

肖颖, 庞轶舒, 马振峰, 等, 2023. NCEP CFSv2 模式对川渝夏季降水次季节预测技巧评估及预报偏差分析[J]. 高原气象, 42(6): 1576–1588. XIAO Ying, PANG Yishu, MA Zhenfeng, et al, 2023. Sub-seasonal Forecasting Skills Assessment and Deviation Analysis of CFSv2 for Summer Precipitation in Sichuan and Chongqing[J]. Plateau Meteorology, 42(6): 1576–1588. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00007.

NCEP CFSv2 模式对川渝夏季降水次季节 预测技巧评估及预报偏差分析

肖颖¹, 庞轶舒², 马振峰², 陈权亮¹, 张正杰¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225;

2. 四川省气候中心, 四川 成都 610072)

摘要: 利用NCEP的第二代气候预测系统(CFSv2)提供的2000–2009年降水场历史回报试验资料以及川渝182个测站的降水实况资料。采用时间相关系数、均方根误差、距平相关系数、距平符号一致率以及PS评分等方法, 对模式在川渝地区夏季降水以及夏季降水异常的次季节尺度预测技巧进行检验, 并进一步分析了模式在概率密度和降水频次方面的预报偏差特征。结果表明: 该模式对川渝夏季降水的可用预报时效为3候左右, 能够较好地模拟出夏季降水的高值中心, 但量级偏大。预报技巧高值区主要位于四川盆地西北部及渝东北地区, 对攀西地区南部及川西高原部分地区也有一定的预报技巧。该模式也能够较好地把握川渝地区夏季降水异常偏少的趋势, 有效预报技巧为2候以内。模式各时效预报与观测的降水概率密度主要集中在10 mm以下量级; 模式预报各量级降水频次与实况相比均偏高得较为明显, 且随着预报时效延长, 偏差越大, 其中偏高最为明显的是小雨频次。

关键词: 预测技巧评估; 模式误差分析; 川渝夏季降水; 次季节–季节预报

文章编号: 1000-0534(2023)06-1576-13 **中图分类号:** P466 **文献标识码:** A

DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00007

1 引言

次季节–季节(Sub-seasonal to Seasonal, S2S)预测的时间尺度介于天气预报和季节预测之间, 是目前业务预报中的“预报缝隙”。由于同时受到大气初始条件、热带大气季节内振荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)以及海温等外强迫因子的影响(Lorenz, 1975), 其预测过程十分复杂, 预报结果也存在较大的不确定性(郭渠等, 2021)。

川渝地区位于我国的西南内陆, 地处青藏高原东侧, 该地区包括高原、盆地、山地、丘陵等不同的地貌(马振峰等, 2006; 王钦和曾波, 2022; 陈双等, 2022), 在西南季风、高原季风及高原背风坡系统的共同影响下(刘银峰等, 2009), 呈现出显著的

局地气候特征。夏季(6–8月)是川渝地区的主汛期(王连杰等, 2015), 降水变率大, 旱涝频繁(李永华等, 2016)。大气季节内振荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)作为重要的大气环流系统之一, 是次季节预测的重要预报因子。川渝地区地形独特, 季节内变化特征明显(王安英等, 2021), 而夏季降水的季节内变化又与大气季节内振荡具有显著的相关性(任雪娟等, 2020)。CFS(Climat Forecast System)是由NCEP开发的全耦合的海洋–陆地–大气动力季节预测系统, CFSv2是其第二代气候预报系统。该模式提供较长时间的历史回报, 有助于定量地分析与评价模式对区域气候特征的模拟能力(Kim et al, 2012; Luo et al, 2013; 朗杨, 2015), 目

收稿日期: 2022-08-22; 定稿日期: 2023-02-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(U20A2097); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J018); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(SCQXKJQN202214)

作者简介: 肖颖(1998–), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事气候预测研究. E-mail: 3200101074@stu.cuit.edu.cn

通信作者: 马振峰(1961–), 男, 内蒙四子王旗人, 研究员, 主要从事气候变化和气候预测研究. E-mail: mzf616@aliyun.com

前在业务中被广泛应用。陈官军等(2010)通过对 CFS 模式在东亚地区大气环流的预报技巧进行检验得出,该模式对强降水过程中起主要影响作用的环流系统低频振荡有一定的预报技巧。Seo et al(2009)发现 CFSv1 模式对 MJO 的可用预报技巧为 15~20 d。Liu and Wang(2015)发现最新一代的 CFSv2 模式可以达到 20 d。近年来异常天气事件频发,由气象灾害造成的损失不断加重(刘佳等,2014)。因此探讨川渝地区夏季降水的次季节预报技巧,对区域防灾减灾具有重大的现实意义。

为了填补中长期天气预报到季节预测之间的缝隙,各个国家相继发展出不同的 S2S 模式:如 BCC_CSM1.2 次季节-季节预报模式可以提供未来 0~60 d 的预报结果,DERF2.0 可以提供未来 0~56 d 的预报结果,NCEP CFSv2 可以提供未来 0~45 d 的预报结果等等。尽管模式发展取得长足进步,但模式误差客观存在。因此对 S2S 模式进行客观评估以及对 S2S 模式的预报能力进行分析,是获得有效的判别指标和提高预测水平的关键因素,可以为减小 S2S 模式的预报误差和改进 S2S 模式的预报能力做出必要的准备(尚可政等,2011)。众多学者(Vitart, 2017; White et al, 2017; Wang et al, 2016; 庞轶舒等, 2021; 郭渠等, 2021)对 S2S 模式的预测能力进行了评价。赵崇博等(2016)对 BCC_CSM1.2 次季节-季节预报模式进行了综合检验评估,全面地考察了该模式的 S2S 预报性能并探讨了 S2S 可预报性来源。何慧根等(2014)对 DERF2.0 在中国气温和降水的预测性能进行了评估,发现该模式对我国气温的预测能力较强,而对降水的预测能力相对较弱,但对极端旱涝年有一定的预测能力。Jiang et al(2013)分析了 CFSv2 模式在季节-年际尺度对亚洲夏季风的预测能力,发现 CFSv2 能够较好地预测出亚洲夏季风的特征。Lang et al(2014)利用相关系数、均方根误差和平均偏差,对各地区季节降水和气温的预测能力进行了评估,发现夏季降水的预测技巧最低。程智等(2016)基于 NCEP CFSv2 模式回报数据,检验评估了该模式对淮河流域夏季气温降水的预测能力,发现该模式对气温的模拟效果优于降水,能够反映出气象要素的空间结构,但不能很好地模拟降水的年际变化特征。Saha et al(2014)通过评估 GloSea5、CFSv2 等模式的预报能力,发现模式对全球海温场、高度场以及东亚季风都具有一定的预测技巧,但对东亚季风区降水的预报能力较低,预测效果具有明显的年际差异。黄小梅等(2016)研究发现,CFSv2 模式能够较好地预报

出影响我国夏季降水的 500 hPa 关键区环流异常空间模态,对中高纬环流的月预报技巧好于热带地区。为了减小模式预报的误差,对其偏差特征进行分析也显得尤为重要。范江琳等(2019)从概率和频次角度入手,分析了 SWC-WARMS 模式在西南区域的不同海拔地区与观测降水的差异特征。

综上所述,前人对次季节预测的理论基础、研究方法等做了大量的工作,但目前次季节预测在实际业务应用中还存在较大误差,特别是对于降水的预报技巧普遍较低。庞轶舒等(2021)评估分析了多种 S2S 模式对四川夏季极端降水的预测能力,发现各模式在川西高原的预测技巧较高,盆地东部、攀西地区预测技巧较低。因此无论是从发展天气-气候尺度的无缝隙预报的角度,还是从社会需求的角度,开展和实施 S2S 预测都具有重要的科学意义和广泛的社会应用价值(齐艳君和容新尧,2014)。尽管已有研究多侧重于分析 CFSv2 模式对大范围降水中心、季风系统特征的模拟,但对于该模式在川渝地区夏季降水的预报能力则关注得较少。关于模式对川渝地区夏季降水的统计学预测技巧、可用预报时效及误差特征等问题值得研究。本文基于 NCEP CFSv2 模式的历史回报数据,对我国川渝地区夏季降水 S2S 的统计学预测技巧进行系统性评估分析,以期为提高川渝地区汛期次季节预报水平作出必要的准备。

2 资料来源与方法介绍

2.1 资料来源及预处理

美国环境预报中心的第二代气候预测系统 CFSv2(Saha et al, 2014)是一个全耦合的海洋-陆地-大气动力季节预测系统,大气部分采用 NCEP 的全球预报系统模式(GFS),分辨率为 0.937° ,海洋部分采用 GFDL 的第四模块化海洋模式(MOM4),陆面部分采用四层 NOAH 陆面模式。该模式同时产生 3 种预测产品:4 个时段[00:00(世界时,下同),06:00,12:00 和 18:00]预报长度为 9 个月的预报;1 个时段(00:00)预报长度为 1 个季节的预报;3 个时段(06:00,12:00 和 18:00)预报长度为 45 天的预报(郎扬,2015)。

选取 2000—2009 年共 10 年 CFSv2 模式每日 4 个时次预报未来 45 天的历史回报资料,具体是每日 4 个时次做集合平均后的日降水预报结果。为探讨该模式的次季节预报能力,选取模式的提前时间为 1~5 候(5、10、15、20 和 25 天,分别简称为 LM1、LM2、LM3、LM4 和 LM5)的预测结果。以

提前1候为例,模式的起报时间为5.27~5.31日,对未来5天即6.1~6.5日的降水进行预报,提前2~5候以此类推。系统性评估模式对川渝地区夏季降水的统计学预测技巧。实况资料选用川渝地区182个气象站点的逐日降水观测资料,用于评估模式对川渝地区夏季降水的次季节预报能力。模式预报对于资料的精细化程度要求很高,分辨率越高,模式预报的准确率就越高。CFSv2模式的降水量预报为高斯格点分布,空间分辨率接近于 $1^\circ \times 1^\circ$ 。为了方便模式资料与观测资料进行比较,选取了尽可能多的气象站点数据,利用双线性插值法,将模式数据插值到如图1所示的站点上。文中涉及四川省和重庆市地图边界审图号为GS(2016)2556号,底图无修改。

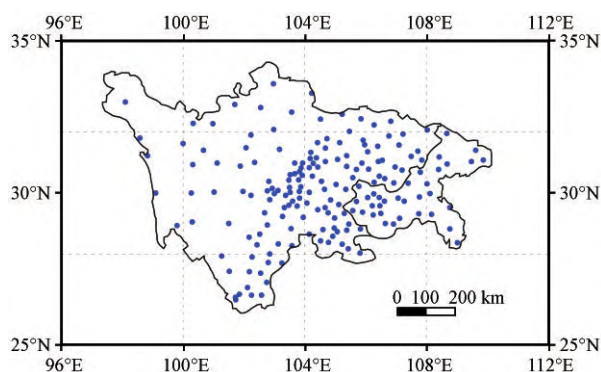


图1 川渝地区气象站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in Sichuan and Chongqing

2.2 检验评估方法

采用时间相关系数(Temporal Correlation Coefficient, TCC)、均方根误差(Root-Mean-Square Error, RMSE)、距平相关系数(Anomaly Correlation Coefficient, ACC)、符号一致率(Sign Coincidence Rate, SCR)以及PS评分5个评分指标。在计算各个评分之前,对川渝地区每年的夏季降水量做了平均处理,以此来定量评估模式对川渝地区夏季降水的次季节预报性能。 $x_{i,j}$ 和 $f_{i,j}$ 分别代表观测场和预测场,其中 $i=1, 2, 3, \dots, M$ 为评分总站数; $j=1, 2, 3, \dots, N$ 代表时间序列。

时间相关系数,是比较模式预测在同一格(站)点历史序列与观测的结果,能够在统计意义上较好地表征模式对各个格(站)点的预报能力,体现的是时间序列的位相相似性(赵崇博等, 2016)。

$$TCC = \frac{\sum_{j=1}^N (x_{i,j} - \bar{x}_i)(f_{i,j} - \bar{f}_i)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2} \times \sqrt{\sum_{j=1}^N (f_{i,j} - \bar{f}_i)^2}} \quad (1)$$

均方根误差,表征模式和观测之间的离散程度和一致性(李成程, 2018),体现的是模式与观测之间的误差大小。RMSE越大表明模式与观测之间的误差越大,即说明模式的预报能力越差。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (\Delta x_{i,j} - \bar{f}_{i,j})^2}{M}} \quad (2)$$

距平相关系数,是短期气候预测中最常用的检验方法之一,主要反映的是预报值与实况值空间型的相似程度(李清泉等, 2004),着重表现模式能否预测要素场空间分布特征的能力。

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^M (\Delta x_{i,j} - \bar{\Delta x}_j)(\Delta f_{i,j} - \bar{\Delta f}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (\Delta x_{i,j} - \bar{\Delta x}_j)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^M (\Delta f_{i,j} - \bar{\Delta f}_j)^2}} \quad (3)$$

式中: $\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{i,j}$, $\bar{f}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f_{i,j}$; $\Delta x_{i,j} = x_{i,j} - \bar{x}_i$; $\Delta f_{i,j} = f_{i,j} - \bar{f}_i$ 。

符号一致率,简称同号率。文中对距平符号一致率进行了分析,是指预测值与实况值的距平符号相同,或是有一个距平为0的气象站个数与评分的气象站总站数的百分比(何慧根等, 2014),主要体现的是预报值与实况值降水异常的相似程度。

$$SCR = \frac{N_t}{N} \times 100 \quad (4)$$

式中: N_t 为预测与实况距平符号相同的气象站站数; N 为气象站总站数。

趋势异常综合评分(PS),是比较预测与实况降水距平百分率(ΔR)的情况(王春学等, 2020),主要考察预报对气候趋势、一级异常($20\% < \Delta R \leq 50\%$ 、 $-50\% < \Delta R \leq -20\%$)、二级异常($\Delta R \leq -50\%$ 、 $\Delta R \geq 50\%$)以及漏报项的综合贡献。

$$PS = \frac{a \times N_0 + b \times N_1 + c \times N_2}{(N - N_0) + a \times N_0 + b \times N_1 + c \times N_2 + M} \times 100 \quad (5)$$

式中: N_0 、 N_1 和 N_2 分别为趋势预测正确的站数、一级异常预测正确的站数和二级异常预测正确的站数; a 、 b 、 c 分别为气候趋势项、一级异常项目和二级异常项的权重系数,分别取 $a=2$, $b=2$, $c=4$ 。 M 为漏报项(没有预测二级异常项而实况降水距平百分率超过 $\pm 100\%$ 的站数)。

3 结果分析

3.1 统计学预测技巧评估

3.1.1 川渝地区夏季降水特征

图2为川渝地区2000—2009年夏季平均降水量

的空间分布。从图2中可以看出,川渝地区多年夏季平均降水量东西分布差异明显,盆地地区的多年夏季平均降水量明显大于西部高原地区。多年夏季平均降水量大值区出现在四川盆地西南部雅安-峨眉山一带,达到了900 mm以上。川西高原由于受到地形和山脉走向的影响,其多年夏季平均降水量偏少,为200~400 mm。川渝东部地区由于地势平缓,属于湿润温暖的东南季风气候区,受亚热带季风影响,地势平缓,降水较多,为200~400 mm。

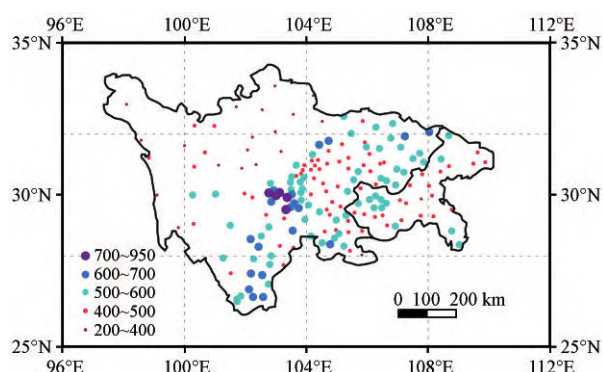


图2 2000—2009年川渝地区夏季平均降水量的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of annual mean summer prediction over Sichuan and Chongqing during 2000–2009

由以上对川渝地区多年夏季平均降水的空间分布分析可知,川渝地区的夏季降水存在明显的不均匀性。已有学者研究指出,川渝地区夏季降水量有3种主要的空间分布形态,分别为全区一致型、东-西部反位相型和南-北部反位相型(毛文书, 2010; 王鑫, 2010)。因此根据川渝独特的地形地貌和降水的空间分布差异特征,将川渝地区划分为3个子区域:即川西高原区(29个站点)、盆地中部区(84个站点)和盆地东部区(69个站点),分别探讨以上3个区域夏季降水的时间变化特征。

图3、4分别为2000—2009年川渝地区夏季降水的时间变化曲线及其变化趋势的空间分布。从图3和图4中可以看出,川西高原在2000—2009年夏季降水呈现出弱的减小趋势,其中巴塘站的减小趋势通过了0.1水平的显著性检验。川渝盆地中部地区的夏季降水也呈现出减小趋势,其中都江堰站点以及攀西地区越西、雷波和德昌站的减小趋势通过了0.1水平的显著性检验。川渝盆地东部地区夏季降水的变化趋势与盆地中部以及川西地区相反,呈现弱的增加趋势。

从图3中可以看出,川西高原和盆地中部2000—2009年夏季降水都呈现出减小趋势,盆地东部相反,呈现出增加趋势。

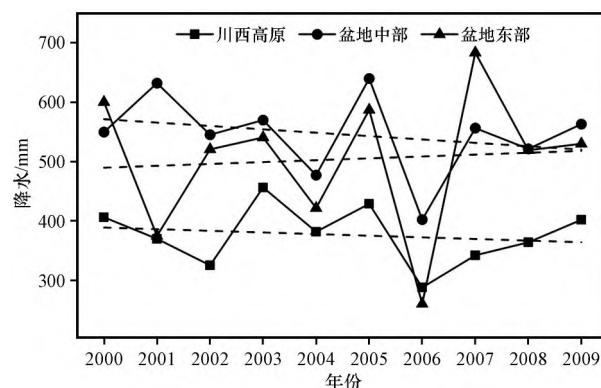


图3 2000—2009年川渝盆地东部、中部及川西高原夏季降水的时间变化

Fig. 3 Temporal variation of summer precipitation over eastern, central and western Sichuan-Chongqing Basin during 2000–2009

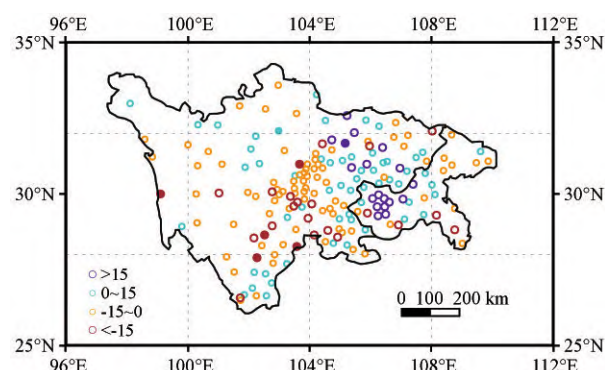


图4 2000—2009年川渝地区夏季降水变化趋势的空间分布
实心圆表示通过90%显著性水平检验的站点

Fig. 4 Spatial distribution of summer precipitation trends in Sichuan-Chongqing region during 2000–2009. Solid circles represent sites that pass the 90% significance level test

3.1.2 模式对川渝夏季平均降水的预测

图5为观测与模式各时效预测的2000—2009年夏季平均降水量的空间分布,其中观测记为OBS,模式提前1~5候起报分别记为LM1、LM2、LM3、LM4和LM5(下同)。从图5中可以看出,观测夏季降水量有明显的东西分布差异,整体呈现出东多西少、北少南多的分布形态,雨带主要位于四川盆地西南部雅安-峨眉山一带,高值中心达到了900 mm以上。模式预报的结果中,夏季降水的高值区位于四川盆地西南部及攀西地区,高值中心达到了1200 mm以上。由此可见,模式能够较好地预报出夏季降水的高值中心,但与实况相比位置偏南,范围更大,量级较实况偏大约300 mm,并对夏季降水实况所呈现出的东多西少的空间分布特征把握得不准确。模式提前1~5候预报的川渝夏季降水量与观测相比,在川西高原、攀西地区、盆地西北部 and

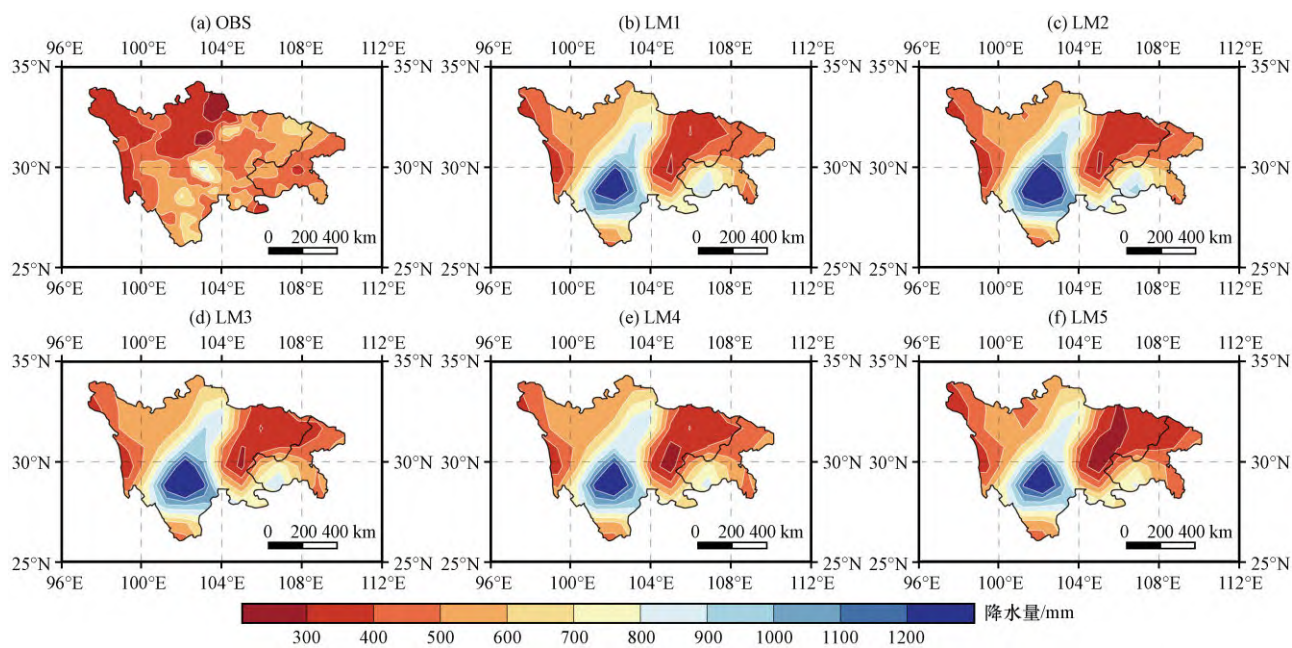


图5 观测与模式预测的川渝2000—2009年夏季平均降水量的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of summer precipitation in Sichuan and Chongqing during 2000–2009

西南部以及渝西南地区明显偏强,观测降水值大部在500 mm以下,而模式预报的结果大多数在600 mm以上,尤其是川西高原,观测到的夏季降水量小于300 mm,而模式预报的结果基本都在400 mm以上,由此可见模式预报存在明显的湿偏差;在四川盆地东北部和中部地区预报偏弱,观测夏季降水值在500 mm以上,而预报值在400 mm以下,模式预报存在干偏差,且随着预测时效的增加,盆地的干偏差增大。

3.1.3 时间相关系数(TCC)评估

从不同起报时间的TCC技巧空间分布(图6)可知,模式提前1~5候的预报技巧均为正值。模式提前1~3候起报的预报技巧高值区主要位于四川盆地西北部、东北部及渝东北地区,相关系数最高可达0.8以上,对于盆地西南部也有较高的预报技巧,而对川西高原的西南边缘及攀西地区北部的预报效果不理想,相关系数TCC以负值为主,表明模式对这些区域的预报能力较低。模式提前4~5候预报

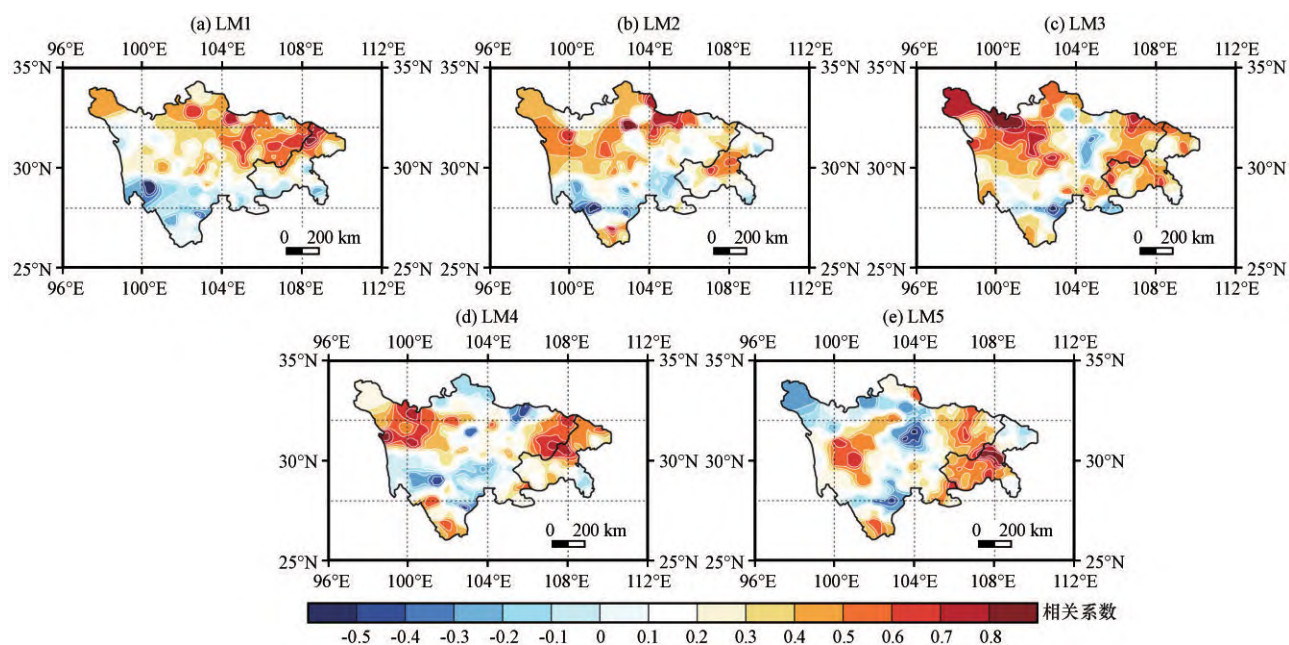


图6 CFSv2模式提前1~5候预报川渝夏季降水的时间相关系数(TCC)技巧

Fig. 6 Model-Observation Temporal Correlation Coefficient CFSv2 forecasts 1~5 pentads ahead LM1-LM5

的TCC负值增多,表明模式在提前20天开始,预报能力已经较差。由此得出CFSv2模式预测川渝夏季降水的结果在前3候都比较可信。

3.1.4 均方根误差(RMSE)评估

图7给出了模式提前1~5候预报与观测RMSE的空间分布。从图7中可以看出,模式各时效预测场与实况的均方根误差由西向东呈“小-大-小”的分布。均方根误差较小的地区主要位于川西高原西部、攀西地区南部以及渝东北地区,说明模式对这些地区预测效果较好,能够较好地模拟出夏季降

水的变化特征。而四川盆地西南部、盆地与川西高原的过渡区以及攀西北部地区的均方根误差则较大,表明模式对这些地区夏季降水的模拟结果与观测偏离最大。由于盆地西南部、盆地高原过渡带以及攀西北部均属于地形过渡带,高差悬殊较大,模式可能对这些地区的地形处理不够真实,导致预报能力较差。从川渝地区整体的RMSE变化来看,模式提前1候到2候的RMSE增加较为明显,模式提前3~5候预报与观测的RMSE变化平缓,这意味着该模式在2候以后便无法提取到有效的预测信号。

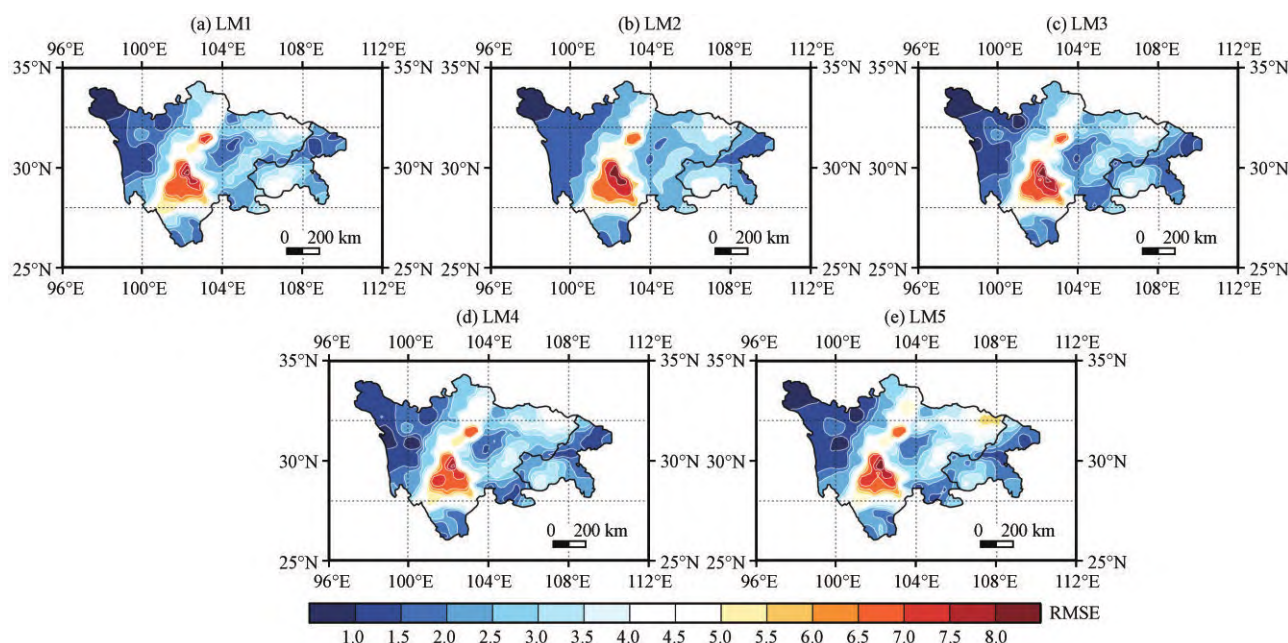


图7 CFSv2模式提前1~5候预报川渝夏季降水的均方根误差(RMSE)技巧

Fig. 7 Model-Observation Root-Mean-Square error CFSv2 forecasts 1~5 pentads ahead LM1-LM5

3.2 夏季降水异常的预测技巧检验

夏季降水异常是导致区域干旱或洪涝等灾害性天气的决定性因素(覃志年等, 2013),川渝地区的局地气候特征明显,其夏季灾害性天气频发。提前及准确地预测川渝夏季降水异常,对区域防灾减灾具有重大的科学意义。因此,检验模式对降水异常的预测能力就显得尤为重要。为了进一步分析模式对川渝地区主汛期降水异常的模拟能力,本章节采用距平相关系数、距平符号一致率以及趋势异常综合评分三种检验指标对模式在不同预报时效下的预报结果进行评估。

3.2.1 距平相关系数(ACC)检验

图8给出了模式提前1~5候预测川渝地区夏季降水的ACC年际变化。从图8中可以看出,模式预测的川渝地区夏季降水空间分布的效果具有年际振荡的特点,ACC技巧整体偏低,不同年份之间的技巧差异较大。其中2006年的ACC最高,均高于

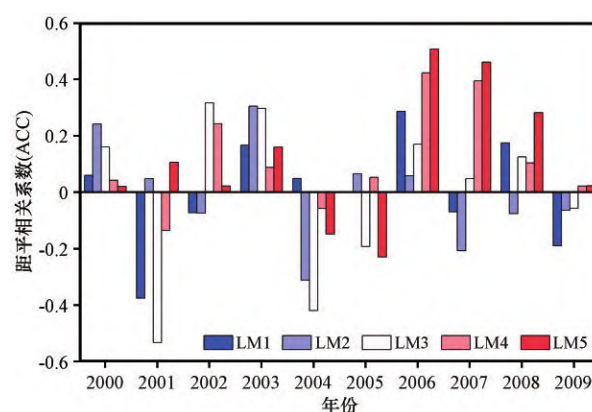


图8 模式提前1~5候预测川渝地区夏季降水的ACC技巧的时间序列

Fig. 8 Time series of ACC skills for forecasting summer precipitation in Sichuan-Chongqing region with CFSv2 1~5 pentads in advance

多年平均水平。模式在2006年提前1候、4候以及5候的ACC均达到最大值,分别为0.29、0.42和

0.51。而2006年夏季,川渝地区持续高温少雨,遭受了近年来最严重的干旱事件(刘银峰等,2006),说明模式对川渝地区季节干旱表现出较高的预测能力。其次,2000年、2003年及2007—2008年的ACC也较高,提前1~5候的ACC大都表现为正技巧且高于多年平均水平。其余年份模式则对川渝地区夏季降水空间分布的把握能力较低,ACC多表现为负技巧。总体来说,CFSv2模式对川渝地区夏季降水的总体预测能力较低,ACC的年际差异较大,模式的预测性能较不稳定。

3.2.2 距平符号一致率(SCR)检验

图9给出了模式提前1~5候预测结果与实况降水距平符号一致率的空间分布。从图9中可以看出,模式提前1候预测的川渝夏季降水异常趋势的效果最好,除了川西高原的西南和西北边缘、攀西以及盆地南部地区的距平符号一致率在50%以下

外,其余地区均在50%以上。盆地北部和西南部、川西高原以及渝东北的大多数地区的距平符号一致率达到了60%以上,尤其在渝东北的部分地区以及川西高原东北部地区,达到70%以上。LM2的预测效果减弱,四川盆地的大多数地区的距平符号一致率降为50%以下,特别是盆地中部以及东北部地区的符号一致率降至40%以下。LM3的距平符号一致率与LM2相比有所提高,大值区位于川西高原中部以及渝东南地区,模式提前3候预报这些地区夏季降水异常的能力较强,但对盆地中部和西北部的预报能力下降。LM4的距平符号一致率与LM3相比有所提高,大值区的范围与LM3一致。LM5整体的距平符号一致率下降,模式对川渝夏季降水异常的预测效果减弱。总体来看,模式提前1~5候对攀西地区南部的夏季降水异常也有一定的预报能力,但对攀西北部地区的夏季降水异常不具备预报能力。

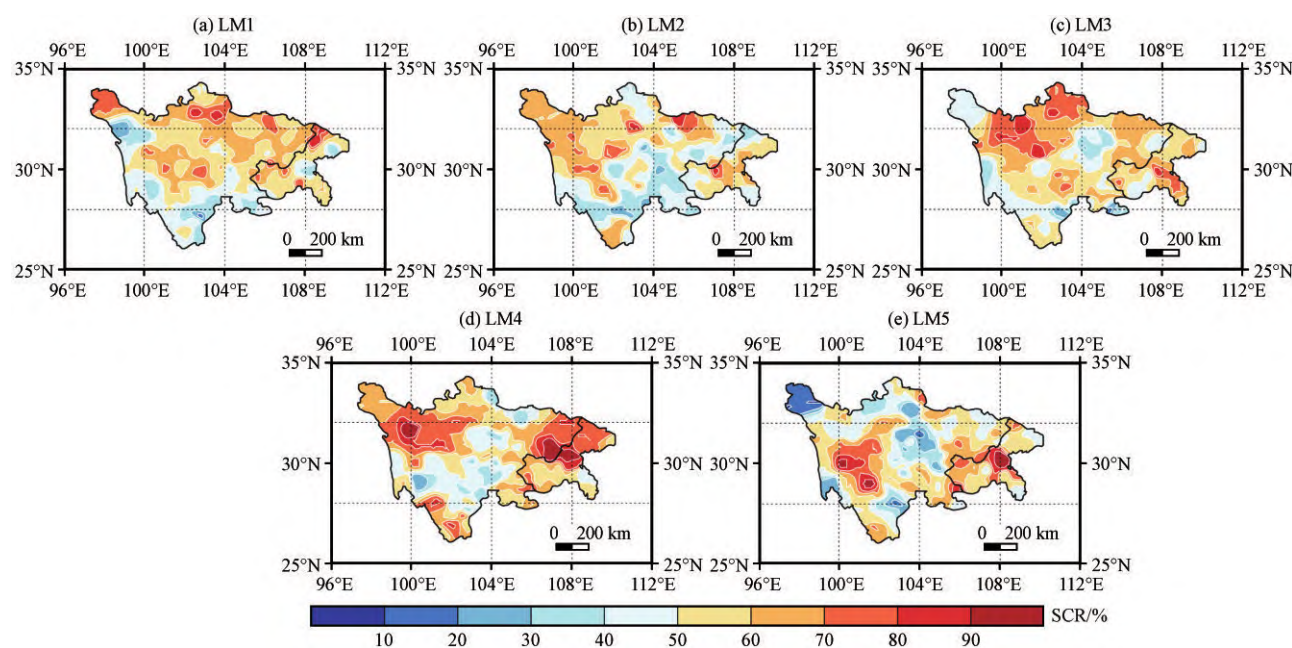


图9 CFSv2模式提前1~5候预测与观测的距平符号一致率空间分布(单位: %)

Fig. 9 Anomaly sign agreement rate of Model-Observation CFSv2 forecasts 1~5 pentads ahead LM1-LM5. Unit: %

图10给出了川渝地区夏季降水预测与实况距平符号一致率的年际变化。从图10中可以看出,大多数年份的距平符号一致率都较高,均达到了50%以上。其中2006年的距平符号一致率最高,除了LM2的评分偏低以外,其他预报时效的评分都在50%以上,尤其是LM1的评分高达90%以上,与ACC的结果相一致。由此可见CFSv2模式对2006年这种降水极端偏少年有较高预测技巧,且在5天以后,其预测能力明显下降。只有个别年份的效果较差,如2004年,LM1-LM5的距平符号一致率大都在50%以下,特别是LM1和LM2的评分只

有20%左右。其次是2001年,LM1和LM3的距平符号一致率都在40%以下。从多年平均水平来看,LM1、LM3和LM4预测川渝夏季降水异常趋势的效果最佳,其多年平均距平符号一致率均达到了55%以上,LM2和LM5的多年平均距平符号一致率在50%左右,其预测效果也较好。模式提前3候以上的预测结果可能存在一定的偶然性,由此可以得出该模式提前1候预测川渝夏季降水异常趋势的能力最佳,当预报时效超过1候时,其预测能力有所下降。

综合分析,无论是从距平符号一致率的空间分

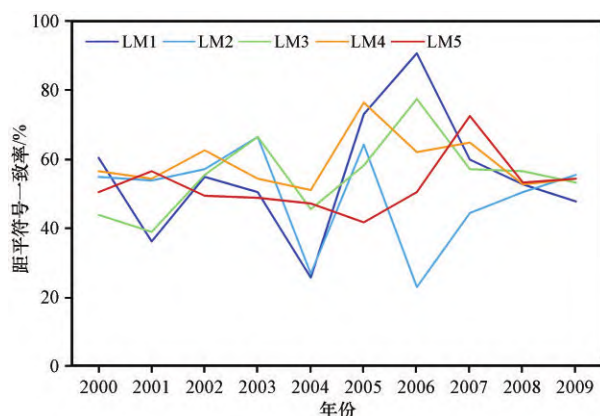


图 10 模式提前 1~5 候预测与观测的距平符号一致率
时间序列

Fig. 10 CFSv2 predicted by LM1~LM5 and
observation of PC time series

布还是年际变化来看, LM1~LM2 的符号一致率都下降明显, LM2~LM5 的符号一致率出现振荡, 因此判断模式提前 3 候及以上的预报存在一定的偶然性, 预测结果不可信。由此可以得出该模式预测川渝夏季降水异常的可用预报时间为 2 候。

3.2.3 趋势异常综合评分(PS)检验

图 11 给出了模式预测川渝地区夏季降水的 PS 评分年际变化。从图 11 中可以看出, 大多数年份的 PS 评分较高, 达到了 70 分以上, 表明模式对川渝地区夏季降水趋势异常的把握能力较强。其中 2006 年的 PS 评分最高, LM1 的 PS 评分高达 96 分以上。这与前面分析的 ACC 与 PC 结果一致, CFSv2 模式在 2006 年夏季的预报效果最佳, 由此得出该模式对川渝地区 2006 年这种夏季降水异常偏少的趋势把握得较为准确。个别年份的 PS 评分较低, 如 2001 年和 2004 年, PS 评分在 70 分以下, 其

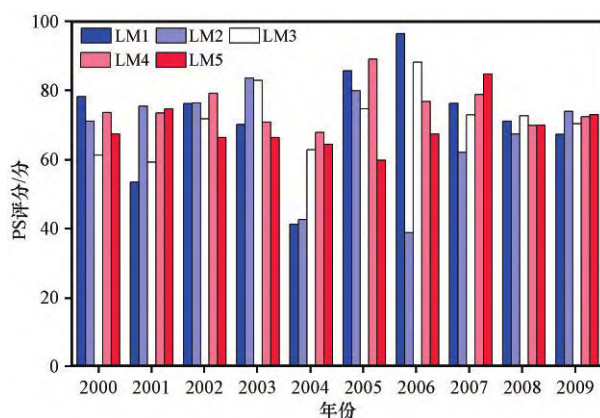


图 11 模式提前 1~5 候预测川渝地区夏季降水的 PS 评分的
时间序列

Fig. 11 Time series of PS scores for forecasting summer
precipitation in Sichuan-Chongqing region with
CFSv2 1~5 pentads in advance

中 2004 年 LM1 和 LM2 的 PS 评分只有 40 分左右, LM1~LM5 的 PS 评分均低于多年平均水平。从 PS 评分的多年平均水平来看, LM1~LM2 的 PS 评分明显下降, LM2~LM4 的 PS 评分出现振荡, 因此判断模式提前 3 候及以上的预报存在一定的偶然性, 预测结果不可信。由此可以得出, 模式对川渝夏季异常趋势的有效预测技巧为 2 候以内。

3.3 模式预报偏差分析

通过对模式预测性能的评估发现, 该模式对川渝夏季降水的模拟能力存在较大的不确定性。因此有必要对模式的预报偏差进行分析, 进一步了解模式预报的误差特征, 找出模式预报的不足之处, 为日后改进次季节尺度的预报提供有用的信息。

3.3.1 模式预报与观测降水的差值分析

图 12 给出了模式预报与观测的差值分布。从图 12 中可以看出, 模式提前 1~5 候预报的四川盆地西南部以及攀西地区北部的夏季降水异常偏多。由于盆地西南部位于盆地边缘, 紧邻川西高原和攀西高原, 模式对以上地区预报结果偏大的原因, 可能与模式本身对这些地区独特的地形处理不够真实有关。而对于四川盆地东北部、中部以及攀西南部地区的夏季降水, 模式提前 1~5 候预报的结果则偏少, 主要以负误差为主。随着预报时效的延长, 误差值逐渐增大, 其中模式提前 1~3 候的预报误差分布较为稳定, 模式提前时间在 3 候以上的预报误差偏大较为明显。由此得出该模式的可用预报时效为 3 候左右。

3.3.2 模式与观测降水的概率密度分布(PDF)

图 13 给出了川渝地区观测与模式在不同预报时效下的降水概率密度分布。从图 13 中可以看出, 川渝地区的观测和模式提前 1~5 候预报的降水概率密度分布的总体趋势一致。降水概率密度主要在 ≤ 10 mm 的雨量聚集, 并且随着量级的增大, 降水概率密度逐渐减小且趋于 0。从图 13 中还可以看出, 模式提前 1~5 候预报的降水概率密度分布, 在降水量为 12 mm 及以下的差异较大, 当降水量超过 12 mm 时, 模式提前 1~5 候预报的概率密度之间的差异逐渐变小。

对 CFSv2 模式对各个预报时效预报的概率密度进行分析发现, 模式在不同预报时效预报的降水概率密度曲线之间略有差异。当日降水量小于 2 mm 时, 模式提前 1~5 候预报的降水概率密度曲线始终位于观测的下方, 表明当降水量小于 2 mm 时, 模式在各个预报时效预报的概率较实况偏小。其中 LM1 的降水概率密度最接近于观测, 其次是 LM2,

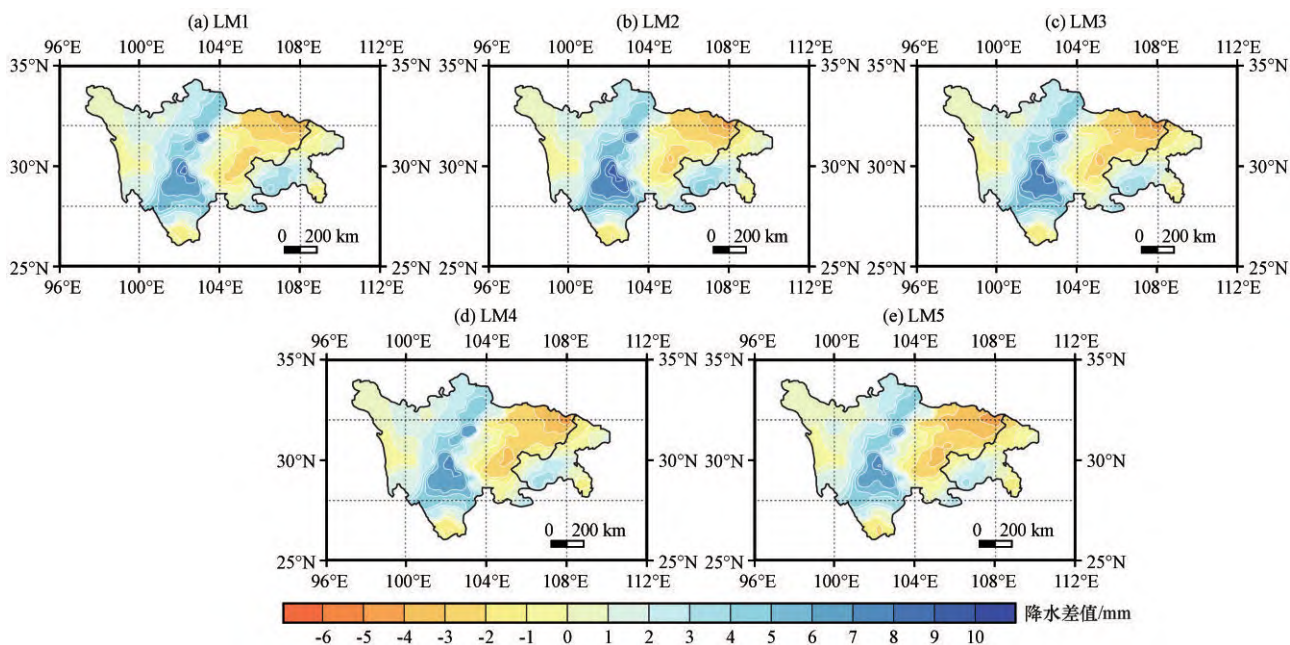


图 12 模式提前 1~5 候预报与观测降水差值的空间分布(单位: mm)

Fig. 12 Spatial distribution of the difference between the CFSv2 predicted by LM1-LM5 and observation CFSv2 forecasts 1~5 pentads ahead LM1-LM5. Unit: mm

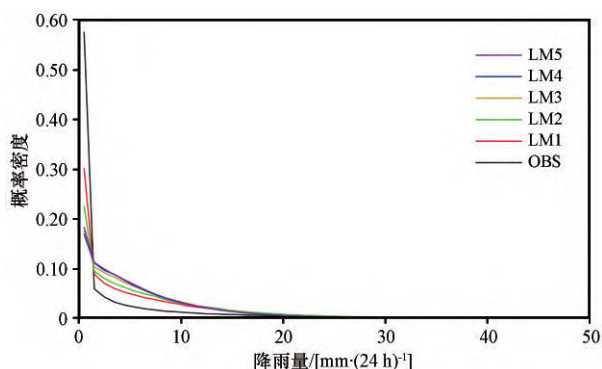


图 13 观测与模式提前 1~5 候预报的降水概率密度分布

Fig. 13 Precipitation probability density distribution of observation and CFSv2 predicted by LM1-LM5

随着预报时效的延长,模式预报的概率密度较观测偏小得更明显。而当降水量超过 2 mm 时,模式在各个预报时效预报的概率较实况偏大,且预报时效越长,偏大越明显。其中 LM1 的降水概率密度最接近于观测,其次是 LM2 和 LM3, LM4 和 LM5 的概率密度曲线近乎重合,表明当预报时效超过 3 候时便无法提取到有效的预测信号。当日降水量超过 20 mm 时,模式各时效预报的降水概率密度曲线与观测基本重合,说明模式各时效对 20 mm 以上量级的降水预报与实况的偏差较小。

3.3.3 模式预报与观测降水频次的对比分析

为了更深入地了解模式各时效预报降水的系统性误差,对观测和模式各时效预报的各量级降水频次空间分布的特征差异进行了对比分析。利用

川渝地区 182 个气象站的逐日降水观测资料,参考我国现行降水量等级划分标准,将降水频次定义为小雨(0.1~9.9 mm)、中雨(10~24.9 mm)、大雨(25~49.9 mm)或暴雨(≥ 50 mm)天数与总观测非缺测天数的比值(单位:%)。得出观测和模式各时效预报各量级降水频次的空间分布。

从实况各量级降水频次的空间分布[图 14(a)~(f)]可以看出,实况降水的小雨频次最高,随着降水量级的增大,降水频次逐渐减少,大雨及以上量级频次较低,均不超过 10%。从空间分布来看,小雨的高频次中心主要位于川西高原以及四川盆地周围的山区,这些地区的小雨频次均达到了 50% 以上,盆地西北部、西南部和攀西以及重庆的大部分地区次之,小雨频次在 35%~50%,四川盆地东北部和中部的地区的小雨频次最低,在 35% 以下。其次是中雨频次,从空间分布来看,中雨频次较高的地区主要位于川西高原的中东部和南部以及攀西地区北部,中雨频次在 15%~25%,与小雨频次相比,降低了 20% 左右,而川西高原东北部地区的中雨频次锐减,与小雨频次相比,下降了 40% 左右;四川盆地、攀西地区南部及重庆地区的中雨频次次之,在 5%~15%,与小雨频次相比,下降了 20% 左右。

随着降水量级的增大,降水频次的高值区逐渐向四川盆地和攀西地区以及重庆部分地区偏移,大雨频次的高值区主要位于攀西地区以及四川盆地西南部、中部和东北部地区,大雨频次在 5%~

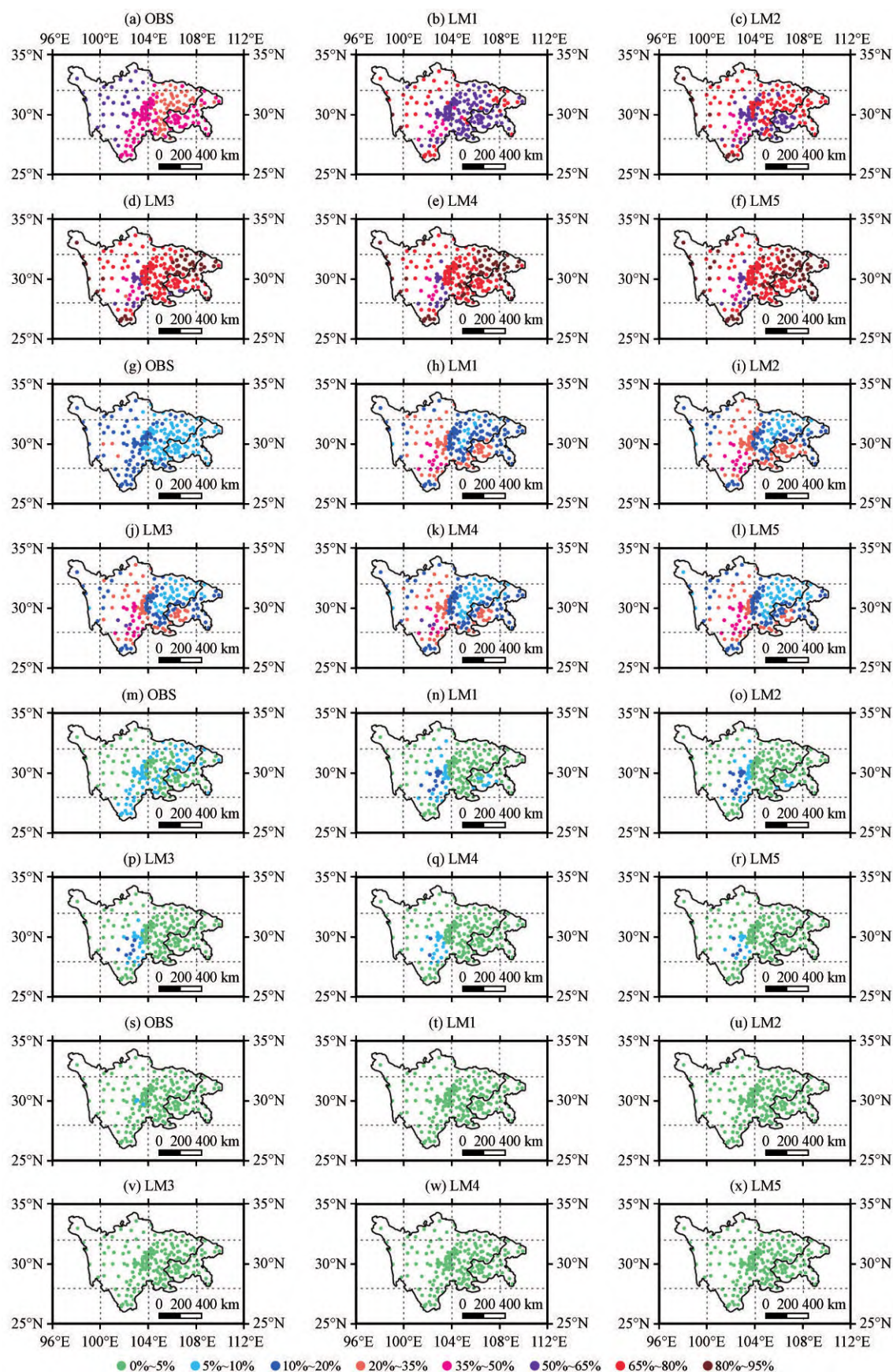


图 14 24 h 累积观测与模式提前 1~5 候预报小雨(a~f)、中雨(g~l)、大雨(m~f)、暴雨(s~x)频次的空间分布
 Fig. 14 Spatial distribution of precipitation frequency of light rain(a~f), moderate rain(g~l), heavy rain(m~f) and heavy rain (s~x) predicted by 24 h cumulative observation and model 1~5 pentads in advance

10%；而川西高原及重庆大部地区的大雨频次与中雨频次相比，有所降低，降低到5%以下。暴雨的高频次中心位于四川盆地西南部地区，雅安-峨眉山一带，其多年平均暴雨频次在7%左右；其次是四川盆地东北部及中部地区，暴雨频次在3%~6%；其余地区的暴雨频次都较低，均在3%以下。

从模式提前1~5候预报各量级降水频次的空间分布(图14)可以看出，模式预报的各量级降水频次与观测相比显著偏大，且随着预报时效的延长，偏大得越明显。其中模式预报的小雨频次偏大最明显，实况的多年平均小雨频次在20%~65%，而模式预报的小雨频次在35%~95%，整体偏大了20%以上。从模式提前1候预报川渝地区小雨频次的空间分布可以看出，模式对四川盆地西南部以及攀西地区北部小雨频次的预报最为准确，而对其余地区的预报偏差较大，小雨频次达到了50%以上，与实况相比小雨日数明显偏多。LM1预报的小雨高频次中心与观测一致，主要位于川西高原。随着预报时效的延长，模式预报的小雨频次高值区向东北(四川盆地东北部及渝东北地区)偏移，且预报时效越长，偏移越显著。模式各时效预报的小雨频次都在攀西地区南部出现了虚假高值中心，且高频次中心达到65%以上，LM2~LM5预报的高频次中心竟高达80%以上，与实况相比明显偏多，表明模式对攀西地区的小雨空报明显。对于模式提前1~5候预报川渝地区的中雨频次，模式各时效均能较好地预测出中雨频次的高值区，与观测一致，模式预报的高频次中心主要位于攀西北部及盆地西南部地区，但与实况相比明显偏大，并随着预报时效的延长，偏大得更显著。从空间分布来看，模式对四川盆地东北部、中部以及渝东北地区中雨频次的预报较为准确，与观测一致，这些地区的中雨频次都在5%~15%之间。但对四川盆地南部以及渝西南地区中雨频次的预报偏大，表明模式对以上地区中雨日数的预报偏多，模式预报存在湿偏差。

模式对川渝地区大雨及以上量级频次的预报与实况较为接近，偏差较小。模式各时效预报的大雨频次相差不大。预报的高值中心位于四川盆地西南部地区，与观测相比偏大5%左右。对攀西地区以及四川盆地东北部大雨频次的预报偏小，大雨日数与实况相比偏少。模式各时效预报的暴雨频次相差也不大，LM1~LM5预报川渝地区暴雨频次的大小均在0~3%。从空间分布来看，模式各时效对川渝地区大部分地区暴雨频次的预报较为准确，但对四川盆地西南部及东北部地区暴雨频次的预

报偏小，暴雨日数相对实况偏少。

4 结论

本文基于NCEP CFSv2模式2000—2009年的历史回报数据，采用5种模式性能检验评估方法，对模式预测川渝地区夏季降水的次季节预测能力进行了分析。结果表明，该模式对川渝地区夏季降水的次季节预测能力整体偏低，模式的预测性能较不稳定。具体结论如下：

(1) 从模式预测川渝地区夏季降水的量级来看，针对川渝夏季降水实况分布不均匀的特点，模式在川渝各子区域的预报偏差也呈现出不均匀分布的特征。对于川西高原与盆地中部的夏季降水，模式预报的量级与实况相比偏大；而对于盆地东部的夏季降水，模式预报的量级则偏小。模式能够较好地预测出夏季降水的高值中心，但与实况相比位置偏南，范围偏大。

(2) 从模式预测技巧的空间分布特征来看，模式预报的高技巧区主要位于四川盆地西北部、川西高原、攀西地区南部以及渝东北地区；低技巧区主要位于四川盆地西南部及攀西北部地区。总体来看，模式的预测技巧表现在川西高原较高，盆地东部次之，盆地中部最低。

(3) 从模式的有效预报时效来看，模式预测川渝夏季降水的有效预报时间为3候(15天)左右。模式对川渝地区夏季降水异常的可用预报时间为2候(10天)以内。模式能够较好地把握川渝地区夏季降水异常偏少的趋势。对2006年川渝地区的极端干旱年，模式提前1候预报与观测之间的距平相关系数、距平符号一致率以及PS评分分别达到0.29、91%和96分。

(4) 从模式预报川渝夏季降水的概率和频次角度来看，模式预报与观测的降水概率密度主要在10 mm以下雨量集中。对于24 h累积降水量在2 mm以下量级的降水，模式各时效预报的降水概率密度均比实况偏小；对于2 mm以上量级的降水，模式各时效预报的降水概率密度与实况相比偏大。且随着预报时效的延长，偏差更为明显。模式预报各量级降水频次与实况相比均偏高得较为明显，且随着预报时效延长，偏差越大，其中偏高最为明显的是小雨频次。

本研究使用多种模式预报性能评估方法，对CFSv2模式川渝地区夏季降水以及夏季降水异常的次季节预报能力进行了评估，并从概率和频次两个

角度分析了模式与实况降水的偏差特征。但该工作尚处于预报技巧和误差评估分析阶段。总体来看,NCEP CFSv2 模式对我国川渝地区夏季降水具备一定的预报能力,例如模式能够较好地模拟出川渝夏季降水的高值中心。但模式的预测性能较不稳定,例如距平相关系数(ACC)的年际差异较大。此外,模式对于川渝夏季降水实况所呈现出的“东多西少”的特征把握得不准确,特别是对于川渝盆地东部这一地区的可预报性问题还有待进一步讨论。日后将在此工作的基础上,结合川渝地区的地形差异特征,开展模式误差的订正工作,为提高模式的预报水平作充分的准备。

参考文献:

- Jiang X W, Yang S, Li Y Q, 2013. Seasonal-to-interannual prediction of the Asian summer monsoon in the NCEP climate forecast system version 2[J]. *Journal of Climate*, 26(3): 3708–3727. DOI: 10.1175/jcli-d-12-00437. 1.
- Kim H M, Webster P J, Curry J A, 2012. Seasonal prediction skill of ECMWF system 4 and NCEP CFSv2 retrospective forecast for the Northern Hemisphere Winter [J]. *Climate Dynamics*, 39: 2957–2973. DOI: 10.1007/s00382-012-1364-6.
- Lang Y, Ye A Z, Gong W, et al, 2014. Evaluating skill of seasonal precipitation and temperature predictions of NCEP CFSv2 forecasts over 17 hydro climatic regions in China[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 15(4): 1546–1559. DOI: 10.1175/jhm-d-13-0208. 1.
- Liu R F, Wang W, 2015. Multi-week prediction of South-East Asia rainfall variability during boreal summer in CFSv2[J]. *Climate Dynamics*, 45(1–2), 493–509.
- Lorenz E, 1975. The physical basis of climate and climate modelling climatic predictability[M]. WMO GARP Publication Series, 16, p. 132–136.
- Luo L F, Tang W, Lin Z H, et al, 2013. Evaluation of summer temperature and precipitation predictions for NCEP CFSv2 retrospective forecast over China[J]. *Climate Dynamics*, 41(7): 2213–2230. DOI: 10.1007/s00382-013-1927-1.
- Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al, 2014. The NCEP climate forecast system version2[J]. *Journal of Climate*, 27(6): 2185–2208.
- Seo K H, Wang W, Gottschalck J, et al, 2009. Evaluation of MJO forecast skill from several statistical and dynamical forecast models [J]. *Journal of Climate*, 22, 2372–388. DOI: 10.1175/2008JCLI2421. 1.
- Vitart F, 2017. Madden-Julian Qscillation prediction and teleconnections in the S2S database[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(706): 2210–2220. DOI: 10.1002/qj.3079.
- Wang Q, Huang A, Zhao Y, et al, 2016. Evaluation of the precipitation seasonal variation over eastern China simulated by BCC_CSM model with two horizontal resolutions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(14): 8374–8389. DOI: 10.1002/2016jd024959.
- White C J, Carlsen H, Robertson A, et al, 2017. Potential applications of subseasonal-to-seasonal(S2S) predictions[J]. *Meteorology Atmospheric*, 24(3): 315–325. DOI: 10.1002/met.1654.
- 陈官军,魏凤英,巩远发,2010. NCEP/CFS 模式对东亚夏季延伸预报的检验评估[J]. *应用气象学报*, 21(6): 659–670. DOI: 10.11898/1001-7313.20100603.
- 陈双,孙继松,何立富,2022. 四川盆地不同落区的三次强降水过程多尺度特征分析[J]. *高原气象*, 41(5): 1190–1208. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00060.
- 程智,徐敏,段春峰,2016. CFSv2 模式对淮河流域夏季气温降水预测能力的评估[J]. *暴雨灾害*, 35(4): 351–358. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9045.2016.04.007.
- 范江琳,曹萍萍,肖递祥,等,2019. 西南区域中心模式 SWC-WARMS 降水偏差分析[J]. *气象科学*, 39(3): 349–358. DOI: 10.3969/2018jms.0047.
- 郭渠,黄安宁,付志鹏,等,2021. 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*, 40(3): 644–655. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00028.
- 何慧根,李巧萍,吴统文,等,2014. 月动力延伸预测模式业务系统 DERF2.0 对中国气温和降水的预测性能评估[J]. *大气科学*, 38(5): 950–964. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13166.
- 黄小梅,蒋兴文,肖丁木,2016. NCEP CFSv2 对中国 2015 年夏季月尺度降水和环流预报分析[J]. *高原山地气象研究*, 36(4): 48–58.
- 朗杨,2015. CFSv2 在中国区域的季节干旱可预报性研究[D]. 北京: 北京师范大学.
- 李成程,2018. 基于 BCC_CSM1.2 和 CFSv2 模式资料对中国夏季温度和降水的候尺度可预报性研究[D]. 成都: 成都信息工程大学.
- 李清泉,丁一汇,张培群,2004. 一个全球海气耦合模式跨季度汛期预测能力的初步检验和评估[J]. *气象学报*, 62(6): 740–751.
- 李永华,向波,卢楚翰,等,2016. 热带大气季节内振荡对西南地区东部夏季降水的影响及其可能机制[J]. *大气科学*, 40(2): 437–450. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1506.15134.
- 刘佳,徐金霞,马振峰,等,2014. 第二代月动力延伸预报产品对西南汛期降水的预报检验[J]. *高原气象*, 33(6): 1468–1479. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00168.
- 刘银峰,徐海明,雷正翠,2009. 2006 年川渝地区夏季干旱的成因分析[J]. *大气科学学报*, 32(5): 686–694.
- 马振锋,彭骏,高文良,等,2006. 近 40 年西南地区的气候变化事实[J]. *高原气象*, 25(4): 633–642.
- 毛文书,曾戢,孙云,等,2010. 川渝地区夏季降水变化气候特征分析[J]. *成都信息工程学院学报*, 25(2): 172–178. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1742.2010.02.011
- 庞铁舒,秦宁生,刘博,等,2021. S2S 模式对四川汛期极端降水的预测技巧分析[J]. *气象*, 47(5): 586–600. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.05.007.
- 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.

- 任雪娟, 房佳蓓, 杨修群, 2020. 我国东部夏季降水季节内振荡与低频大气环流演变特征分析[J]. 气象科学, 40(5): 686–696. DOI: 10.3969/2020jms.0068.
- 尚可政, 秦春明, 王式功, 等, 2011. T213 L31 数值预报产品检验[J]. 安徽农业科学, 39(6): 3537–3539+3558. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2011.06.012.
- 覃志年, 胡娅敏, 陈丽娟, 2013. 广西夏季降水的多时间尺度特征及影响因子[J]. 应用气象学报, 24(5): 565–575. DOI: 10.11898/1001-7313.20130506.
- 王安英, 房佳蓓, 杨修群, 2021. 北半球夏季热带季节内振荡影响我国夏季降水的规律和预测方法[J]. 气象科学, 41(5): 606–616. DOI: 10.12306/2021jms.0051.
- 王春学, 郑然, 李栋梁, 等, 2020. 基于年际增量法的华西秋雨预测模型建立及检验[J]. 气象科技, 48(6): 855–861. DOI: 10.19517/j.1671-6345.20190498.
- 王连杰, 毛文书, 刘琳, 等, 2015. 川渝地区雨季降水特征及海温背景场分析[J]. 高原山地气象研究, 35(1): 56–59. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2184.2015.01.009.
- 王钦, 曾波, 2022. 四川盆地两类区域持续性暴雨的环流物理量场特征及成因分析[J]. 高原气象, 41(5): 1175–1189.
- 王鑫, 马振峰, 2010. 川渝地区主汛期降水的年代际变化与短期气候预测模型的建立[J]. 高原气象, 29(3): 595–604.
- 赵崇博, 任宏利, 吴捷等, 2016. BCC_CSM1.2 次季节-季节(S2S)预报历史回报的综合检验评估报告[C]. 北京: 国家气候中心.

Sub-seasonal Forecasting Skills Assessment and Deviation Analysis of CFSv2 for Summer Precipitation in Sichuan and Chongqing

XIAO Ying¹, PANG Yishu², MA Zhenfeng², CHEN Quanliang¹, ZHANG Zhengjie¹

(1. College of Atmospheric Science, Plateau Atmospheric & Environment Laboratory of Sichuan Province,

Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China;

2. Sichuan Climate Centre, Chengdu 610072, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, the hindcast precipitation fields of the NCEP's second-generation climate prediction system (CFSv2) and the observed precipitation data of 182 meteorological stations in Sichuan and Chongqing from 2000 to 2009 were utilized. Sub-seasonal forecasting ability for summer precipitation and its anomaly in Sichuan-Chongqing region of this model was evaluated by use of Temporal Correlation Coefficient (TCC), Anomaly Correlation Coefficient (ACC), Root Mean Square Error (RMSE), sign coincidence rate (SCR) and PS scores methods. Meanwhile, bias characteristics on probability density and frequency of precipitation was analyzed. The results show that the available forecast lead time for summer precipitation in Sichuan and Chongqing is about 3 pentads, which can simulate the high-value center of summer precipitation well, but the magnitude is too large. The high-value areas of forecasting skills are mainly located in the northwestern Sichuan Basin and north-eastern Chongqing, and some forecasting skills are also available for the southern Panxi region and parts of the western Sichuan Plateau. The model can also better grasp the trend of abnormally less precipitation in summer in the Sichuan-Chongqing region, and the effective forecasting skill is within 2 pentads. The precipitation probability densities predicted and observed in each time period of the model are mainly concentrated in the order of magnitude below 10 mm; compared with the actual situation, the precipitation frequency of each magnitude predicted by the model is significantly higher, and with the extension of the forecast time, the deviation is greater, and the most obvious one is the light rain frequency.

Key words: forecasting skills assessment; deviation analysis; summer precipitation in Sichuan-Chongqing; sub-seasonal forecast