

叶茂,吴钰,高松,等,2022.多物理过程对流可分辨集合预报中不同方案在四川盆地东部降水预报效果评估[J].气象,48(7):840-855. Ye M, Wu Z, Gao S, et al, 2022. Evaluation of precipitation forecasts with different parameterization schemes of multi-physical convective-permitting ensemble system in eastern Sichuan Basin [J]. Meteor Mon, 48(7):840-855 (in Chinese).

多物理过程对流可分辨集合预报中不同方案在四川盆地东部降水预报效果评估^{*}

叶 茂¹ 吴 钰¹ 高 松¹ 陈贵川¹ 翟丹华²

¹ 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147

² 重庆市气象台, 重庆 401147

提 要: 利用四川盆地东部站点观测数据和对流可分辨集合预报系统模式数据, 评估了该系统各成员及不同物理过程参数化方案在 2017—2019 年 4—9 月的降水预报效果。结果表明: 概率匹配平均和集合平均相比于各个集合成员存在明显的预报优势。Kain-Fritsch(KF)和 Betts-Miller-Janjic(BMJ)积云参数化方案的预报效果相对较好, Grell 3D ensemble(G3)方案在 48 h 之后的临界成功指数(critical success index, CSI)评分偏低。Thompson 和 Morrison 微物理参数化方案对小雨量级降水的预报效果较好, WRF Single-Moment 6-class(WSM6)方案对中雨量级降水的预报效果较好, 三种方案对大雨和暴雨量级降水的预报效果相当。Mellor-Yamada-Janjic(MYJ)和 Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino(MYNN)边界层方案的 CSI 评分相对较高, Yonsei University(YSU)方案在 48 h 之后的预报评分较低, 但 YSU 方案多和 G3 方案搭配使用, 其评分偏低主要受 G3 方案影响。各参数化方案均能把握四川盆地东部的降水分布特征, 但对华蓥山、武陵山和大娄山的降水存在高估, 对渝中至渝东北的降水存在低估。四川盆地东部的降水预报对积云参数化方案最为敏感。将一个成员的 G3 方案调整为 KF 方案后, 降水预报评分显著提升, 且集合离散度有所增加, 概率预报技巧得到提高。

关键词: 对流可分辨集合预报, 物理过程参数化方案, 四川盆地东部, 降水检验

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032502

Evaluation of Precipitation Forecasts with Different Parameterization Schemes of Multi-Physical Convective-Permitting Ensemble System in Eastern Sichuan Basin

YE Mao¹ WU Zheng¹ GAO Song¹ CHEN Guichuan¹ ZHAI Danhua²

¹ Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147

² Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

Abstract: Based on the precipitation forecast data of convection-permitting ensemble prediction system and observation data from April to September in 2017, 2018 and 2019, the effects of 24 h accumulated precipitation forecast of ensemble members in eastern Sichuan Basin are verified and compared, and the performance of different physical parameterization schemes is further discussed. Results show that the ensemble average forecast and probability matching forecast have obvious advantages over the ensemble members. The prediction performance of Kain-Fritsch (KF) and Betts-Miller-Janjic (BMJ) cumulus parameterization

^{*} 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jscx-tjsbX0007)、国家重点研发计划(2018YFC1507200)、上海台风研究基金项目(TFJJ201907)、重庆市气象部门智慧气象技术创新团队项目(ZHCXTD-202002)和重庆市气象部门青年基金项目(QNJJ-202207)共同资助
2021 年 2 月 22 日收稿; 2022 年 3 月 25 日收修定稿

第一作者: 叶茂, 主要从事数值模拟研究. E-mail: ymyemao@163.com

通讯作者: 吴钰, 主要从事数值模拟和资料同化研究. E-mail: wukgdqghg@163.com

schemes is relatively good, while the critical success index (CSI) score of Grell 3D ensemble (G3) scheme is relatively low after 48 h. Thompson and Morrison microphysical parameterization schemes are better for light rain than WRF Single-Moment 6-class (WSM6) scheme, while WSM6 scheme is better for moderate rain, and there is no significant difference in the CSI scores of heavy rain and rainstorm among the three schemes. The CSI score of Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) and Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) boundary layer schemes is higher than that of Yonsei University (YSU) scheme, especially after 48 h. However, YSU scheme is mostly used in combination with G3 scheme, so its low score is mainly affected by G3. The precipitation distribution characteristics of all these schemes are similar to those of observation, but the false strong rain belt is predicted in Huaying Mountain, Wuling Mountain and Dalou Mountain, and the precipitation from the middle to the northeast of Chongqing is underestimated. The precipitation forecast in eastern Sichuan Basin is most sensitive to cumulus parameterization scheme. After adjusting one member's G3 scheme to KF scheme, not only the forecast score is significantly improved, but also the ensemble spread is increased, and the skill of probability forecast is improved.

Key words: convective-permitting ensemble forecast, physical parameterization scheme, eastern Sichuan Basin, precipitation verification

引 言

20 世纪 90 年代以来,集合预报技术得到迅速发展和广泛应用,在中短期数值天气预报中发挥着重要作用。全球和区域集合预报技术已相对成熟(陈静等,2005;Ferranti et al,2015),随着高性能计算机的发展和对灾害性天气预报技术需求的提升,高分辨率的对流尺度集合预报引起越来越多的关注(Baldauf et al,2011;Schwartz et al,2015;Golding et al,2016;Mengaldo et al,2019)。Clark et al (2012)、Duc et al (2013)、Schellander-Gorgas et al (2017)、王璐和沈学顺(2019)研究表明,对流可分辨集合预报能显著提升区域降水强度和强降水落区的识别能力,在降水日变化、对流系统发生发展等方面提供了更准确的指示信息。四川盆地受东亚季风系统、孟加拉湾西南气流、西南涡、高原涡等多尺度天气系统和青藏高原、盆地周边多尺度地形的共同影响,暴雨灾害多发且预报难度大(李强等,2020;方德贤等,2020),因此重庆市气象局建立了一个多初值、多物理过程的对流可分辨集合预报系统,以期提高四川盆地东部地区的降水预报能力。

李俊等(2015)、Snook et al (2019)、包慧濛等(2019)和徐致真等(2019)研究表明,物理过程方案对降水有显著影响。Zhang et al (2006)开展了不同模式分辨率、初始条件、边界条件和物理过程参数化的集合研究,结果表明积云对流参数化方案在夏季极端降水集合研究中发挥着重要作用。Zhu and

Xue(2016)通过采用多种物理过程参数化的对流可分辨集合预报系统对北京“7·21”极端降水事件进行模拟研究,结果表明相比于区域平均降水量,降水极值和落区对物理过程参数化方案更为敏感。许建玉(2018)对鄂东一次暖区暴雨过程的模拟表明,不同边界层方案主要通过影响强对流触发造成短时强降水的模拟差异。以上研究推动了物理过程参数化方案的改进和发展,但由于参数化方案具有很强的区域性,不同方案对降水发生时间、地点、强度的预报存在差异,不同学者的研究结果也并不一致(Giorgi et al,1993;潘劲松等,2002;杨扬等,2021)。

对于一个完美的集合预报,不同集合成员的预报能力是相当的,但由于集合成员同时采用了不同积云对流、微物理和边界层等复杂物理过程的参数化方案,不同成员的预报性能会受方案影响而产生一定差别。基于以上考虑,本文评估了 2017—2019 年 4—9 月的对流可分辨集合预报系统各成员以及不同物理过程参数化方案在四川盆地东部的降水预报效果,旨在理解不同物理过程参数化方案的预报性能和影响能力,为提高集合数值预报在四川盆地东部的预报能力提供一些参考。

1 系统和方法

1.1 集合预报系统

以 WRF-ARWv3.5.1 模式为基础构建集合预报系统,垂直方向共分为 51 层,水平方向采用 3 层

单向嵌套网格,分辨率分别为 27、9、3 km。3 km 网格距区域满足对流尺度预报模式的高分辨率要求(Clark et al,2009),未使用积云对流参数化方案,可以显式地表征对流。最外层区域覆盖了中国及周边地区,最内层区域从青藏高原以东延伸至长江中下游平原以西(24.5°~34.5°N、99°~113°E)。系统每日于 08 时和 20 时(北京时,下同)启动,预报时效为 96 h。本文的检验评估工作主要针对最内层 3 km 网格距区域进行,检验时效为 24~96 h。

本系统共设计 11 个集合成员,采用不同的初值和物理过程参数化方案组合。为体现初值的不确定性,采用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,NCEP)提供的 0.5°×0.5°分辨率的全球预报系统(Global Forecast System,GFS)和 1°×1°分辨率的全球集合预报系统(Global Ensemble Forecast System,GEFS)驱动各集合成员。成员 m00 为控制预报,背景场和侧边界条件来自 GFS;其余 10 个集合成员的背景场和侧边界条件来自随机选择的 10 个 GEFS 扰动成员。为体现模式物理过程的不确定性,各集合成员采用不同的积云对流、微物理、边界层参数化方案组合,具体包括 KF、BMJ、G3 三种积云对流参数化方案,Thompson、Morrison 和 WSM6 三种微物理参数化方案,MYNN、MYJ 和 YSU 三种边界层方案(表 1)。

表 1 集合系统各成员的物理过程参数化方案
Table 1 Physical parameterization scheme for each member of ensemble prediction system

成员	微物理过程	边界层方案	积云参数化
m00	Thompson	MYJ	BMJ
m01	WSM6	MYNN	KF
m02	Morrison	YSU	KF
m03	Thompson	YSU	G3
m04	WSM6	MYJ	BMJ
m05	Morrison	MYNN	KF
m06	Thompson	MYNN	BMJ
m07	WSM6	YSU	G3
m08	Morrison	MYJ	BMJ
m09	Thompson	MYJ	KF
m10	Morrison	YSU	G3

1.2 资料和方法

利用对流可分辨集合预报系统在 2017—2019 年 4—9 月的逐日 20 时起报的模式数据及相应的观测数据进行检验评估和综合分析,检验要素为 24 h

累计降水。具体检验区域为四川盆地东部,该区域自西向东地形错综复杂,依次是川东平原、大巴山山脉、巫山山脉、大娄山山脉以及长江中下游平原西部等地区。检验针对此区域内的 7 213 个观测站点进行(图 1),观测数据经过气象资料业务系统(Meteorological Data Operatuional System,MDOS)质量控制(李奇临等,2018)。

模式检验工具(model evaluation tools,MET)是美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research,NCAR)数值预报发展试验中心(Developmental Testbed Center,DTC)研发的数值预报检验、评估系统(Brown et al,2009)。基于 MET 计算了 24 h 累计降水在小雨(≥ 0.1 mm)、中雨(≥ 10 mm)、大雨(≥ 25 mm)和暴雨(≥ 50 mm)量级的临界成功指数(critical success index,CSI)和频率偏差(frequency bias,FBIAS)评分(Gandin and Murphy,1992)。所有模式预报数据均采用临近点插值方法匹配到观测站点,并通过 1 000 次随机取样的 bootstrap 方法计算了 2.5%~97.5%的 0.05 显著性水平检验区间(Pan et al,2014)。

2 集合预报成员的降水预报效果

为了全面了解对流可分辨集合预报系统对四川盆地东部降水的预报性能,首先对各集合成员及其集合平均、概率匹配平均的降水预报效果进行检验评估(图 2)。概率匹配平均的降水预报效果整体优于集合成员,集合平均对小雨至大雨量级降水的预

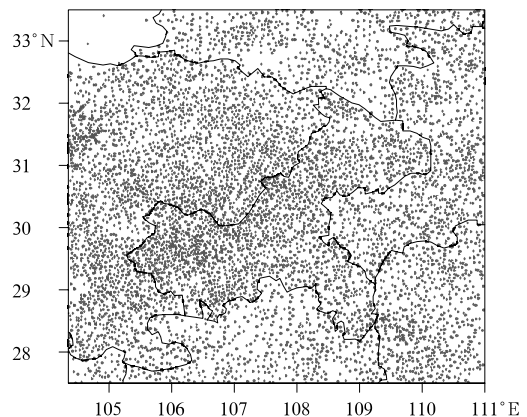


图 1 检验站点分布

Fig. 1 Distribution of the stations for forecast verification

报效果也好于多数集合成员,说明集合预报对提高预报准确率有显著作用。但集合平均的暴雨量级降水预报评分相对多数集合成员偏低,这是因为平滑作用造成强降水区的减小(李俊等,2010;傅娜等,2013;杜钧和李俊,2014)。在 11 个集合成员中,由 GFS 驱动的控制预报的预报评分较高,这是因为相比于 GEFS 驱动场,GFS 的初值是统计意义上分析最优的结果,其初始误差在统计意义上更小,提供了最可能的真实大气分布;由 GEFS 驱动的 10 个成员间的评分差异在小雨和中雨量级随时效逐渐增大,而在大雨和暴雨量级随时效的变化特征不明显,闵锦忠和吴乃庚(2020)指出对流尺度强天气个例中小尺度扰动受湿对流影响会造成误差快速增长,对于对流尺度强天气带来的暴雨过程,参数化方案差异造成的误差也会由于湿对流过程快速增长,从而显

示出与预报时效不相关的特征,而小雨量级降水更多受大尺度天气系统强迫,误差在短期内近线性增长,因此显示出随预报时效线性增加的特征。

3 不同物理过程参数化方案的降水预报效果

3.1 积云参数化方案的降水预报效果

积云对流参数化方案通过局地温度扰动影响垂直运动,对降水模拟非常重要(陈静等,2003)。虽然模式最内层区域可以显式表征对流,但外层区域设置的积云对流参数化方案会通过边界影响最内层的降水。本文评估的 2017—2019 年,GEFS 是通过 EnKF 同化方案来进行模式初始化,并采用了 SPPT、

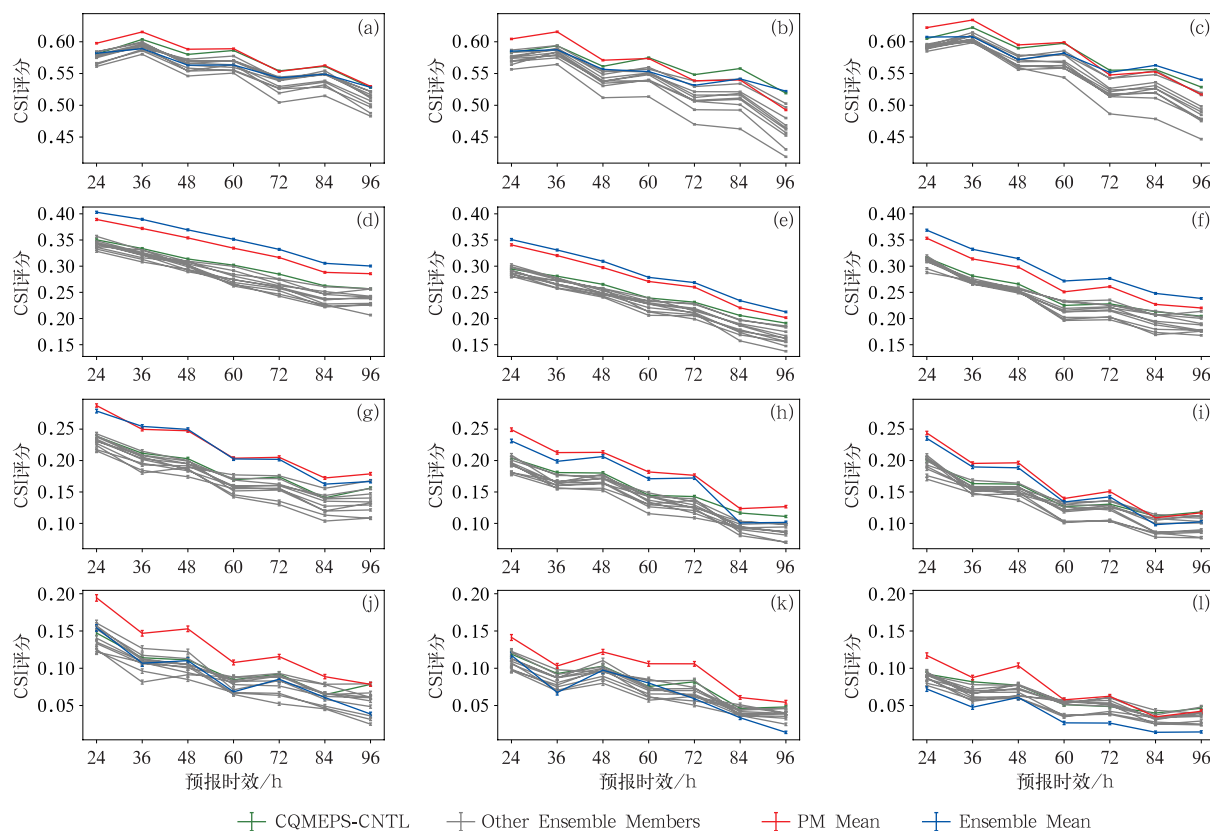


图 2 集合成员及其集合平均和概率匹配平均对(a,d,g,j)2017 年,(b,e,h,k)2018 年和(c,f,i,l)2019 年 4—9 月的 24 h 累计降水不同预报时效的(a~c)小雨,(d~f)中雨,(g~i)大雨,(j~l)暴雨量级的 CSI 评分
(短竖线为 2.5%~97.5% 的 bootstrap 显著性检验区间)

Fig. 2 CSI scores of (a—c) light rain, (d—f) moderate rain, (g—i) heavy rain and (j—l) rainstorm for 24 h accumulated precipitation with different lead time from 24 h to 96 h for ensemble members, ensemble mean and probability matching mean from April to September in (a, d, g, j) 2017, (b, e, h, k) 2018 and (c, f, i, l) 2019
(Short vertical bar indicates 2.5%—97.5% bootstrap significance test interval)

SKEB、SHUM 等随机扰动物理过程 (Zhou et al, 2017), 因此可以认为 GEFS 驱动的集合成员的初始扰动具有相同分布特征, 不同成员初值场的预报性能在统计意义上相当。基于以上考虑, 对 GEFS 驱动的 m01~m10 这 10 个成员展开分析, 通过对采用相同积云参数化方案的成员的预报评分进行平均来评估该方案在四川盆地东部的降水预报效果, 并利用 bootstrap 方法进行显著性检验。

图 3 为不同积云参数化方案的降水预报 CSI 评分, 评分随降水量级的增加而逐渐降低, 方案之间的评分差异在 48 h 之后更为显著。相比于 2017 年, 三种方案对 2018 年和 2019 年的评分有所下降, 尤其对 2019 年暴雨量级降水的评分偏低, 这和天气形势以及 GEFS 预报场的年际变化有关。对于小雨

量级降水, KF 和 BMJ 方案的预报评分较高, 其中 BMJ 方案对 2018 年和 2019 年的降水预报更具优势, 在 48 h 之后的评分始终最高, 而 G3 方案的预报评分相对较低, 48 h 之后在 0.05 显著性水平检验上显著低于 KF 和 BMJ 方案。对于中雨和大雨量级降水, 三种方案在前 48 h 的评分接近, 之后整体呈现 BMJ 方案最高、KF 次之、G3 最低的评分分布特征。对于暴雨量级降水, 2017 年的前 48 h 预报以 KF 方案最好, 之后以 BMJ 方案最好, G3 方案的评分在 48 h 之后偏低; 2018 年的前 72 h 预报以 KF 方案最好, 之后以 BMJ 方案最好, G3 方案的评分在 72 h 显著偏低; 2019 年的预报以 BMJ 方案最好, KF 方案次之, G3 方案的评分在 48 h 之后偏低。

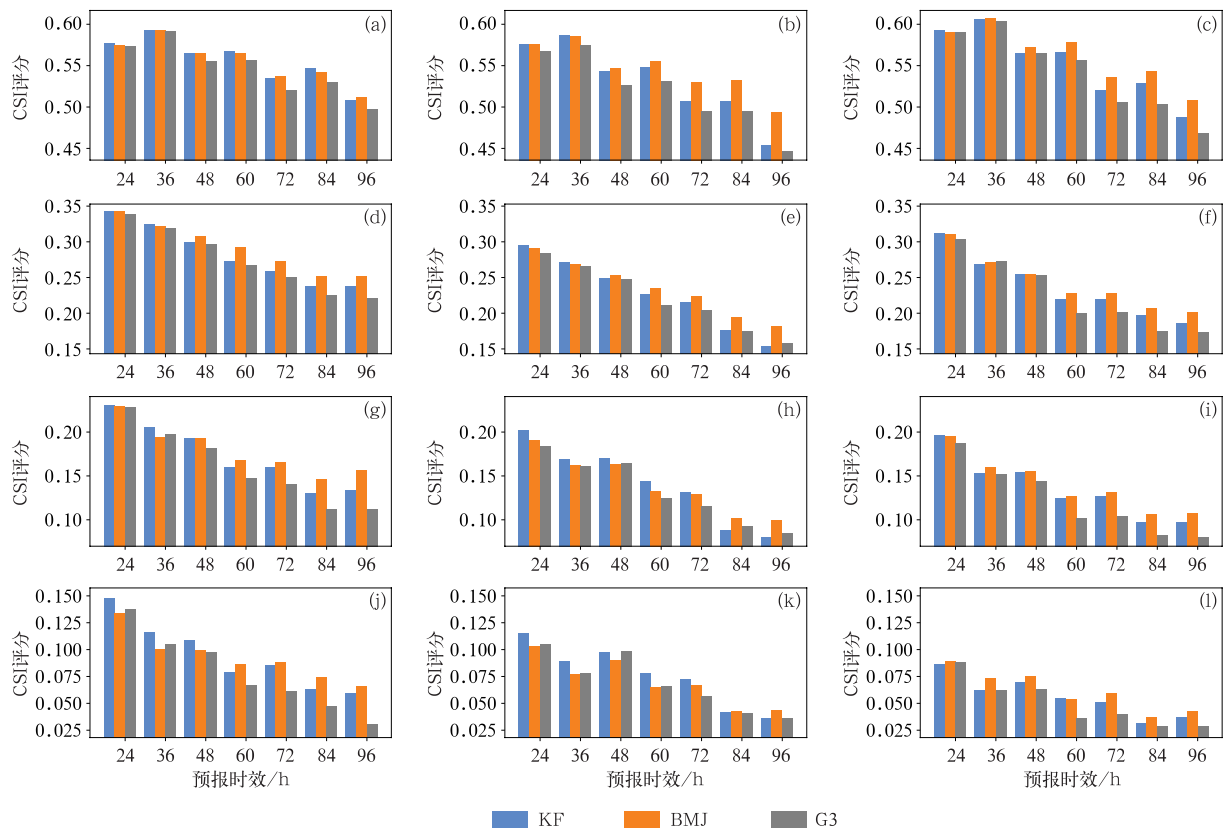


图 3 不同积云参数化方案对(a,d,g,j)2017年,(b,e,h,k)2018年和(c,f,i,l)2019年4—9月的24 h累计降水不同预报时效(24~96 h)的(a~c)小雨,(d~f)中雨,(g~i)大雨,(j~l)暴雨量级的 CSI 评分
(黑色实线为 2.5%~97.5% 的 bootstrap 显著性检验区间)

Fig. 3 CSI scores of (a—c) light rain, (d—f) moderate rain, (g—i) heavy rain and (j—l) rainstorm for 24 h accumulated precipitation with different lead time from 24 h to 96 h for different cumulus parameterization schemes from April to September in (a, d, g, j) 2017, (b, e, h, k) 2018 and (c, f, i, l) 2019
(Black solid line indicates 2.5%—97.5% bootstrap significance test interval)

进一步对比观测以及各方案预报的 24 h 累计降水分布(图 4)。上述研究表明,方案之间的预报差异在 48 h 之后更为显著,因而主要对比不同方案 60 h 时效的预报结果。由观测可见,降水分布存在年际差异。2017 年的降水呈东多西少的分布形式,

渝东北至鄂西南、渝东南至湘西北的降水偏多,四川盆地西部的降水相对较少。2018 年的降水大值区主要位于龙门山、大巴山脉和武陵山脉,盆地和丘陵地区的降水相对较少。2019 年的降水分布较为分散,大值区主要位于大巴山脉、黔渝交界处以及湘西

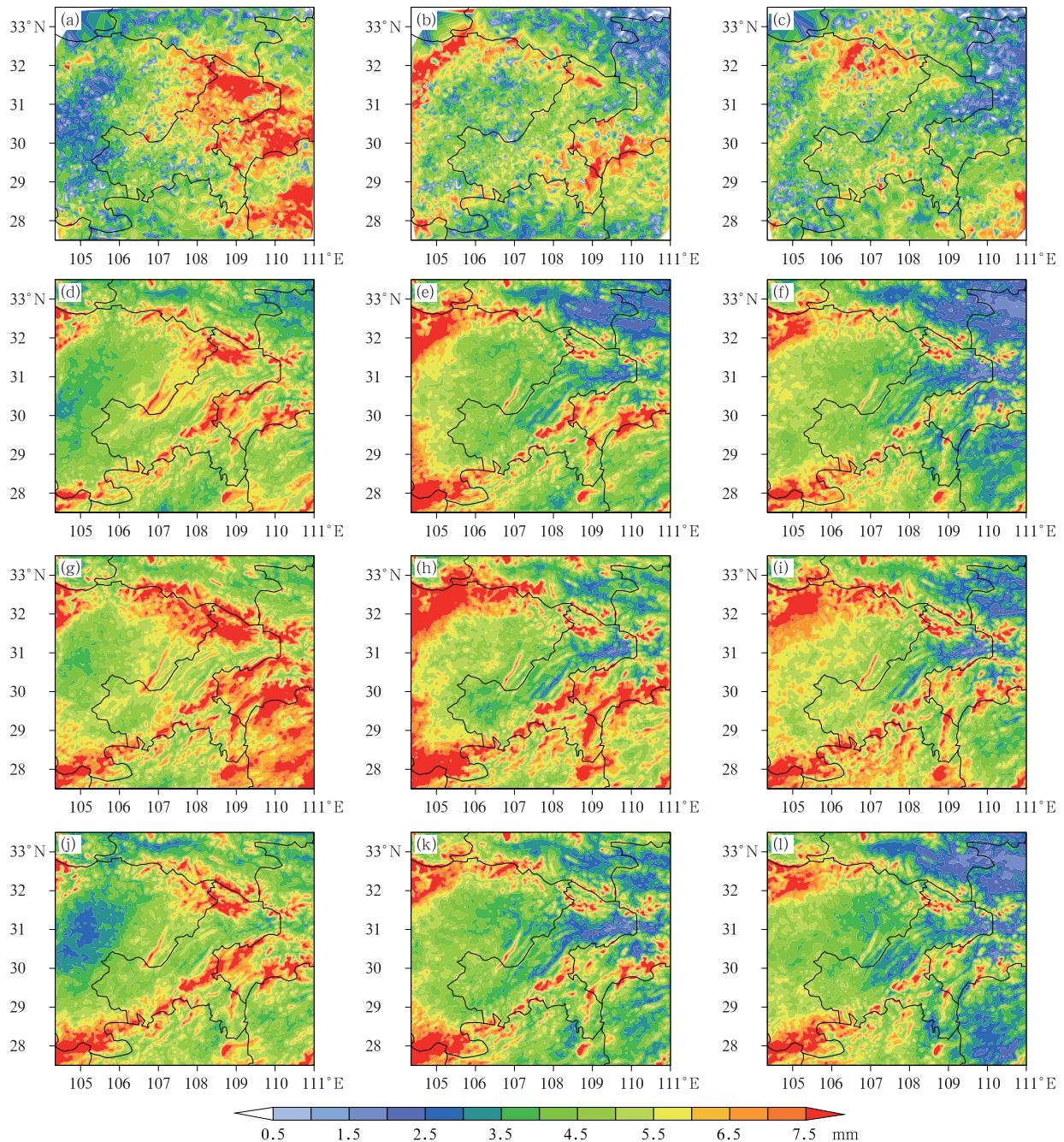


图 4 (a,d,g,j)2017 年,(b,e,h,k)2018 年和(c,f,i,l)2019 年 4—9 月的(a~c)观测以及(d~f)KF, (g~i)BMJ 和(j~l)G3 方案 60 h 预报时效的 24 h 累计降水分布

Fig. 4 Distributions of 24 h accumulated precipitation in (a—c) observation and forecast with lead time of 60 h for (d—f) KF, (g—i) BMJ and (j—l) G3 schemes from April to September in (a,d,g,j) 2017, (b, e, h, k) 2018 and (c, f, i, l) 2019

北,巫山至鄂西的降水偏少。

由图 4d,4g,4j 可见,三种方案大体模拟了 2017 年东多西少的降水分布特征,但对东部的降水大值区有所低估,尤其 G3 方案预报的降水偏少,而对西部的降水低值区有所高估,尤其 BMJ 方案预报的降水偏多。三种方案均沿华蓥山、武陵山和大娄山预报了东北—西南走向的虚假强降雨带,说明模式过强地体现了地形的作用。图 4e,4h,4k 为预报的 2018 年降水分布,各方案对渝中至渝东北的降水存在低估,对其余地区的降水存在高估,在海拔高度较高的山区高估明显。图 4f,4i,4l 为预报的 2019 年降水分布,各方案预报的降水大值区由米仓山西移至摩天岭附近,对湘西北的降水大值区存在漏报。总体而言,各方案能够把握降水空间分布特征,但预报的降水落区和量级与观测存在一定偏差。结合各方案对 2017—2019 年 4—9 月的 24 h 累计降水的 FIAS 评分可见(图略),BMJ 方案预报的降水整体偏多(FIAS 评分大于 1),G3 方案预报的降水整体偏少(FIAS 评分小于 1),KF 方案预报的降水频率和观测更为吻合(FIAS 评分最接近 1)。

3.2 微物理参数化方案的降水预报效果

研究表明,微物理过程对降水模拟十分重要(马严枝等,2012;滕方达等,2020)。无论在中小尺度模式还是在全球尺度模式中,云和降水的微物理过程方案都决定着定量降水预报的准确性。本系统采用了 Thompson、Morrison 和 WSM6 三种微物理参数化方案(表 1),对采用相同微物理参数化方案的成员的预报评分进行平均,从而评估该方案在四川盆地东部的降水预报效果。

图 5 为各方案的降水预报 CSI 评分,评分随降水量级的增加而降低,且 2017 年的评分整体高于 2018 年和 2019 年。各微物理参数化方案均有一定的预报优势,对于小雨量级降水,Thompson 和 Morrison 方案的评分较高且接近,WSM6 方案的评分相对较低;对于中雨量级降水,WSM6 方案的评分相对较高,尤其在 48 h 之后的评分偏高;对于大雨和暴雨量级降水,2017 年前 48 h 预报以 Morrison 方案评分最高,之后以 WSM6 方案评分最高,2018 年和 2019 年不同方案的评分较为接近,方案

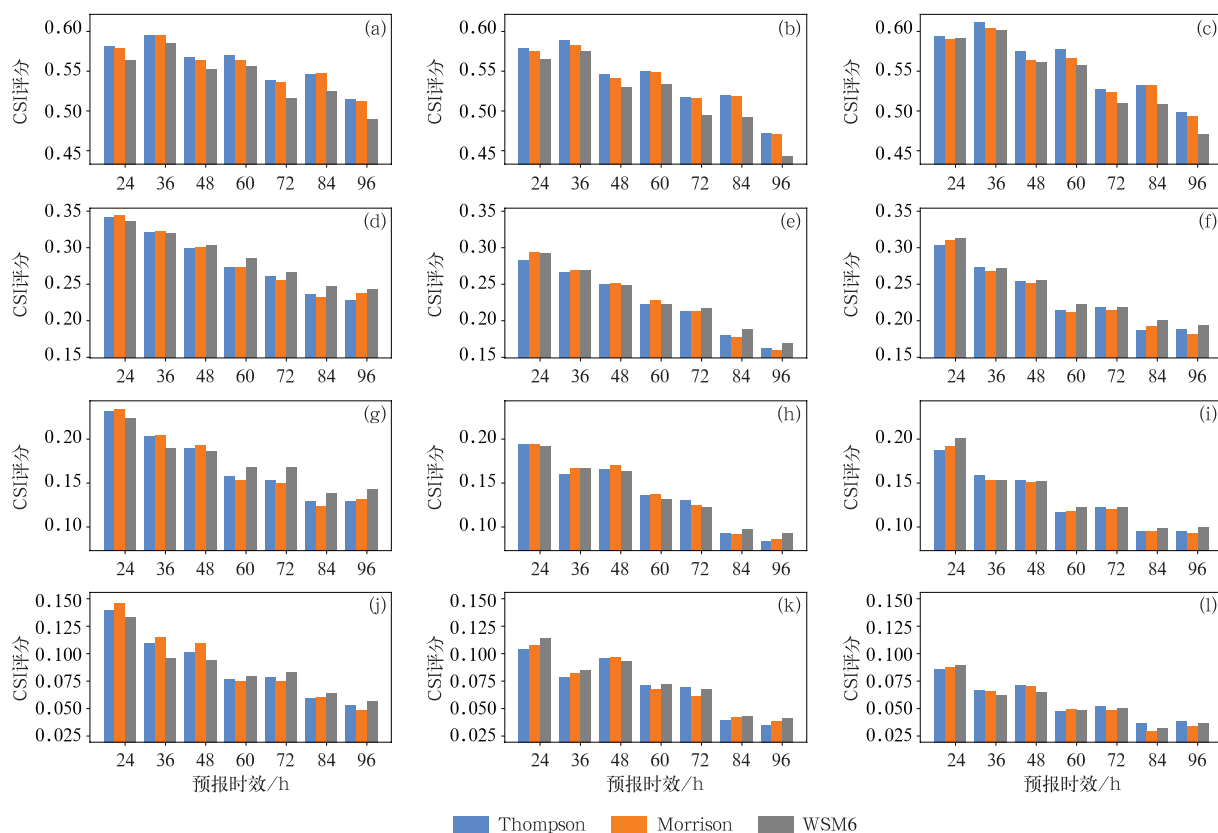


图 5 同图 3,但为不同微物理参数化方案的 CSI 评分

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for CSI scores of different microphysical parameterization schemes

之间的评分差异在 0.05 显著性水平内并不显著。

考虑到不同微物理参数化方案搭配了不同的积云和边界层参数化方案(表 1),为了验证这一结论是否受其他方案的影响,对比了成员 m03、m10 和 m07 的预报效果。m03、m10 和 m07 分别采用了 Thompson、Morrison 和 WSM6 微物理参数化方案,而其他参数化方案的设置完全一致。由这三个成员的降水预报 CSI 评分可以得到和图 5 类似的结

论(图略),说明对采用相同参数化方案的成员评分进行平均的分类方法对于长期统计检验是可行的。

由图 6 可见,Thompson 和 Morrison 方案预报的降水分布特征较为一致,WSM6 方案预报的降水相对较多。三种方案对渝中至渝东北的降水存在低估,在华蓥山、武陵山和大娄山预报了虚假的强降雨带,尤其 WSM6 方案过强地体现了山地地形的作用。

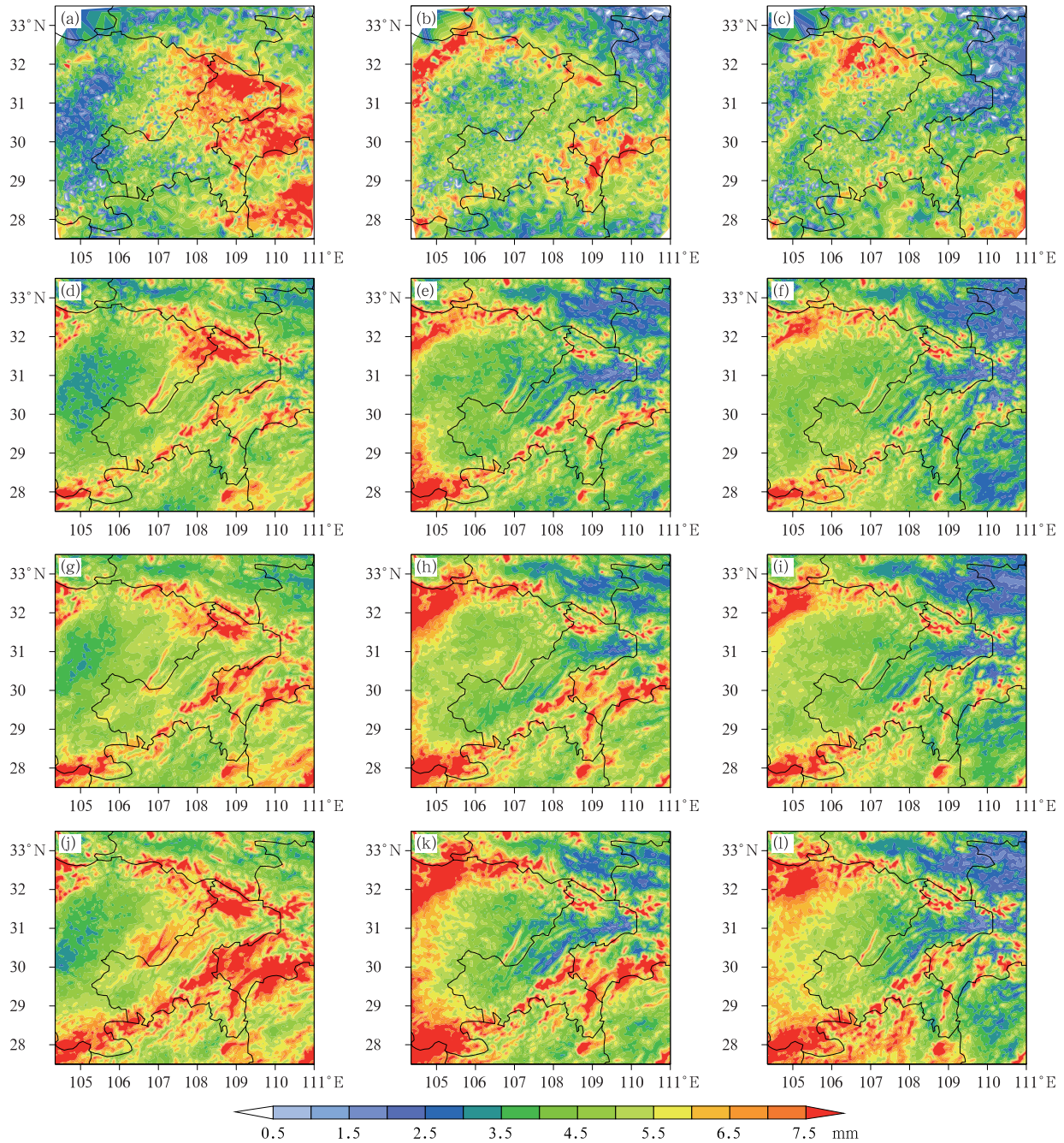


图 6 同图 4,但为(a~c)观测以及(d~f)Thompson,(g~i)Morrison 和(j~l)WSM6 方案

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for (a—c) observation and forecast for (d—f) Thompson, (g—i) Morrison and (j—l) WSM6 schemes

3.3 边界层方案的降水预报效果

行星边界层直接受下垫面影响,其中的湍流垂直交换十分显著,合理地描述边界层对降水模拟非常重要(王璐璐等,2020)。本系统采用了 MYNN、MYJ 和 YSU 三种边界层方案,对采用相同边界层方案的成员的预报评分进行平均,以此探讨该方案在四川盆地东部的降水预报效果。

图 7 为各方案的降水预报 CSI 评分,评分随降水量级的增加而降低,小雨量级降水的预报评分介于 0.40~0.65,暴雨量级降水的预报评分下降至 0.05~0.15,且各方案在 2018 年和 2019 年的评分低于 2017 年,说明各方案对暴雨量级降水以及降水年际变化的把握能力还有待提高。对于小雨量级降水,MYJ 和 MYNN 方案的评分相对较高,其中 MYJ 方案在 2018 年和 2019 年的预报效果更好,而 YSU 方案的评分在 2017—2019 年均偏低。对于中雨和大雨量级降水,2017 年前 48 h 预报以 MYNN 方案最好,之后以 MYJ 方案最好,YSU 方案在 48 h 之后评分偏低;2018 年和 2019 年 MYNN 和 MYJ

方案的预报评分接近且高于 YSU 方案,评分差异在 48 h 之后更显著。对于暴雨量级降水,2017 年前 48 h 的评分以 MYNN 方案最高、YSU 方案次之、MYJ 方案最低,之后以 MYJ 方案最高、MYNN 方案次之、YSU 方案最低;2018 年 72 h 时效的评分以 YSU 方案最低,其余时效的方案之间无显著的评分差异;2019 年以 MYJ 方案的评分最高,YSU 方案的评分在 48 h 之后偏低。

王晨稀和端义宏(2003)的研究指出,边界层方案对降水的影响小于积云参数化方案。由表 1 可见,本系统中选用 YSU 边界层方案的成员有 m02、m03、m07 和 m10,其中 m03、m07 和 m10 均采用 G3 积云参数化方案。那么 m02、m03、m07 和 m10 平均后得到的低评分主要受 YSU 方案的影响,还是受 G3 方案的影响?

为了探讨 YSU 和 G3 方案对降水预报效果的影响,对比分析成员 m02、m05 和 m10 的 CSI 评分(图 8)。m02 和 m05 分别采用 YSU 和 MYNN 边界层方案,m02 和 m10 分别采用 KF 和 G3 积云参数化方案,其他参数设置完全一致(表 1)。由图 8 可

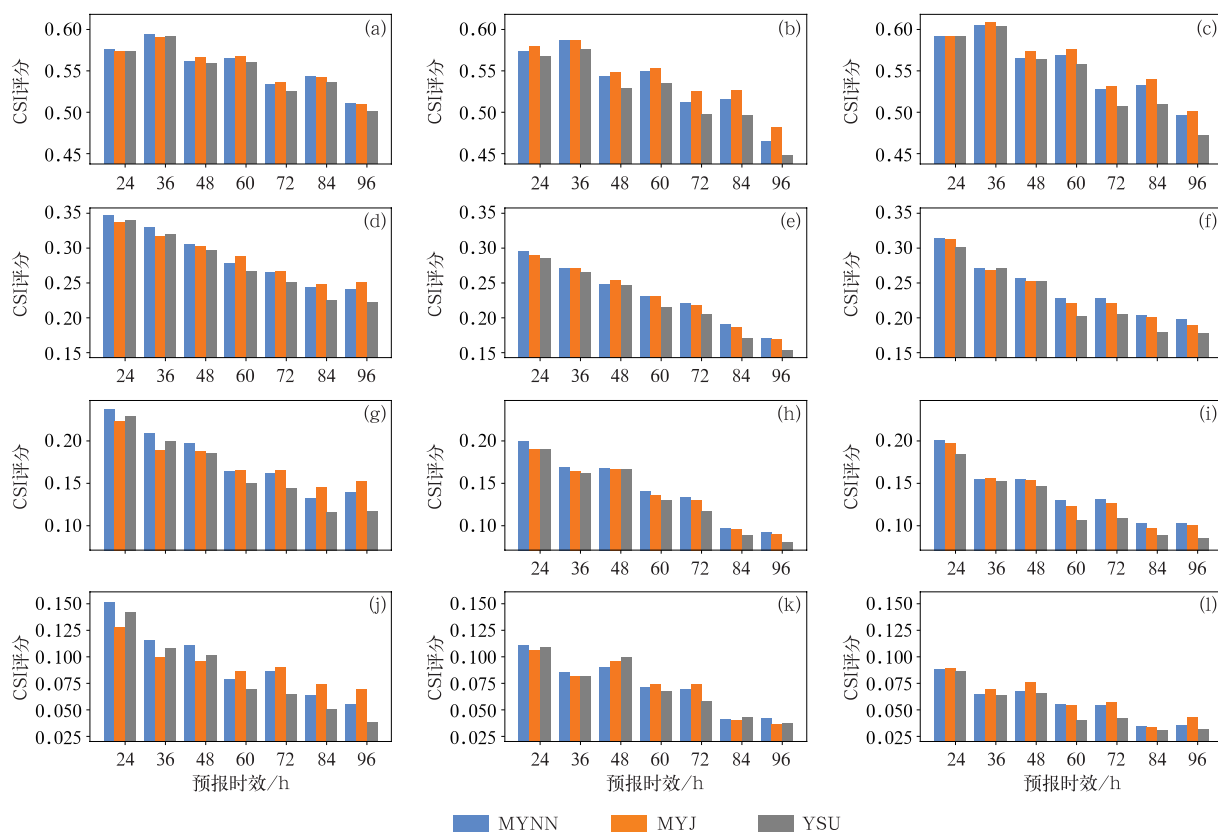


图 7 同图 3,但为不同边界层方案的 CSI 评分

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for CSI scores of different planetary boundary layer schemes

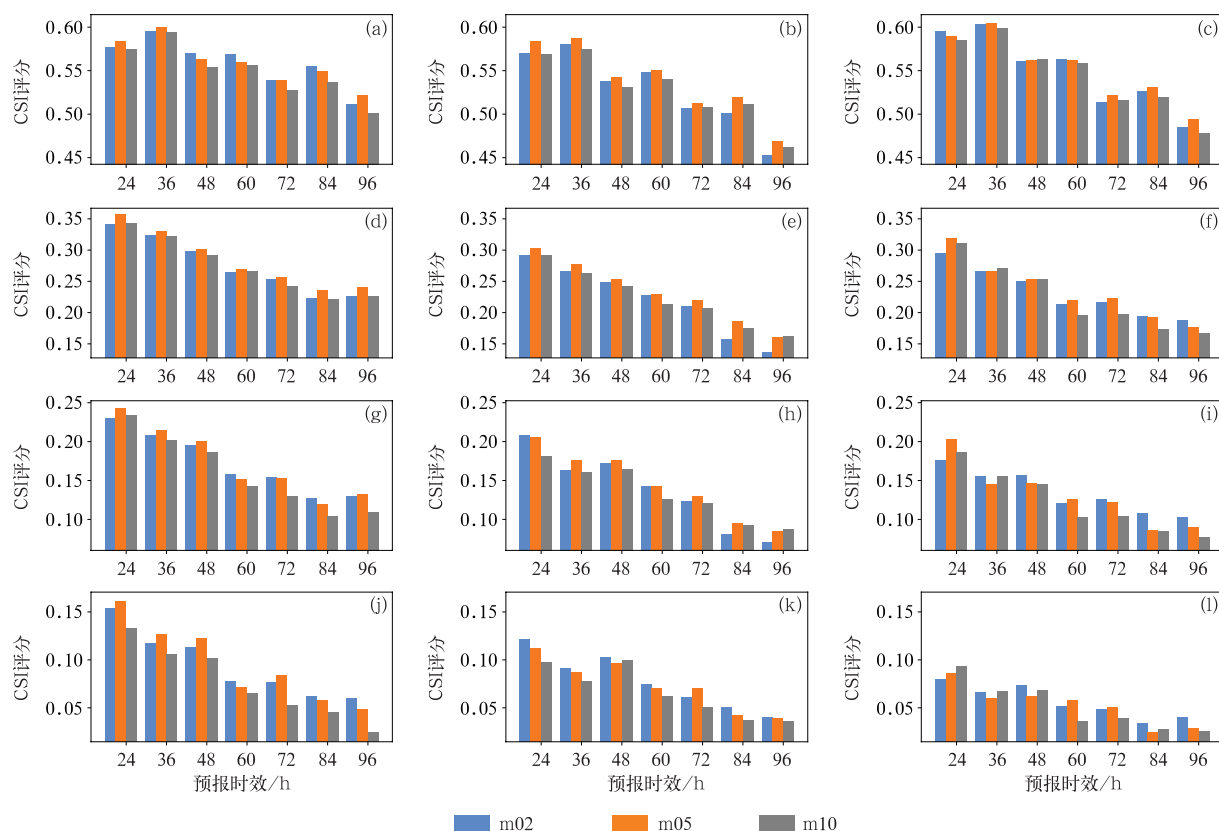


图8 同图3,但为成员 m02,m05 和 m10 的 CSI 评分

Fig. 8 Same as Fig. 3, but for CSI scores of m02, m05 and m10

见,m02 与 m10 的评分分布与图 3 呈现的 KF 和 G3 方案的评分分布相似,m02 的评分整体高于 m10,进一步验证了 KF 方案预报效果优于 G3 方案这一结论。而相对于图 7 呈现的 YSU 方案显著低于 MYNN 方案的评分分布,图 8 中 m02 和 m05 的评分差异有所减小,m02 的评分甚至高于 m05,可见 YSU 方案本身的预报效果并不差,m02、m03、m07 和 m10 平均后的评分偏低主要受 G3 方案的影响。

图 9 为三种边界层方案预报的 24 h 累计降水。MYNN、MYJ 和 YSU 方案预报的降水分布和观测较为一致,但对降水落区和量级的把握还不够准确,对研究区域西部的降水有所高估,尤其 MYJ 方案预报的降水偏多,主要偏差位于大巴山脉、华蓥山和大娄山;对东部的降水有所低估,尤其 YSU 方案预报的降水偏少,主要偏差位于渝中至渝东北地区。

4 参数化方案敏感性试验

为了更直观地对比积云、微物理、边界层参数化方案的预报差异,绘制了各方案的 CSI 评分散点分

布(图 10)。可见 KF 或 BMJ 方案的预报评分在各年份均为最高,而 G3 方案的预报评分在各年份始终为最低,即积云参数化方案的评分离散度大于边界层和微物理参数化方案,这一现象在中雨至暴雨量级降水预报中更明显,说明降水预报对积云参数化方案最敏感,这和 Jankov et al(2005)的研究结论一致。

进一步分析不同积云参数化方案预报差异的可能原因。利用研究区域内的 7 个探空站点,通过临近点插值的方法对比 KF、BMJ 和 G3 方案预报的 850 hPa 风速值与观测的平均绝对误差(表 2)。G3 方案预报的风速与观测的误差较大,有 4 个站点的纬向和经向风速误差大于 KF 和 BMJ 方案。图 11 为不同积云参数化方案预报的 850 hPa 水汽通量和水汽通量散度,可见三种方案预报的空间分布基本一致,均与地形密切相关。南方的水汽向北输送,水汽通量在盆地辐散,而在大巴山、华蓥山和武陵山脉辐合。由预报差值场可见,相对于 KF 和 BMJ 方案,G3 方案预报的经向水汽通量偏弱,在盆地的辐散和山地的辐合都偏弱,因此其预报效果相对较差。

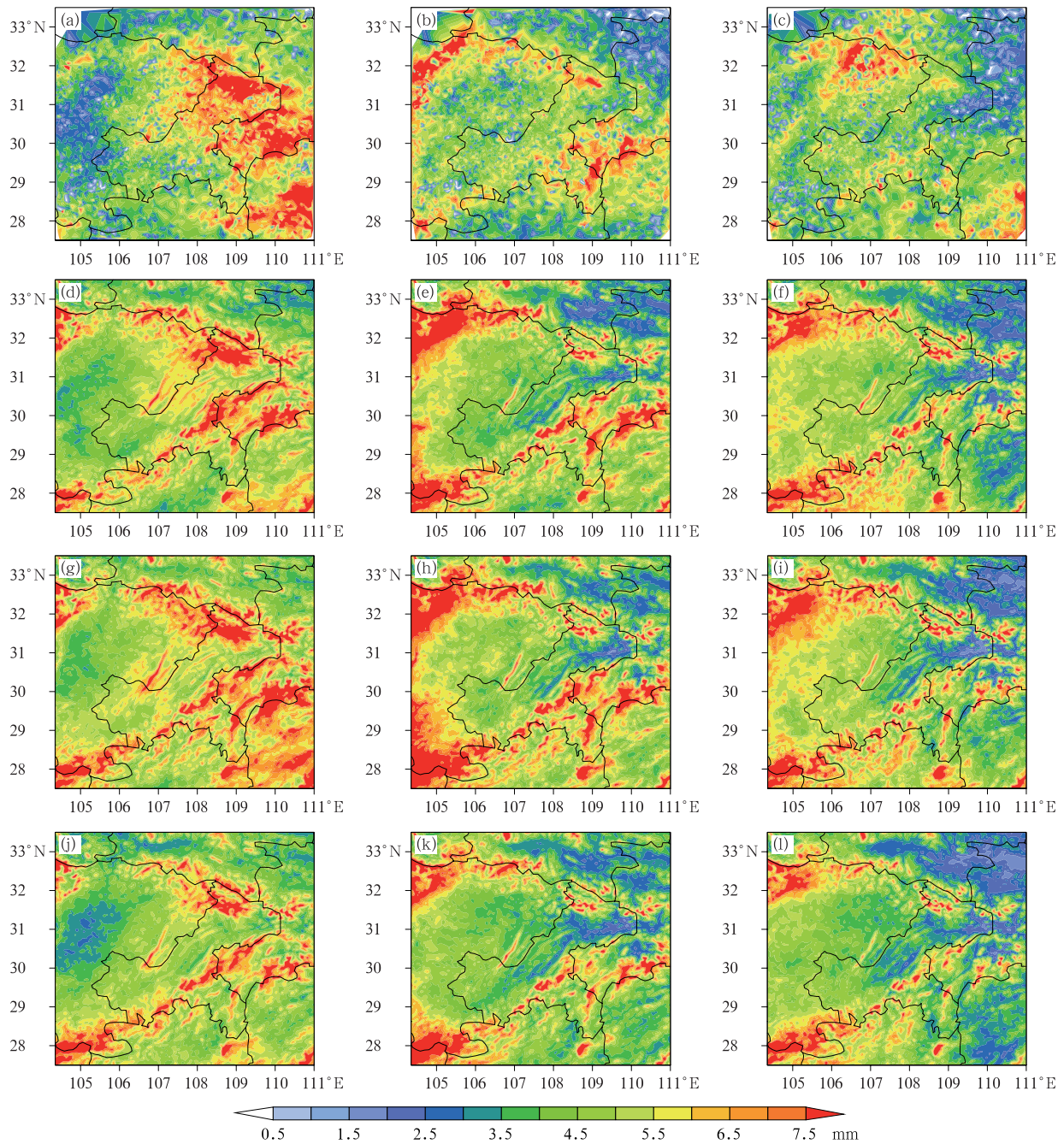


图 9 同图 4, 但为 (a~c) 观测以及 (d~f) MYNN, (g~i) MYJ 和 (j~l) YSU 方案

Fig. 9 Same as Fig. 4, but for (a—c) observation and forecast for
(d—f) MYNN, (g—i) MYJ and (j—l) YSU schemes

基于以上讨论设计参数化方案敏感性试验,以期提升对流可分辨集合预报系统在四川盆地东部的降水预报效果。保持成员 m10 的初值和测边界不变,将 G3 方案更换为 KF 方案,对比 m10 在更换方案前(old-m10)、更换方案后(new-m10)的降水预报 CSI 评分(图 12),可见更换方案后对各量级降水的

预报能力在 0.05 显著性水平上显著提高,大雨量级降水在 60 h 预报时效的评分增幅达 20%。进一步计算本系统在 m10 更换方案后的概率匹配平均(new-PM),与 m10 采用 G3 方案时的概率匹配平均(old-PM)进行对比(图 12),同样可见调整方案后的预报评分有所增长,评分增幅在 48 h 之后更显著。

图 13 为对流可分辨集合预报系统在 m10 更换 方案前(old schemes)、更换方案后(new schemes)

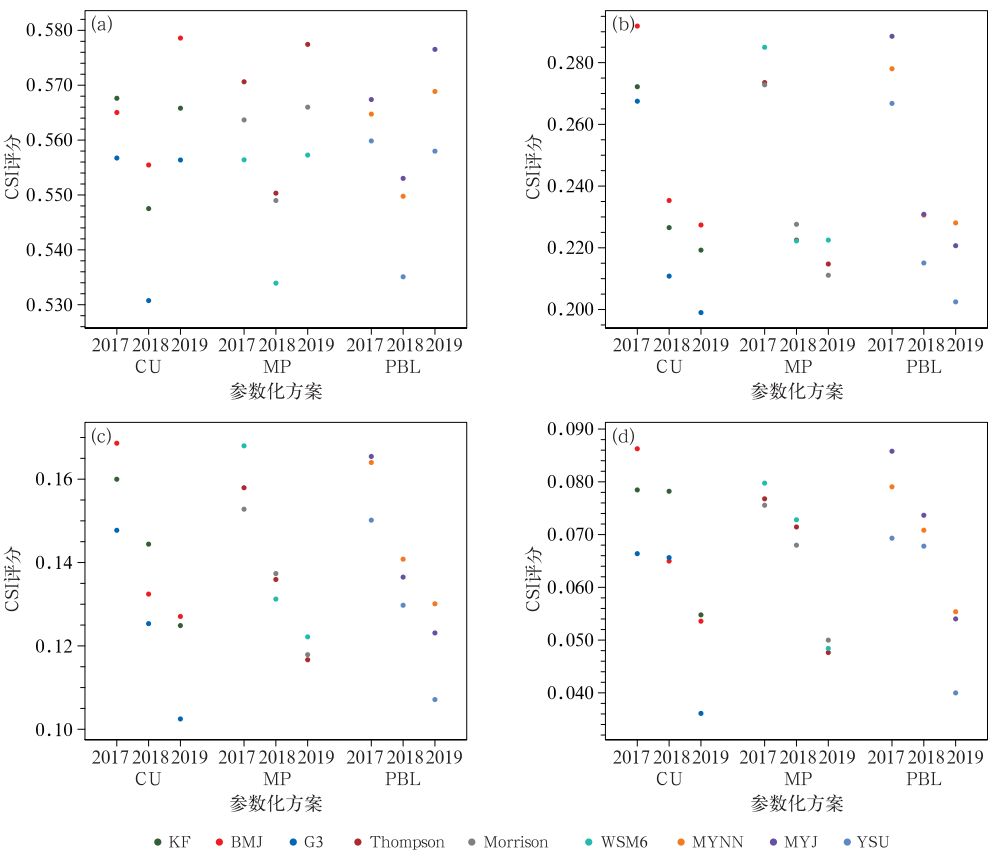


图 10 积云(CU)、微物理(MP)、边界层(PBL)参数化方案对 2017—2019 年 4—9 月的 24 h 累计降水 60 h 预报时效的 (a)小雨, (b)中雨, (c)大雨, (d)暴雨量级的 CSI 评分

Fig. 10 CSI scores of (a) light rain, (b) moderate rain, (c) heavy rain and (d) rainstorm for 24 h accumulated precipitation with 60 h lead time for cumulus (CU) parameterization schemes, microphysical (MP) schemes and planetary boundary layer (PBL) schemes from April to September in 2017—2019

表 2 2017—2019 年 4—9 月的 KF、BMJ 和 G3 方案 60 h 预报时效的 850 hPa 风速与探空站观测值的平均绝对误差

Table 2 The mean absolute error of the wind speed at 850 hPa between observation and forecast with lead time of 60 h for KF, BMJ and G3 schemes from April to September in 2017—2019

站点	U			V		
	KF	BMJ	G3	KF	BMJ	G3
56492	2.48	2.55	2.57 *	3.25	3.04	3.28 *
57127	3.61	3.68	3.77 *	3.40	3.57	3.52 *
57245	3.86	3.95	4.11 *	3.13	2.95	3.21 *
57328	2.86	2.71	2.92 *	3.33 *	3.02	3.24
57447	3.72	3.43	3.87 *	3.75	3.75	3.97 *
57516	2.76	2.67	2.85 *	3.62 *	3.28	3.44
57749	3.70 *	3.11	3.38	4.65 *	3.55	3.79

注: * 为平均绝对误差的最大值。
Note: * indicates the maximum value of the mean absolute error.

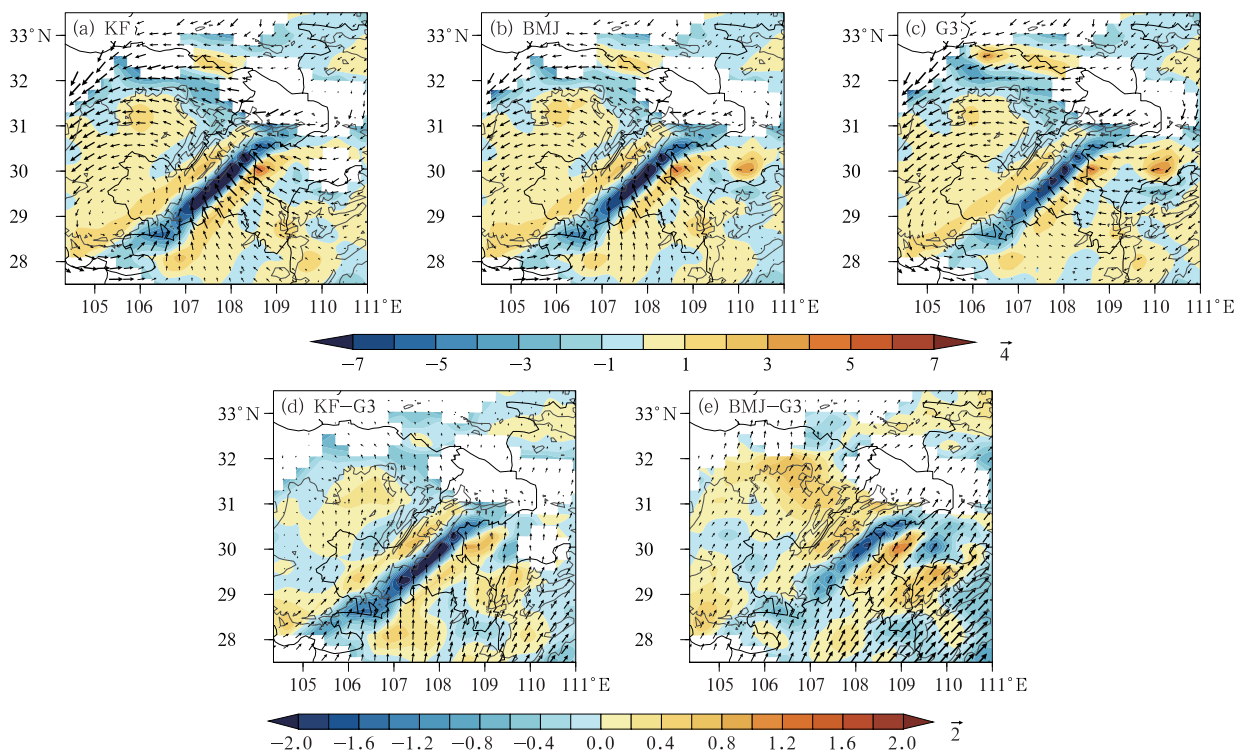


图 11 2017—2019 年 4—9 月的 (a)KF, (b)BMJ 和 (c)G3 方案 60 h 预报时效的平均 850 hPa 水汽通量和水汽通量散度空间分布, 以及 (d)KF 与 G3 方案, (e)BMJ 与 G3 方案之间的差值场 (矢量: 水汽通量, 单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$; 填色: 水汽通量散度, 单位: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$; 灰色实线: 500 m 地形高度线)

Fig. 11 Distributions of water vapor flux and water vapor flux divergence at 850 hPa in forecast with lead time of 60 h for (a) KF, (b) BMJ, (c) G3 schemes, as well as forecast differences between (d) KF and G3 schemes, (e) BMJ and G3 schemes from April to September in 2017—2019 (vector: water vapor flux, unit: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$; colored: water vapor flux divergence, unit: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$; gray solid line: the terrain height of 500 m)

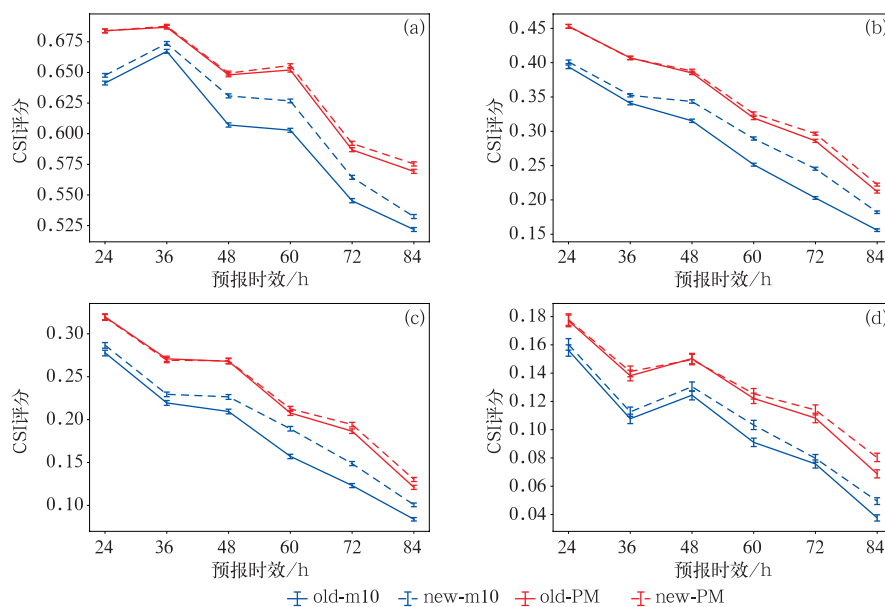


图 12 新方案(虚线)和旧方案(实线)对 2020 年 6—7 月 24 h 累计降水不同预报时效 (24~84 h) 的 (a)小雨、(b)中雨、(c)大雨、(d)暴雨量级的 CSI 评分 (短竖线为 2.5%~97.5% 的 bootstrap 显著性检验区间)

Fig. 12 CSI scores of (a) light rain, (b) moderate rain, (c) heavy rain and (d) rainstorm for 24 h accumulated precipitation with different lead time from 24 h to 84 h for new schemes (dashed line) and old schemes (solid line) from June to July in 2020 (Short vertical bar indicates 2.5%–97.5% bootstrap significance test interval)

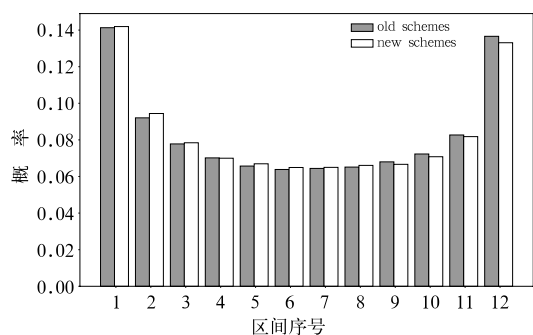


图 13 更换方案前后的系统对 2020 年 6—7 月

24 h 累计降水 60 h 预报时效的 Talagrand 分布

Fig. 13 The Talagrand distribution of 24 h accumulated precipitation with 60 h lead time in the system before and after modifying the scheme from June to July in 2020

的 60 h 降水预报 Talagrand 分布,其横坐标表示 12 个区间,纵坐标为实况值落在各个区间的概率。更换方案前后的 Talagrand 分布都呈两端高、中间低的“U 型”分布,说明大部分实况值落在了集成员预报最大(小)值之外的区间。更换方案之后的 Talagrand 分布更加平直,Outlier 评分由 0.278 降至 0.275,集合离散度由 8.99 上升至 9.07,大雨量级降水概率预报的相对作用特征面积由 0.719 上升至 0.723,说明概率预报技巧有所提高,更换方案之后的集合预报系统更可靠。

5 结论与讨论

利用四川盆地东部的站点观测数据和对流可分辨集合预报系统模式数据,评估了该系统在 2017—2019 年 4—9 月的降水预报效果,进一步探讨不同物理过程参数化方案的降水预报性能。结果表明:

(1)概率匹配平均和集合平均相比于各个集成员存在明显的预报优势。集成员之间的预报评分差异在小雨和中雨量级随时效逐渐增大,而在大雨和暴雨量级随时效增大的特征不明显。

(2)KF 和 BMJ 积云参数化方案的降水预报效果相对较好,G3 方案在 48 h 后的 CSI 评分偏低。三种方案预报的降水分布特征和观测较为一致,但对降水范围和量级的预报存在一定偏差,BMJ 方案预报的降水整体偏多,G3 方案预报的降水整体偏少,KF 方案预报的降水更接近观测。

(3)Thompson 和 Morrison 微物理参数化方案

对小雨量级降水的预报效果较好,WSM6 方案对小雨量级降水的预报效果较好,三种方案对大雨和暴雨量级降水的预报效果相当。三种方案对渝中至渝东北的降水存在低估,在华蓥山、武陵山和大娄山预报了虚假的强降雨带,尤其 WSM6 方案过强地体现了山地地形的作用。

(4)MYJ 和 MYNN 边界层方案的 CSI 评分相对较高,YSU 方案的预报评分在 48 h 之后偏低,但 YSU 方案多和 G3 方案搭配使用,其评分偏低主要受 G3 方案影响。三种方案对研究区域西部的降水有所高估,尤其 MYJ 方案预报的降水偏多,对东部的降水有所低估,尤其 YSU 方案预报的降水偏少。

(5)四川盆地东部的降水预报对积云参数化方案最为敏感。G3 方案预报的 850 hPa 风速和观测的误差较大,经向水汽通量相对 KF 和 BMJ 方案偏弱,因此其预报效果较差。将一个成员的 G3 方案调整为 KF 方案后,降水预报评分显著提升,60 h 预报时效的大雨量级降水评分增幅达 20%,集合离散度亦有所增加,概率预报技巧得到提高。

本文通过 24 h 累计降水分析集合预报系统不同成员的预报效果,得到不同参数化方案的预报性能,继而对系统的方案组合进行优化,后期还需结合降水日变化特征、空间检验开展精细化的检验评估,分析不同物理过程参数化方案的预报性能,改进或优化集合预报系统参数化方案,在保证集合预报系统有一定离散度的情况下各成员有相似预报性能。此外,本研究表明不同方案均在华蓥山、武陵山和大娄山预报虚假的强降雨带,说明模式在地形复杂地区存在系统性偏差,具体偏差原因值得进一步研究。

参考文献

- 包慧蒙,闵锦忠,陈耀登,2019. MCC 降水过程集合预报不同物理过程扰动方案的对比试验研究[J]. 大气科学学报,42(3):370-379.
- Bao H M, Min J Z, Chen Y D, 2019. A comparative study of different physical process perturbation schemes for ensemble forecast on MCC system[J]. Trans Atmos Sci, 42(3):370-379 (in Chinese).
- 陈静,薛纪善,颜宏,2003. 华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验[J]. 气象学报,61(4):432-446.
- Chen J, Xue J S, Yan H, 2003. The uncertainty of mesoscale numerical prediction of South China heavy rain and the ensemble simulations[J]. Acta Meteor Sin, 61(4):432-446(in Chinese).
- 陈静,薛纪善,颜宏,2005. 一种新型的中尺度暴雨集合预报初值扰动

- 方法研究[J]. 大气科学, 29(5): 717-726. Chen J, Xue J S, Yan H, 2005. A new initial perturbation method of ensemble mesoscale heavy rain prediction[J]. Chin J Atmos Sci, 29(5): 717-726(in Chinese).
- 杜钧, 李俊, 2014. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用[J]. 气象科技进展, 4(5): 6-20. Du J, Li J, 2014. Application of ensemble methodology to heavy-rain research and prediction[J]. Adv Meteor Sci Technol, 4(5): 6-20(in Chinese).
- 方德贤, 董新宁, 邓承之, 等, 2020. 2008—2016年重庆地区降水时空分布特征[J]. 大气科学, 44(2): 327-340. Fang D X, Dong X N, Deng C Z, et al, 2020. Temporal and spatial distribution of precipitation in Chongqing during 2008—2016[J]. Chin J Atmos Sci, 44(2): 327-340(in Chinese).
- 傅娜, 陈葆德, 谭燕, 等, 2013. 基于快速更新同化的滞后短时集合预报试验及检验[J]. 气象, 39(10): 1247-1256. Fu N, Chen B D, Tan Y, et al, 2013. Time-lag ensemble forecasting experiment and evaluation based on SMB-WARR[J]. Meteor Mon, 39(10): 1247-1256(in Chinese).
- 李俊, 杜钧, 刘羽, 2015. 北京“7. 21”特大暴雨不同集合预报方案的对比试验[J]. 气象学报, 73(1): 50-71. Li J, Du J, Liu Y, 2015. A comparison of initial condition-, multi-physics-and stochastic physics-based ensembles in predicting Beijing “7. 21” excessive storm rain event[J]. Acta Meteor Sin, 73(1): 50-71(in Chinese).
- 李俊, 杜钧, 王明欢, 等, 2010. AREM模式两种初值扰动方案的集合降水预报试验及检验[J]. 热带气象学报, 26(6): 733-742. Li J, Du J, Wang M H, et al, 2010. Precipitation verifications to an ensemble prediction system using two initial perturbation schemes based on AREM[J]. J Trop Meteor, 26(6): 733-742(in Chinese).
- 李奇临, 魏麟骁, 吴翀, 等, 2018. 基于MDOS的重庆市2015年气象观测数据质量分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 43(11): 135-140. Li Q L, Wei L X, Wu C, et al, 2018. On quality statistics and analysis of meteorological observation data of Chongqing in 2015 based on MDOS[J]. J Southwest China Normal Univ (Nat Sci Ed), 43(11): 135-140(in Chinese).
- 李强, 王秀明, 周国兵, 等, 2020. 四川盆地西南低涡暴雨过程的短时强降水时空分布特征研究[J]. 高原气象, 39(5): 960-972. Li Q, Wang X M, Zhou G B, et al, 2020. Temporal and spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall during southwest vortex rainstorm in Sichuan Basin[J]. Plateau Meteor, 39(5): 960-972(in Chinese).
- 马严枝, 陆昌根, 高守亭, 2012. 8. 19华北暴雨模拟中微物理方案的对比试验[J]. 大气科学, 36(4): 835-850. Ma Y Z, Lu C G, Gao S T, 2012. The effects of different microphysical schemes in WRF on a heavy rainfall in North China during 18—19 August 2010[J]. Chin J Atmos Sci, 36(4): 835-850(in Chinese).
- 闵锦忠, 吴乃庚, 2020. 近二十年来暴雨和强对流可预报性研究进展[J]. 大气科学, 44(5): 1039-1056. Min J Z, Wu N G, 2020. Advances in atmospheric predictability of heavy rain and severe convection[J]. Chin J Atmos Sci, 44(5): 1039-1056(in Chinese).
- 潘劲松, 翟国庆, 高坤, 2002. 区域气候模拟中多种对流参数化方案的比较研究[J]. 大气科学, 26(2): 206-220. Pan J S, Zhai G Q, Gao K, 2002. Comparisons of three convection parameterization schemes in regional climate simulations[J]. Chin J Atmos Sci, 26(2): 206-220(in Chinese).
- 滕方达, 李得勤, 蒋大凯, 等, 2020. 微物理过程参数化方案对辽宁一次暴雪的数值模拟差异分析[J]. 气象学报, 78(4): 608-622. Teng F D, Li D Q, Jiang D K, et al, 2020. Comparative analysis of simulations on a heavy snow event in Liaoning Province using different cloud microphysical parameterization schemes[J]. Acta Meteor Sin, 78(4): 608-622(in Chinese).
- 王晨稀, 端义宏, 2003. 短期集合预报技术在梅雨降水预报中的试验研究[J]. 应用气象学报, 14(1): 69-78. Wang C X, Duan Y H, 2003. Experiment and research of short-range ensemble forecasting techniques in forecasting Meiyu precipitation[J]. J Appl Meteor Sci, 14(1): 69-78(in Chinese).
- 王璐, 沈学顺, 2019. 对流尺度集合预报与模式不确定性研究进展[J]. 气象, 45(8): 1158-1168. Wang L, Shen X S, 2019. Review on the representation of model uncertainty in convection-allowing ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 45(8): 1158-1168(in Chinese).
- 王璐璐, 闵锦忠, 刘畅, 2020. 基于WRF模式的对流尺度边界层方案参数随机扰动方法研究[J]. 气象学报, 78(4): 636-647. Wang L L, Min J Z, Liu C, 2020. A study on stochastic perturbed planetary boundary layer scheme parameters at convective scale based on WRF model[J]. Acta Meteor Sin, 78(4): 636-647(in Chinese).
- 许建玉, 2018. 鄂东暖区暴雨个例的高分辨率模拟对边界层方案的敏感性[J]. 高原气象, 37(5): 1313-1324. Xu J Y, 2018. Sensitivity of high-resolution simulations of the warm-sector rainstorm in eastern Hubei to planetary boundary layer schemes[J]. Plateau Meteor, 37(5): 1313-1324(in Chinese).
- 徐致真, 陈静, 王勇, 等, 2019. 中尺度降水集合预报随机参数扰动方法敏感性试验[J]. 气象学报, 77(5): 849-868. Xu Z Z, Chen J, Wang Y, et al, 2019. Sensitivity experiments of a stochastically perturbed parameterizations (SPP) scheme for mesoscale precipitation ensemble prediction[J]. Acta Meteor Sin, 77(5): 849-868(in Chinese).
- 杨扬, 卢冰, 王薇, 等, 2021. 基于WRF的积云对流参数化方案对中国夏季降水预报的影响研究[J]. 气象学报, 79(4): 612-625. Yang Y, Lu B, Wang W, et al, 2021. Impacts of cumulus parameterization schemes on the summertime precipitation forecast in China based on the WRF model[J]. Acta Meteor Sin, 79(4): 612-625(in Chinese).
- Baldauf M, Seifert A, Förstner J, et al, 2011. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model;

- description and sensitivities[J]. *Mon Wea Rev*, 139(12):3887-3905.
- Brown B G, Gotway J E H, Bullock R G, et al, 2009. The Model Evaluation Tools (MET): community tools for forecast evaluation[C]//25th International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology. Phoenix: American Meteorological Society.
- Clark A J, Gallus W A, Xue M, et al, 2009. A comparison of precipitation forecast skill between small convection-allowing and large convection-parameterizing ensembles[J]. *Wea Forecasting*, 24(4):1121-1140.
- Clark A J, Weiss S J, Kain J S, et al, 2012. An overview of the 2010 hazardous weather testbed experimental forecast program spring experiment[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 93(1):55-74.
- Duc L, Saito K, Seko H, 2013. Spatial-temporal fractions verification for high-resolution ensemble forecasts[J]. *Tellus A*, 65(1):18171.
- Ferranti L, Corti S, Janousek M, 2015. Flow-dependent verification of the ECMWF ensemble over the Euro-Atlantic sector[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 141(688):916-924.
- Gandin L S, Murphy A H, 1992. Equitable skill scores for categorical forecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 120(2):361-370.
- Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T, 1993. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: boundary-layer and radiative transfer processes[J]. *Mon Wea Rev*, 121(10):2794-2813.
- Golding B, Roberts N, Leoncini G, et al, 2016. MOGREPS-UK convection-permitting ensemble products for surface water flood forecasting: rationale and first results[J]. *J Hydrometeorol*, 17(5):1383-1406.
- Jankov I, Gallus W A, Segal M, et al, 2005. The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall[J]. *Wea Forecasting*, 20(6):1048-1060.
- Mengaldo G, Wyszogrodzki A, Diamantakis M, et al, 2019. Current and emerging time-integration strategies in global numerical weather and climate prediction[J]. *Arch Comput Methods Eng*, 26(3):663-684.
- Pan Y J, Zhu K F, Xue M, et al, 2014. A GSI-based coupled EnSRF-En3DVar hybrid data assimilation system for the operational rapid refresh model: tests at a reduced resolution[J]. *Mon Wea Rev*, 142(10):3756-3780.
- Schellander-Gorgas T, Wang Y, Meier F, et al, 2017. On the forecast skill of a convection-permitting ensemble[J]. *Geosci Model Dev*, 10(1):35-56.
- Schwartz C S, Romine G S, Sobash R A, et al, 2015. NCAR's experimental real-time convection-allowing ensemble prediction system[J]. *Wea Forecasting*, 30(6):1645-1654.
- Snook N, Kong F Y, Brewster K A, et al, 2019. Evaluation of convection-permitting precipitation forecast products using WRF, NMMB, and FV3 for the 2016-17 NOAA Hydrometeorology Testbed Flash Flood and Intense Rainfall Experiments[J]. *Wea Forecasting*, 34(3):781-804.
- Zhang F Q, Odins A M, Nielsen-Gammon J W, 2006. Mesoscale predictability of an extreme warm-season precipitation event[J]. *Wea Forecasting*, 21(2):149-166.
- Zhou X Q, Zhu Y J, Hou D C, et al, 2017. The NCEP global ensemble forecast system with the EnKF initialization[J]. *Wea Forecasting*, 32:1989-2004.
- Zhu K F, Xue M, 2016. Evaluation of WRF-based convection-permitting multi-physics ensemble forecasts over China for an extreme rainfall event on 21 July 2012 in Beijing[J]. *Adv Atmos Sci*, 33(11):1240-1258.

(本文责编:何晓欢)