 11 个不同的预报中心,不同预报中心的模型设置存在差异,主要反映在时间范围、预报模式、预报频率等各方面,因此得到的预报产品也有所差异,具体见表 1。Vitart 等[15]对 S2S 数据库做了详细的介绍。

由于 JMA 的降水产品的预报频率小于其它的预报中心,故用于计算评价指标的样本点较少,可能会使得计算得到的结果的可靠性较低。因此,本文所使用的是除 JMA 外的 10 个预报中心的回算降水预报数据,所谓回算预报是指对过去一些特定的时间重新进行预报,用于校准实时预报。为了比较不同预报中心降水产品的预报能力,本文所选取的研究时段为各预报中心回算降水预报的公共预报时段,即 1999~2010 年。此外,由于各预报中心降水预报的时间范围不同,所以选取的数据为各预报中心的公共预报时间范围,包括起始日期在内,共有 30 天预见期的降水数据。由于各预报中心的预报频率不同,故各预报中心相同预见期用于计算评价指标的样本数量不同(例如,BoM 降水预报中心每个月预报 6 次,那么每个预见期所包含的 12 年的数据就有  $6 \times 12 \times 12 = 864$  个样本用于评价指标的计算)。另外, S2S 降水数据的水平分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。

**Table 1.** Model settings of the S2S forecast products

**表 1.** S2S 预报产品的模型设置

预报中心	预报模式	预报时段	预报时间范围	频率	海洋耦合	海冰耦合
BoM	固定	1981~2013	第 0~62 天	6 次/月	是	否
CMA	固定	1994~2014	第 0~60 天	1 次/日	是	是
ECCC	动态	1995~2012	第 0~32 天	1 次/周	否	否
ECMWF	动态	过去 20 年	第 0~46 天	2 次/周	是	否
HMCR	动态	1985~2010	第 0~61 天	1 次/周	否	否
CNR-ISAC	固定	1981~2010	第 0~31 天	1 次/5 天	否	否
JMA	固定	1981~2010	第 0~33 天	3 次/月	否	否
KMA	动态	1996~2009	第 0~60 天	4 次/月	是	是
CNRM	固定	1993~2014	第 0~61 天	2 次/月	是	是
NCEP	固定	1999~2010	第 0~44 天	1 次/日	是	是
UKMO	动态	1996~2009	第 0~60 天	4 次/月	是	是

### 2.2. GPCC 降水数据

本文用于分析 S2S 降水数据的预报能力的降水资料来自美国全球降水气候中心(Global Precipitation Climatology Centre, GPCC)。GPCC 是世界气象组织的官方降水数据中心,其降水数据的构建基于全球大约 85,000 个观测站点,通过插值得到的全球陆地格点化降水数据集[16]。本文所选用的全球日降水量数据的水平空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,由 GPCC 提供的数据的水平空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,该研究采用反距离权重法插值到空间分辨率为

0.5° × 0.5°。此外，选用的 GPCC 降水数据的时间跨度为 1999~2010 年。

### 3. 评价方法

为了比较 S2S 降水产品与 GPCC 降水数据在数量上的一致性和相关性，本文分别采用了绝对值偏差(absolute bias, ABias)和相关系数(correlation coefficient, R)这两个定量指标来进行评价。其中，相关系数表示 S2S 降水产品与 GPCC 降水数据之间的线性相关程度；绝对值偏差表示 S2S 降水产品相对于 GPCC 降水数据的偏差程度。S2S 降水产品对降水事件的探测能力采用探测率(Probability of Detection, POD)、空报率(False Alarm Ratio, FAR)以及 Heidke 技巧评分指数(Heidke's Skill Score, HSS)进行综合评定。其中探测率越高，表明 S2S 降水产品对降水事件的漏报程度越小；空报率越小，空报程度越小；Heidke 技巧评分指数综合反映 S2S 降水产品对降水事件是否发生的估计能力[17]，HSS 越高，越能更好的估计降水事件是否发生。

各指标的计算公式如下：

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

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

$$FAR = \frac{n_{10}}{n_{11} + n_{10}} \quad (3)$$

$$POD = \frac{n_{11}}{n_{11} + n_{01}} \quad (4)$$

$$HSS = \frac{2(n_{11} \cdot n_{00} + n_{10} \cdot n_{01})}{(n_{11} + n_{01})(n_{01} + n_{00}) + (n_{11} + n_{10})(n_{10} + n_{00})} \quad (5)$$

式中， $O_i$  和  $S_i$  分别表示第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 点 GPCC 和 S2S 产品的降水量，mm； $\bar{O}$  和  $\bar{S}$  分别表示 GPCC 和 S2S 产品的平均降水量，mm； $n$  表示样本点的个数； $n_{11}$  为 S2S 降水产品和 GPCC 降水数据均显示有雨的天数； $n_{10}$  为 S2S 降水产品显示有雨但 GPCC 降水数据显示无雨的天数； $n_{01}$  为 S2S 降水产品显示无雨但 GPCC 降水数据显示有雨的天数； $n_{00}$  为 GPCC 降水数据和 S2S 降水产品均显示无雨的天数；其中日降水的临界值为 0.1 mm (小于此值视为无雨，因为地面观测数据最高精度为 0.1 mm)。

根据以上公式，能够得到不同预见期(1~30 天)各中心降水预报的评价指标计算结果，并由此分析 S2S 降水产品在全球尺度上的降水预报能力。

## 4. 研究结果

### 4.1. S2S 降水预报能力随预见期的变化

为了评价各降水预报产品的表现随预见期的变化趋势，本研究首先绘制了 S2S 降水产品在不同区域各评价指标随预见期的变化趋势图。由于不同区域各评价指标的变化趋势具有很高的相似性，为了避免赘述，本文仅以东亚地区为例展示并分析各评价指标随预见期的变化趋势(见图 1)。其中，本研究用于计算东亚地区的评价指标的格点范围为 20°N~50°N, 100°E~145°E，且各评价指标的结果均为东亚地区所有格点的平均值。由图 1 可知，相关系数、探测率、Heidke 技巧评分指数随着预见期的增长而降低，而绝对值偏差、空报率随着预见期的增长而增长。总体而言，各评价指标的变化趋势随着预见期的增长都逐渐趋于平缓，且 S2S 降水产品对降水的预报

能力随着预见期的增长而降低，并逐渐丧失预报能力。

在东亚地区，预见期第 1 天 S2S 降水产品与 GPCC 降水数据具有较高的相关性，相关系数基本都在 0.6 以上；而在第 10 天以后大部分预报中心的降水产品的相关系数都降到了 0.2 以下。从误差方面来看，HMCR 的降水产品的绝对值偏差与其它预报中心相比较为分散。另外，在探测能力方面，探测率的计算结果较为分散，它的最高值和最低值相差了 0.4 左右，说明不同预报中心的降水产品对降水事件的漏报程度有较大差异；而且，在 30 天预见期内所有预报中心的降水产品的空报率都在 0.5 以下，说明它们在东亚地区对降水事件的空报程度均较小；此外，尽管 HMCR 的降水产品的探测率最高，但其空报率也最高，同时 HSS 最低，这是由于 HSS 反映的是 S2S 降水预报对降水事件是否发生的估计能力，不止包含漏报和空报的情况，还包含了正确预报的情况，是比空报率和探测率更加全面的评价探测能力的指标。

值得注意的是，在东亚地区，ECMWF 的降水产品在预见期第 11 天各评价指标均出现了突变的情况，预报能力显著下降，之后又回归原本的变化趋势，说明此时 ECMWF 的降水产品可能已丧失了预报能力。其余的 S2S 降水预报在预见期第 10 天之后各评价指标的下降趋势也都逐渐趋于平缓，且可预报性均处于较低水平。表明 10 天之后，各预报产品可能均已丧失了预报能力。相似的结果在前人[10] [11] [12]的研究中也得到了体现，故接下来在全球尺度对比不同降水预报产品时只分析前 10 天预见期的结果。

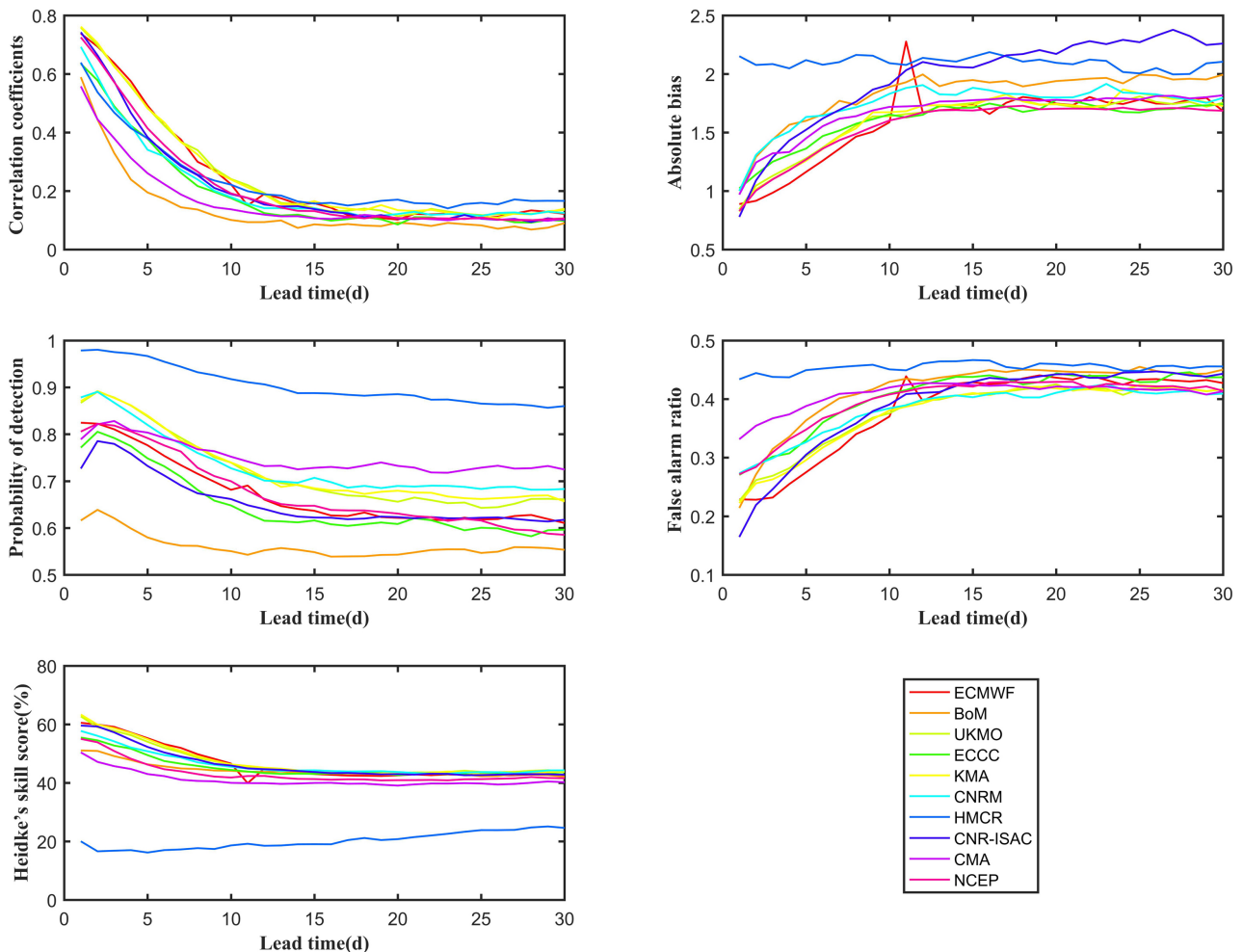


Figure 1. Changes of various evaluation metrics in terms of lead time over East Asia

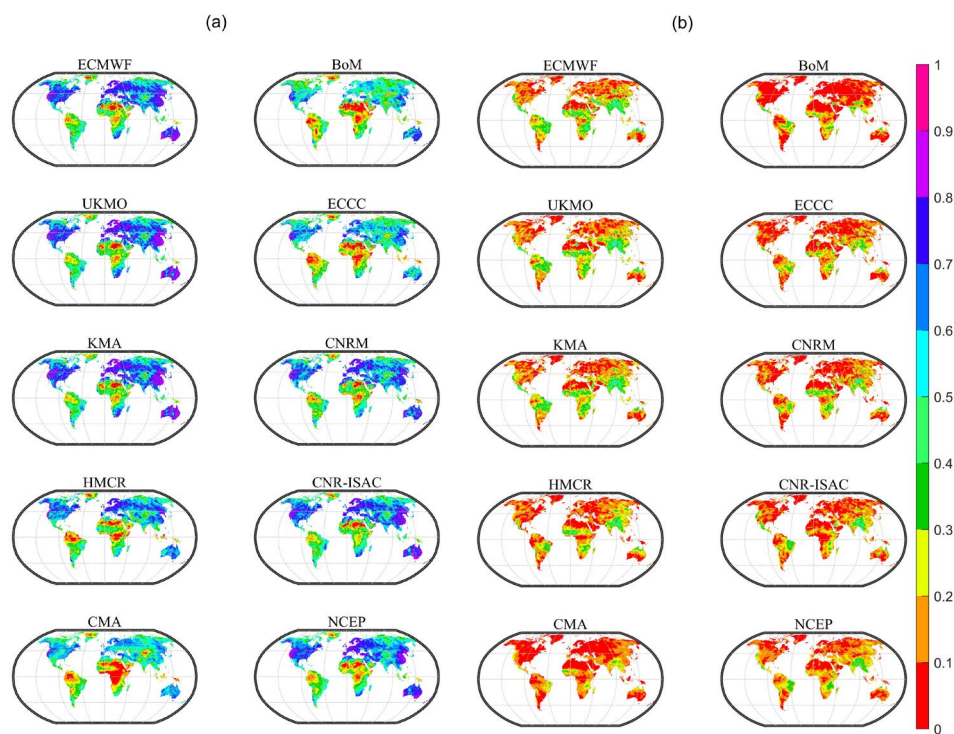
图 1. 东亚地区各评价指标随预见期的变化趋势图

## 4.2. S2S 降水预报产品在全球尺度的对比研究

由于不同预见期各预报中心降水预报评价指标的空间差异具有一定的相似性, 图 2~6 仅展示了预见期第 1 天和第 10 天 S2S 降水产品在研究区域内各评价指标结果空间分布用于对比研究。

预见期为 1 天时, ECMWF、UKMO、KMA、CNRM、CNR-ISAC、NCEP 的降水预报在北美大部分地区、东亚、欧洲、澳大利亚与 GPCC 降水数据均具有较高的相关性, 相关系数在 0.6~0.9 之间; 特别是在澳大利亚大部分地区, 以上各预报中心的降水数据与 GPCC 降水数据的相关系数均能够达到 0.7 以上; 但各预报中心的降水数据在非洲、南美洲大部分区域的相关系数均在 0.5 以下(见图 2)。

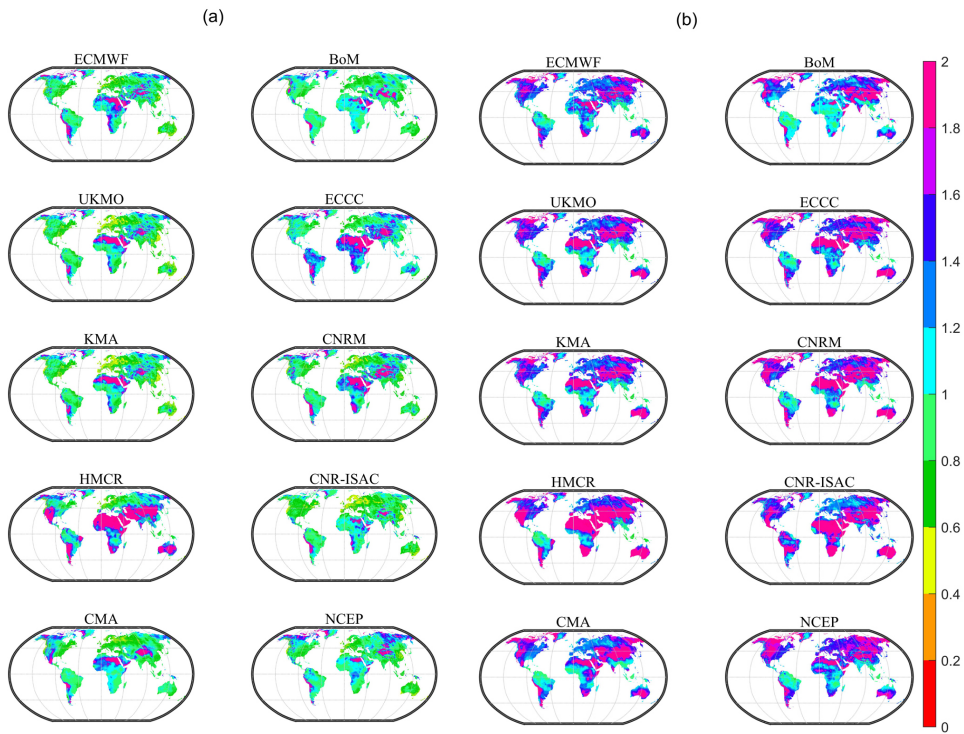
在偏差方面(见图 3), 除 HMCR、ECCC 外, 其它预报中心的降水产品在美洲、欧洲、澳大利亚以及亚洲的大部分区域的绝对值偏差在 0.6~1 之间, 而各预报中心的降水产品在撒哈拉沙漠区域的绝对值偏差均较大, 主要是因为撒哈拉沙漠地区的降水很少, 较小绝对偏差便表现出较大的相对偏差值, 实际上对于该地区来说降水预报意义不大。此外, HMCR 的降水产品的绝对值偏差在北美西部、撒哈拉沙漠地区、中亚、东亚、南亚、青藏高原、澳大利亚的大部分区域均较大; ECCC 的降水预报在撒哈拉沙漠和青藏高原地区具有与 HMCR 相似的情况。



**Figure 2.** Spatial distribution of correlation coefficients between forecast and observed daily precipitation for the 1<sup>st</sup> (a) and 10<sup>th</sup> (b) lead days

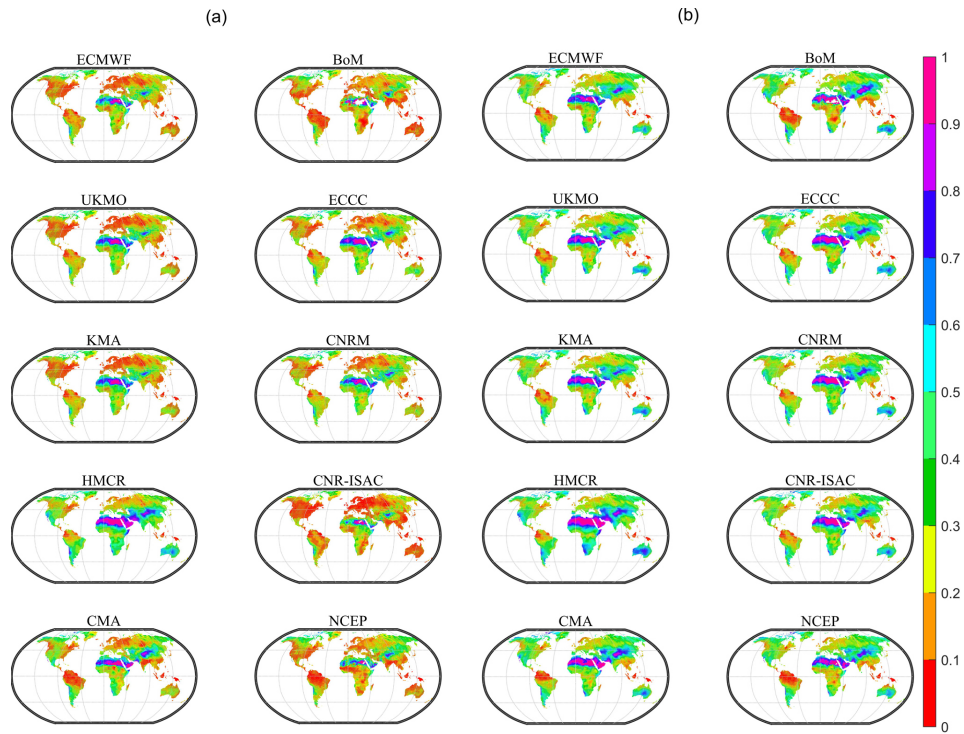
**图 2.** 各预报中心预见期为 1 天(a)和 10 天(b)的降水预报相关系数空间分布图

在探测能力方面, BoM、CMA、NCEP 的降水产品在亚马逊流域的大部分区域, 以及 ECMWF、UKMO、KMA、CNR-ISAC 的降水产品在北美和北欧的大部分地区的空报率均在 0.1 以下(见图 4), 说明这些预报中心在相应区域对降水事件空报的情况较少。从探测率来看(见图 5), ECMWF、UKMO、KMA、HMCR、CNRM 的降水产品在南美洲、除撒哈拉沙漠以外的非洲、亚洲大部分区域的探测率均能达到 0.9; 特别是 HMCR 的降水产品在全球大部分陆地区域的探测率均达到了 0.9, 其对降水事件发生的探测能力明显高于其它预报中心。从 HSS 来看(见图 6), ECMWF、UKMO、KMA、CNRM 的降水产品在非洲南部、澳大利亚、南亚、东亚大部分区域均



**Figure 3.** Spatial distribution of absolute bias of precipitation forecasted by 10 forecasting centers for the 1<sup>st</sup> (a) and 10<sup>th</sup> (b) lead days

**图 3.** 各预报中心预见期为 1 天(a)和 10 天(b)的降水预报绝对值偏差空间分布图



**Figure 4.** Spatial distribution of false alarm ratio of S2S precipitation forecasts from 10 forecasting centers at the 1<sup>st</sup> (a) and 10<sup>th</sup> (b) lead days

**图 4.** 各预报中心预见期为 1 天(a)和 10 天(b)的降水预报空报率空间分布图

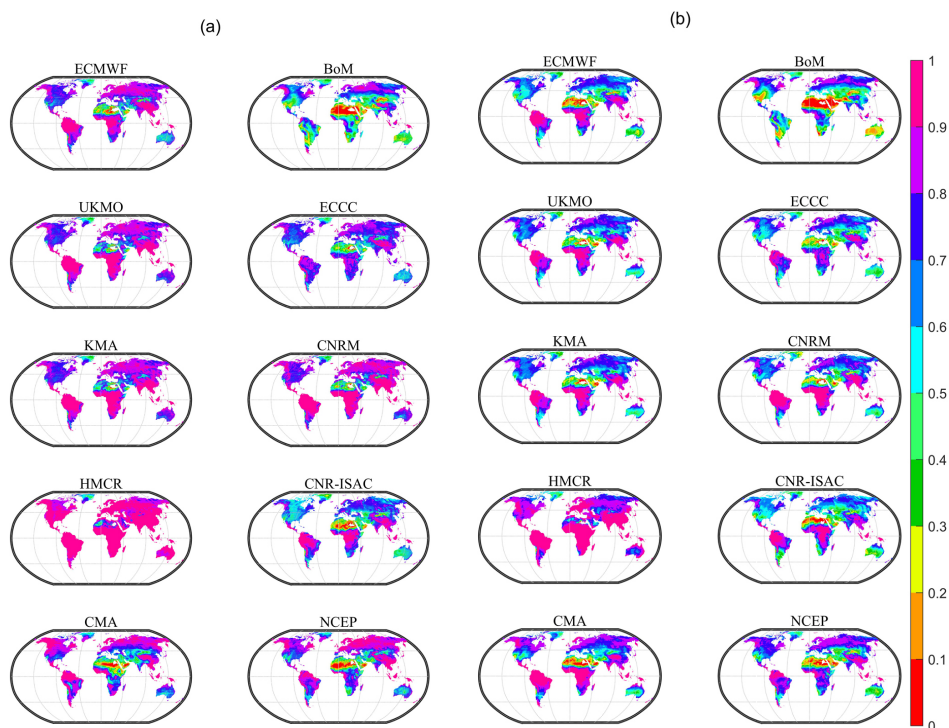


Figure 5. Spatial distribution of probability of detection of S2S precipitation forecasts from 10 forecasting centers at the 1<sup>st</sup> (a) and 10<sup>th</sup> (b) lead days

图 5. 各预报中心预见期为 1 天(a)和 10 天(b)的降水预报探测率空间分布图

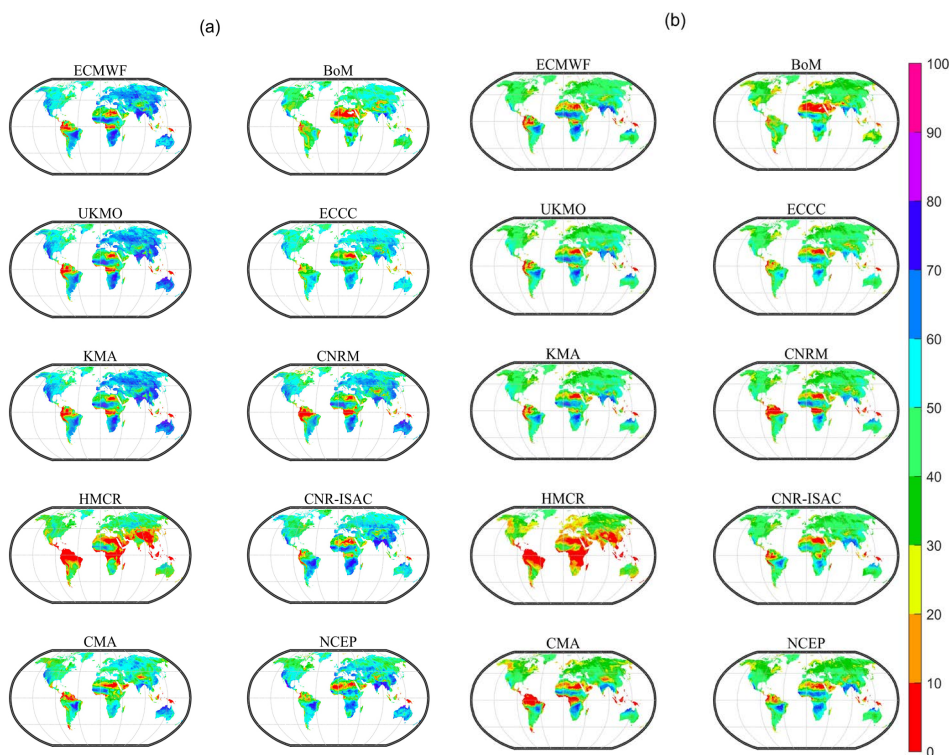


Figure 6. Spatial distribution of Heidke's skill score of S2S precipitation forecasts from 10 forecasting centers at the 1<sup>st</sup> (a) and 10<sup>th</sup> (b) lead days (Unit: %)

图 6. 各预报中心预见期为 1 天(a)和 10 天(b)的降水预报 HSS 技巧评分空间分布图(单位: %)



能达到 60%~80%，它们在相应区域对降水事件是否发生具有较好的预报能力；而 HMCR 的降水产品在东亚、青藏高原、亚马逊流域、非洲东部的大部分区域的 HSS 只有 10%。

总体而言，预见期为 1 天时，ECMWF、UKMO、KMA、CNR-ISAC 的降水预报具有相对更高的预报能力，其适用范围较大；而 HMCR 的降水预报在全球大部分区域表现较差，适用范围较小；其余预报中心的降水预报能力介于以上两种情况之间，且相差不大。此外，就空间分布而言，各预报中心的降水预报在北美洲、欧洲、亚洲、澳大利亚的表现较好，特别是 KMA、UKMO 的降水预报在澳大利亚、北欧、东亚的表现明显较好，然而在撒哈拉沙漠地区的表现均较差。预见期为 10 天时，不同预报中心降水产品的差异较小，与预见期第 1 天相比，对降水的预报能力显著下降，但是不同预报产品之间的差异与预见期为 1 天时较为一致。

## 5. 结论与展望

### 5.1. 结论

本文在全球尺度上，通过将 1999~2010 年的 S2S 回算降水预报数据和 GPCC 降水数据进行对比，分析了 S2S 对全球降水的预报能力，得到如下结论：

1) 在全球区域内，S2S 降水预报产品的预报能力随着预见期的增长而逐渐下降，在第 10 天以后变化趋于平缓且几乎丧失预报能力。

2) 在 10 天预见期内，ECMWF、UKMO、KMA、CNR-ISAC 的降水产品与其它预报中心相比在全球大部分区域都具有更好的预报能力，其适用范围较大；而 HMCR 的降水预报产品在全球大部分区域表现较差，适用范围较小；其余预报中心对降水的预报能力介于以上两者之间，且相差不大。

3) 就空间分布而言，在 10 天预见期内，各预报中心的降水预报在北美洲、欧洲、亚洲、澳大利亚的表现均较好，特别是 KMA、UKMO 的降水预报在澳大利亚、北欧、东亚的表现明显较好，而在其它地区表现略差。

### 5.2. 展望

本文的研究结论能为 S2S 降水预报产品在全球尺度上的应用提供了一定的参考。但本研究仅对 S2S 逐日降水数据的预报能力进行了评价，并未涉及降水过程，未能对如何利用 S2S 降水产品进行流域水文过程模拟进行研究，所以下一步拟通过偏差校正等方法将 S2S 降水预报产品应用于径流预报中，研究其对径流预报的可靠性。

## 基金项目

国家自然科学基金面上项目(51779176)，青年千人计划武汉大学高层次人才经费。

## 参考文献

- [1] 肖华东, 孙婧, 孙朝阳, 等. 中国气象局 S2S 数据归档中心设计及关键技术[J]. 应用气象学报, 2017, 28(5): 632-640. XIAO Huadong, SUN Jing, SUN Chaoyang, et al. Design of CMA S2S data archive center and key technology. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(5): 632-640. (in Chinese)
- [2] 齐艳军, 容新尧. 次季节 - 季节预报的应用前景[J]. 气象科技进展, 2014, 4(3): 74-75. QI Yanjun, RONG Xinyao. Application prospect of subseasonal to seasonal forecasting. Advances in Meteorological Science and Technology, 2014, 4(3): 74-75. (in Chinese)
- [3] TIAN, D., WOOD, E. F. and YUAN, X. CFSv2-based sub-seasonal precipitation and temperature forecast skill over the contiguous United States. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(3): 1477-1490. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1477-2017>
- [4] HUDSON, D., MARSHALL, A. G. and ALVES, O. Intraseasonal forecasting of the 2009 summer and winter Australian heat waves using POAMA. Weather and Forecasting, 2010, 26(26): 257-279. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-10-05041.1>
- [5] ORTH, R., SENEVIRATNE, S. I. Predictability of soil moisture and streamflow on subseasonal timescales: A case study.

- Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118(19): 10963-10979. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50846>
- [6] SANKARASUBRAMANIAN, A., LALL, U., DEVINENI, N., et al. The role of monthly updated climate forecasts in improving intraseasonal water allocation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(7): 1464-1482. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2122.1>
- [7] GARCÍA-MORALES, M. B., DUBUS, L. Forecasting precipitation for hydroelectric power management: How to exploit GCM's seasonal ensemble forecasts. *International Journal of Climatology*, 2010, 27(12): 1691-1705. <https://doi.org/10.1002/joc.1608>
- [8] ZINYENGERE, N., MHIZHA, T., MASHONJOWA, E., et al. Using seasonal climate forecasts to improve maize production decision support in Zimbabwe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1792-1799. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.07.015>
- [9] LI, Q. P., YANG, S., WU, T. W., et al. Sub-seasonal dynamical prediction of east Asian cold surges. *Weather and Forecasting*, 2017, 32(4): 1675-1694. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0209.1>
- [10] LIANG, P., LIN, H. Sub-seasonal prediction over East Asia during boreal summer using the ECCO monthly forecasting system. *Climate Dynamics*, 2017(50): 1007-1022. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3658-1>
- [11] MARSHALL, A. G., HENDON, H. H. Subseasonal prediction of Australian summer monsoon anomalies. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(24): 10913-10919. <https://doi.org/10.1002/2015GL067086>
- [12] BOMBARDI, R. J., PEGION, K. V., KINTER, J. L., et al. Sub-seasonal predictability of the onset and demise of the rainy season over monsoonal regions. *Frontiers in Earth Science*, 2017, 5: 14. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00014>
- [13] 赵崇博, 任宏利, 吴捷, 等. BCC\_CSM12 次季节 - 季节(S2S)预报历史回报的综合检验评价报告[R]. 北京: 中国气象局气候研究开放实验室, 2016.  
ZHAO Chongbo, REN Hongli, WU Jie, et al. Comprehensive evaluation reports of BCC\_CSM12 S2S. Beijing: Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, 2016. (in Chinese)
- [14] VITART, F., ROBERTSON, A. W. The sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events. *Climate and Atmospheric Science*, 2018, 1(1): 3-9. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0013-0>
- [15] VITART, F., ARDILOUZE, C., BONET, A., et al. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(1): 163-173. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0017.1>
- [16] BECKER, A., FINGER, P., MEYER-CHRISTOFFER, A., et al. A description of the global land-surface precipitation data products of the global precipitation climatology centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901-present. *Earth System Science Data Discussions*, 2012, 5(2): 921-998. <https://doi.org/10.5194/essdd-5-921-2012>
- [17] 杨雨蒙, 杜鹃, 程琳琳. TRMM 卫星降水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.  
YANG Yumeng, DU Juan and CHENG Linlin. Evaluation of accuracy and reliability of TRMM satellite precipitation data in Hunan Province. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(1): 26-32. (in Chinese)