

横断山区模式降水预报质量检验

——以丽江市为例

马妍, 靳宗许*, 和丽云, 董自香

云南省丽江市气象局, 云南 丽江

收稿日期: 2024年4月20日; 录用日期: 2024年5月17日; 发布日期: 2024年5月27日

摘要

为充分了解全球数值预报模式和中国气象局数值业务区域模式(CMA区域模式)在丽江市的预报效果, 本研究对欧洲中心全球模式(ECMWF)、中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)、上海数值预报模式系统(CMA-SH9)、广东快速更新同化数值预报系统(CMA-GD)、云南区域模式(科研所WRF)、中国气象局全球同化预报系统(CMA-GFS)共6种数值预报模式的降水要素进行了晴雨预报与分级降水预报检验。结果显示: 1) 欧洲中心全球模式晴雨预报正确率低于国产模式, 且国产模式中以科研所WRF和CMA-SH9准确率最高。2) 随着降水量级增大, 各模式TS评分和预报偏差显著下降, 空报率和漏报率显著上升, 且各模式对于小雨量级具有较好的预报效果。随着预报时效增长, 各模式检验指标无显著差异, 但其变化趋势与降水量级间表现一致。3) 综合多个模式的预报检验结果, 丽江市进行晴雨预报和降水预报时可着重参考CMA-SH9、科研所WRF和CMA-GD这3种国产数值模式。

关键词

数值预报模式, 模式检验, 横断山区, 晴雨预报, 降水预报

Quality Test of Precipitation Forecasting of Numerical Models in Hengduan Mountain

—A Case Study of Lijiang

Yan Ma, Zongxu Jin*, Liyun He, Zixiang Dong

Lijiang Meteorological Bureau, Lijiang Yunnan

Received: Apr. 20th, 2024; accepted: May 17th, 2024; published: May 27th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 马妍, 靳宗许, 和丽云, 董自香. 横断山区模式降水预报质量检验[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(3): 582-591. DOI: 10.12677/ccr.2024.133065

Abstract

In order to fully understand the forecasting effect of the global numerical prediction model and the numerical operational regional model (CMA regional model) of the China Meteorological Administration in Hengduan Mountain, this study evaluated the prediction results of barometer and graded rainfall precipitation in Lijiang of six numerical prediction models, the European Central Global Model (ECMWF), CMA-MESO, CMA-SH9, CMA-GD, WRF of the Research Institute and CMA-GFS. The results showed that: 1) The accuracy of ECMWF is lower than that of the domestic models, and the accuracy of the domestic model WRF and CMA-SH9 is the highest. 2) With the increase of precipitation, the TS score and forecast deviation of all models decrease significantly, and the empty reporting rate and underreporting rate increase significantly, and all models have a good forecasting effect on light rain. With the increase of forecast duration, there are no significant differences between the test indicators of each model, the varied trend is consistent with that of precipitation levels. 3) Based on the forecast results of multiple models, three domestic numerical models can be used to refer to CMA-SH9, WRF and CMA-GD in Lijiang for weather and precipitation forecasting firstly.

Keywords

Numerical Prediction Model, Model Test, Hengduan Mountain, Weather Forecast, Precipitation Forecast

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 前言

数值预报是全球制作天气预报的重要依据, 当前在众多的数值预报模式中以全球模式 ECMWF 为预报员的主要参考[1]。随着我国多种国产模式的迅速发展和日趋成熟, 为各地的降水预报提供了更多有利参考。有研究表明, 全球模式对晴雨和小雨的预报效果较好, 在中到大雨中空报和漏报较为明显[2]; 在国产模式中, CMA-SH9 在西南地区预报效果较好并稳定[3], 且在多个量级中预报评分均高于 ECMWF 模式; CAM-SH9 和 CAM-MESO 在 08 时起报的短时强降水预报中效果较好[4]; CMA-MESO 在云南地区的暴雨量级降水预报中表现较好[5]; 云南本地化的科研所 WRF 数值模式对云南的降水过程预报效果有明显提升[6] [7], 且在不同天气系统背景下预报效果差异较大[8], 但其对短时强降水存在明显漏报[9]。

我国滇西北高原横断山区地形复杂, 其中丽江市海拔落差高达 4581 米, 域内立体气候特征突出, 含有北热带、南/中/北亚热带、南/中温带、高原气候区等 7 种复杂气候类型, 常常受到孟加拉湾风暴、南支槽、切变线、西南涡等多种天气系统的单一或复合影响, 加之横断山区复杂地形的影响, 使得境内不同区域之间天气差异很大, 短时强对流天气尤为突出, 其中华坪县暴雨过程在全市更为突发及显著[10], 因此对于多种数值模式的预报产品需求较强, 有必要对全球和区域模式在丽江市复杂地形下的降水要素预报能力进行检验评估, 通过比较各种模式对丽江市晴雨预报和分级降水的预报能力, 可有效提高对各模式的精确认识和优势了解[11], 以期当地预报员在降水预报中提供更为准确的参考。

2. 资料与方法

本研究选取了 6 种数值模式进行检验, 分别是 ECMWF、CMA-MESO、CMA-SH9、CMA-GD、科

研所 WRF、CMA-GFS。检验内容包括：1) 丽江市国家站和区域站 0~72 小时晴雨预报准确率，并分别对 0~24 h、24~48 h、48~72 h 共 3 个时段预报结果进行检验。2) 分别对 24 小时降水等级(共小雨、中雨、大雨、暴雨 4 个量级降水)进行检验，并同样对 0~72 小时逐 24 小时预报进行检验。检验评估指标采用降水 TS 评分、漏报率、空报率和预报偏差共 4 个指标(见下式) [12] [13]。检验时间范围为 2023 年 1 月 1 日至 9 月 30 日，模式起报时间选取 20 时，实况时刻选取 20 时~次日 20 时。

$$\text{TS 评分: } TS_k = \frac{NA_k}{NA_k + NB_k + NC_k} \times 100\%$$

$$\text{空报率: } FAR_k = \frac{NB_k}{NA_k + NB_k} \times 100\%$$

$$\text{漏报率: } PO_k = \frac{NC_k}{NA_k + NC_k} \times 100\%$$

$$\text{预报偏差: } B_k = \frac{NA_k + NB_k}{NA_k + NC_k} \times 100\%$$

式中： k 表示检验级别，共小雨、中雨、大雨、暴雨 4 个级别， NA_k 为 k 级别降水预报正确的站点样本数、 NB_k 为 k 级别降水空报的站点样本数、 NC_k 为 k 级别降水漏报的站点样本数。

3. 模式降水检验结果分析

3.1. 晴雨预报正确率检验

2023 年 1~9 月份丽江市国家站和区域站 0~72 小时预报时效中逐 24 小时晴雨预报正确率检验结果如下图 1 所示。结果显示,ECMWF 全球模式 0~72 小时晴雨预报正确率在 0.617~0.62, CMA-MESO 在 0.67~0.7, CMA-SH9 在 0.73~0.74, CMA-GD 在 0.69~0.72, 科研所 WRF 在 0.72~0.74, CMA-GFS 在 0.65~0.67。随着预报时效的增长,ECMWF 全球模式晴雨预报正确率基本保持稳定水平,其余区域模式均略微有下降,可见各数值模式的 0~24 小时临近晴雨预报具有较大的参考意义。而在所有预报时效中,ECMWF 预报正确率(平均值为 0.62)显著低于其余区域模式(平均值为 0.70),区域模式预报正确率由高到低依次为: CMA-SH9 > 科研所 WRF > CMA-GD > CMA-MESO > CMA-GFS。这一结果指示预报员在进行短时临近晴雨预报时应更多参考区域模式。

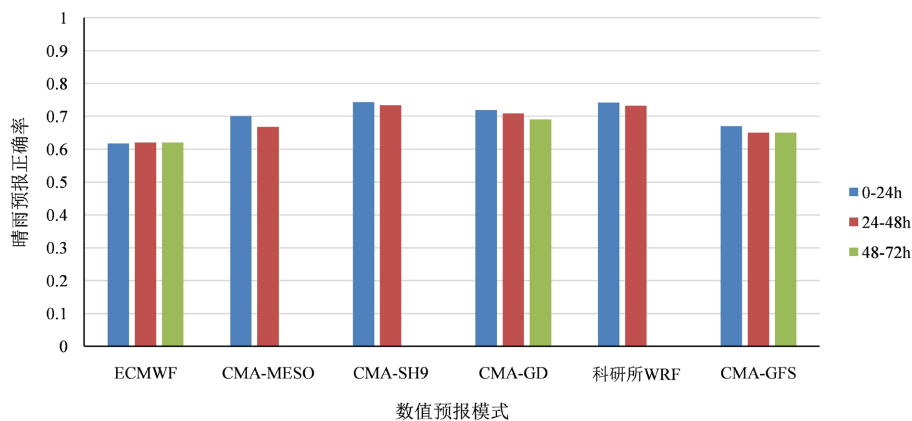
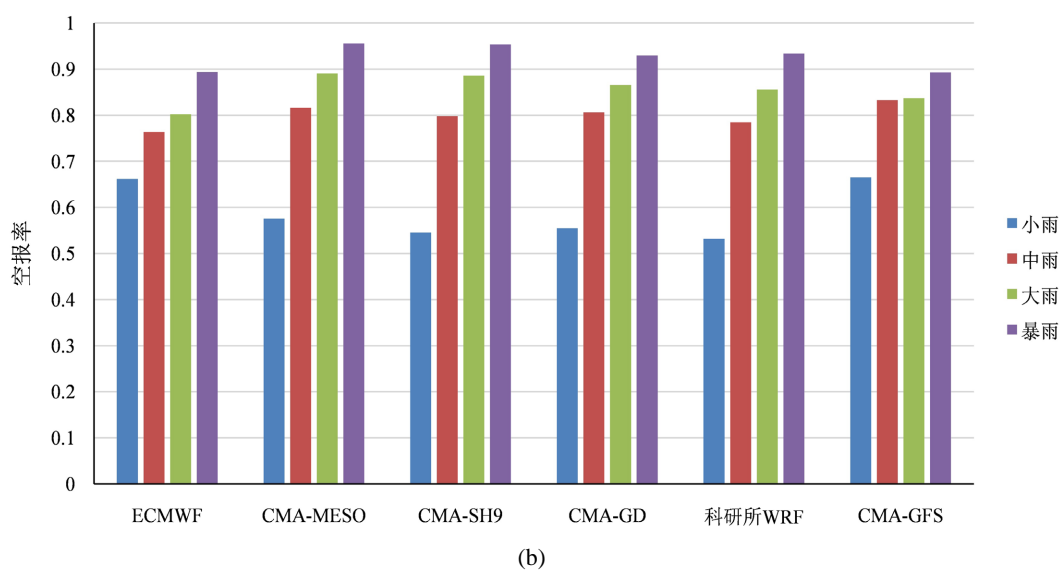
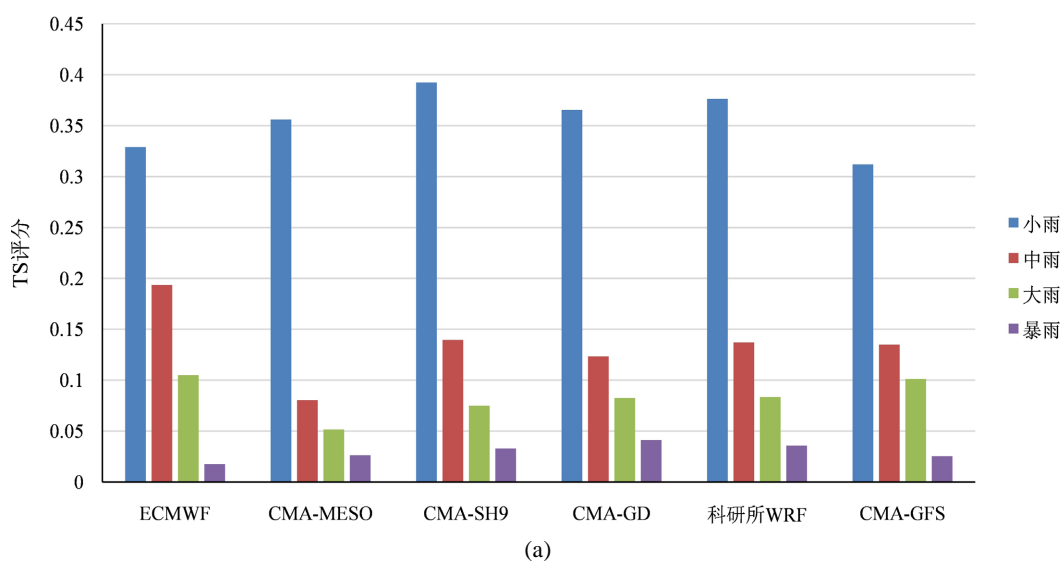


Figure 1. TS score of 6 numerical prediction models of national and regional stations in Lijiang by 24 hours from January to September 2023

图 1. 2023 年 1~9 月份丽江市国家站和区域站 6 种数值预报模式逐 24 小时预报 TS 评分

3.2. 降水分量级检验

2023年1~9月份丽江市各模式降水分级检验结果如图2(a)所示。各数值模式所有预报时效下小雨预报TS评分在0.30~0.39,中雨预报在0.07~0.20,大雨预报在0.04~0.12,暴雨预报在0.01~0.04。由于48~72h预报时效中CMA-MESO、CMA-SH9和科研所WRF模式无数据,因此下图中指标采用的是0~24及24~48小时的平均值。结果显示,所有模式对各降水量级的TS评分均小于0.4。其中,所有数值模式对于小雨量级的TS评分均显著高于其余降水量级,且各模式间差异较小,整体表现为:CMA-SH9 > 科研所WRF > CMA-GD > CMA-MESO > ECMWF > CMA-GFS。随着降水增大至中雨量级,各模式TS评分均大幅下降至0.2以下,其中全球模式ECMWF表现最佳,接近0.2,CMA-MESO表现最差,低于0.1,其余数值模式间差异较小。在大雨和暴雨量级中,各数值模式间TS评分值相差较小。可见,降雨量级与TS评分之间呈现出显著的负相关关系,即量级越大,TS评分结果越低(见表1)。因此,各数值模式对于小雨量级降水均呈现出相对较好的预报效果,这一结果指示预报员在进行短时临近预报时对于小雨预报可着重参考CMA-SH9、科研所WRF等国产模式,而对于中雨量级降水预报应着重参考全球模式ECMWF。



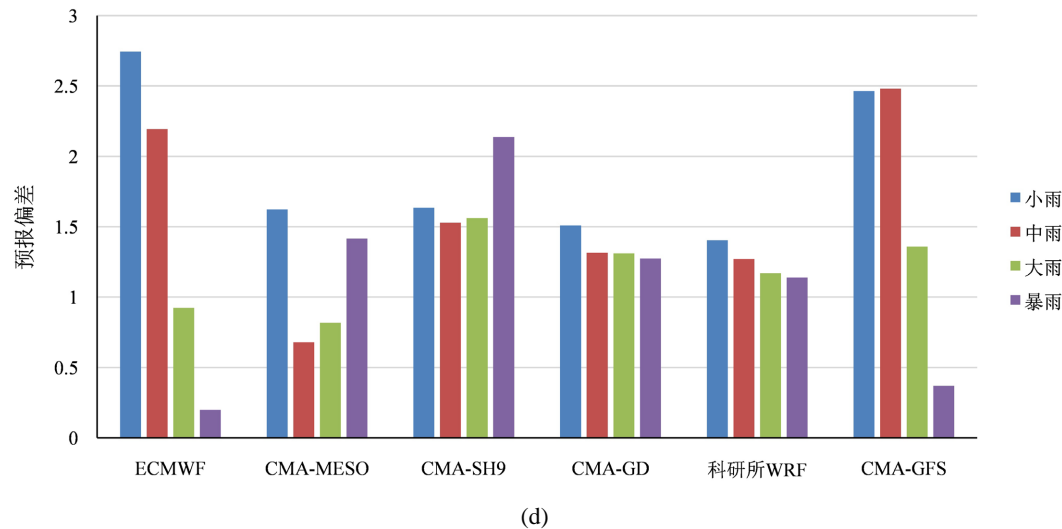
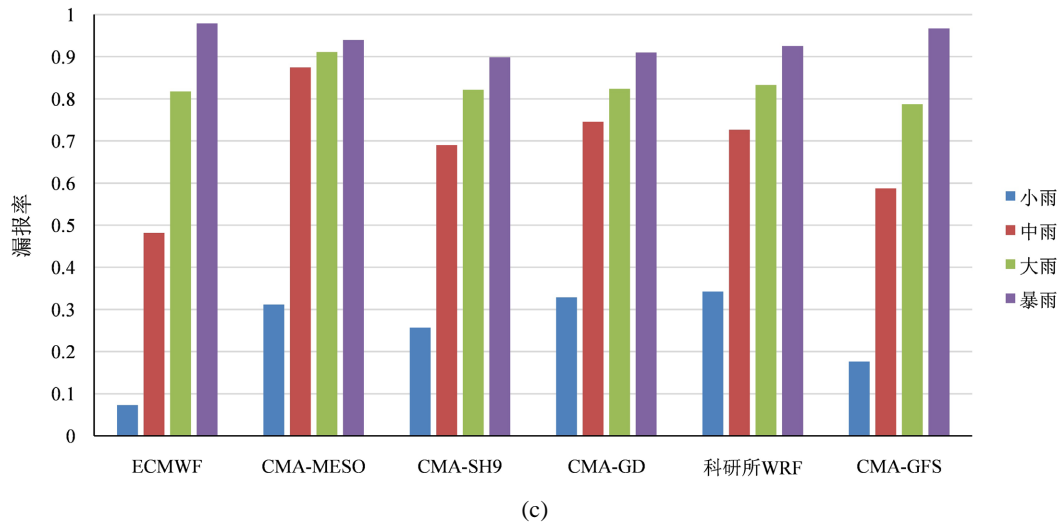


Figure 2. TS score, FAR, PO and B values of 6 numerical prediction models under different precipitation levels
图 2. 6 种数值预报模式在不同降水量级下的 TS 评分、空报率、漏报率及预报偏差

Table 1. Significance test of evaluation indexes of different precipitation levels
表 1. 不同量级降水检验评估指标显著性检验

降水量级	TS 评分	空报率(FAR)	漏报率(PO)	预报偏差(B)
小雨	0.36 ± 0.03a	0.59 ± 0.06d	0.25 ± 0.11c	1.90 ± 0.56a
中雨	0.13 ± 0.04b	0.8 ± 0.02c	0.68 ± 0.14b	1.58 ± 0.66ab
大雨	0.08 ± 0.02c	0.86 ± 0.03b	0.83 ± 0.04a	1.19 ± 0.28b
暴雨	0.03 ± 0.01d	0.93 ± 0.03a	0.94 ± 0.03a	1.09 ± 0.71b

注：不同字母代表同一列(即不同降水量级间)存在显著性差异，P < 0.05。

相较于 TS 评分，空报率呈现出相反趋势(见图 2(b))。随着降水量级增大，各模式空报率显著上升(见表 1)。各数值模式所有预报时效下小雨预报空报率在 0.53~0.67，中雨预报在 0.76~0.86，大雨预报在

0.78~0.91, 暴雨预报在 0.83~0.97。从不同降水量级下空报率的变化趋势可以看出各模式对于小雨的空报率介于 0.53~0.67 之间, 其中, 科研所 WRF、CMA-GD、CMA-SH9 以及 CMA-MESO 的空报率相较于其余模式空报率较低; 当降水量级上升至中雨时, 空报率迅速提高至 0.76~0.86, 此时 ECMWF、CMA-SH9、科研所 WRF 表现出相对较低空报率; CAM-MESO 对于暴雨预报空报率甚至高达 0.96, 而 ECMWF 及 CMA-GFS 暴雨空报率相较于其余模式表现较好。

漏报率与空报率变化趋势一致(见图 2(c))。各数值模式所有预报时效下小雨预报漏报率在 0.07~0.37, 中雨预报在 0.47~0.89, 大雨预报在 0.78~0.92, 暴雨预报在 0.87~0.98。各模式漏报率表现在不同降水量级中与空报率有些许差异。在小雨量级中, ECMWF 及 CMA-GFS 漏报率为 0.07~0.18, 显著低于其余数值模式(0.26~0.34), 中雨量级与小雨表现一致; 而在大雨量级中, 除 CMA-MESO 数值模式漏报率明显偏高外, 其余模式间无明显差异; 对于暴雨预报, CMA-SH9、CMA-GD、科研所 WRF 漏报率相对较低, 但也接近 0.9。

各数值模式 24 小时小雨预报偏差在 1.37~2.76, 中雨预报在 0.68~2.64, 大雨预报在 0.78~1.89, 暴雨预报在 0.18~2.31 (见图 2(d))。根据降雨量级与预报偏差间的相关关系可以看出, 随着降水量级增大, 除 CMA-MESO 和 CMA-SH9 之外的其余模式其与预报偏差均有所下降。

根据预报偏差的公式进一步分析, 当预报偏差数值大于 1, 代表该降水量级下空报次数大于漏报次数, 由图 2(d)可见, ECMWF 大雨和暴雨量级、CMA-MESO 中雨和大雨量级、CMA-GFS 暴雨量级的预报偏差均小于 1, 表明此时模式空报次数小于漏报次数, 代表模式的降水预报结果偏弱; ECMWF 及 CMA-GFS 模式的小雨和中雨量级、CMA-SH9 的暴雨量级预报偏差结果均大于 2, 表明此时模式空报次数远大于漏报次数, 代表模式的降水预报结果偏高。在 ECMWF、CMA-GD、科研所 WRF、CMA-GFS 这 4 种数值预报模式中, 随着降水量级增大, 预报偏差均有所下降, 可见模式空报与漏报之间的差距在逐渐缩小。

综合 TS 评分、空报率、漏报率及预报偏差的结果来看, 各模式对于小雨量级均具有较好的预报效果, 对于小雨以上量级全球模式和国产模式的预报效果均较差。

3.3. 降水预报时效检验

根据数值模式不同预报时效的 TS 评分结果来看(见表 2), 各数值模式 24 小时小雨预报 TS 评分在 0.32~0.39, 48 小时在 0.30~0.39, 72 小时在 0.31~0.35; 在中雨量级下, 24 小时预报 TS 评分在 0.09~0.20, 48 小时在 0.07~0.19, 72 小时在 0.10~0.18; 在大雨量级下, 24 小时预报 TS 评分在 0.06~0.12, 48 小时在 0.04~0.09, 72 小时在 0.07~0.09; 在暴雨量级下, 24 小时预报 TS 评分在 0.02~0.04, 48 小时在 0.01~0.04, 72 小时在 0.01~0.02。

Table 2. Evaluation indexes of 6 numerical prediction models of different precipitation levels under 24 h, 48 h, 72 h forecast timeliness.

表 2. 6 种数值预报模式 24 h、48 h、72 h 预报时效各量级降水检验评估指标

数值模式	时效	TS 评分				空报率(FAR)				漏报率(PO)				预报偏差(B)			
		小雨	中雨	大雨	暴雨	小雨	中雨	大雨	暴雨	小雨	中雨	大雨	暴雨	小雨	中雨	大雨	暴雨
ECMWF	24 h	0.33	0.20	0.12	0.02	0.66	0.76	0.78	0.88	0.07	0.47	0.80	0.98	2.76	2.20	0.91	0.18
	48 h	0.33	0.19	0.10	0.02	0.66	0.77	0.82	0.91	0.07	0.49	0.83	0.98	2.73	2.19	0.94	0.22
	72 h	0.34	0.18	0.09	0.01	0.66	0.78	0.83	0.94	0.08	0.53	0.83	0.98	2.67	2.11	0.98	0.30
	均值	0.33	0.19	0.10	0.02	0.66	0.77	0.81	0.91	0.07	0.50	0.82	0.98	2.72	2.17	0.94	0.23

续表

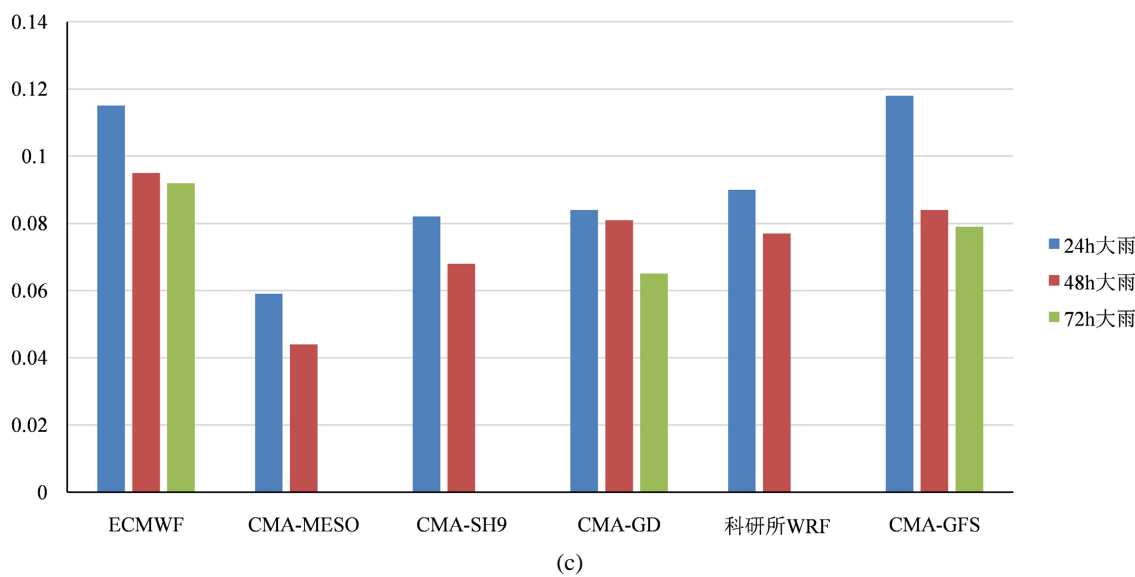
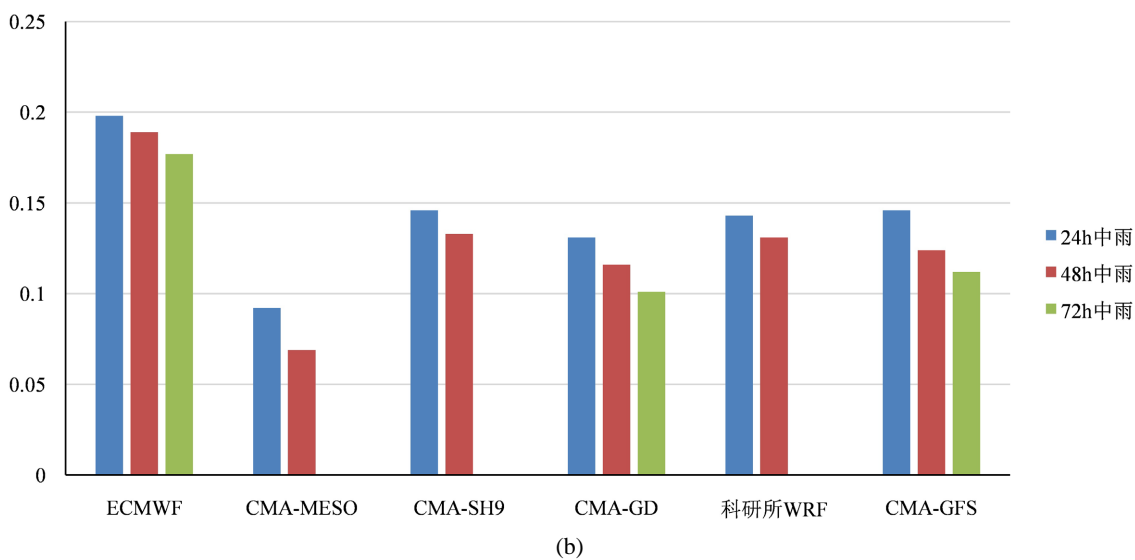
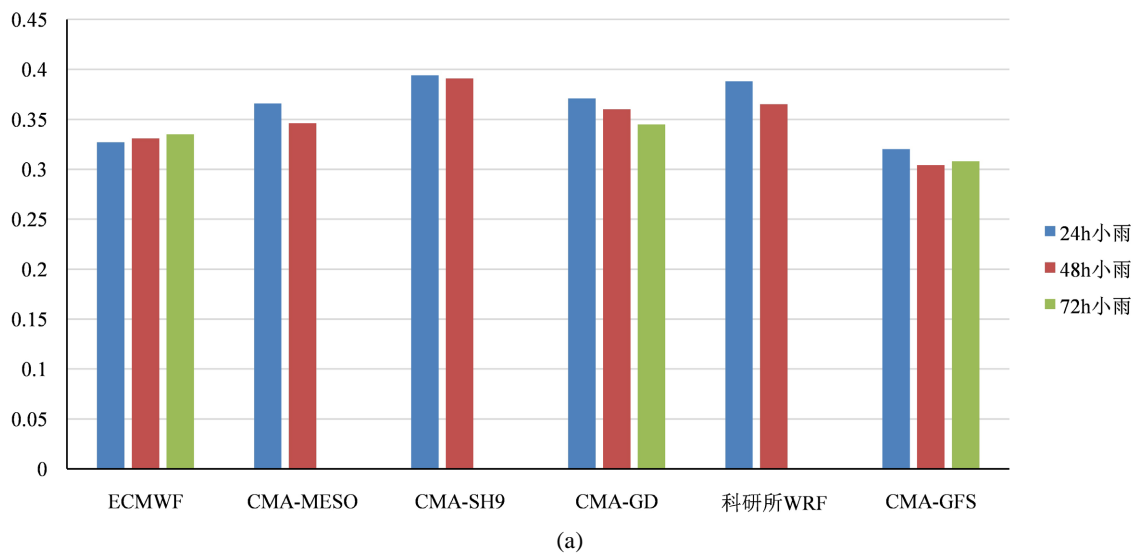
CMA-MESO	24 h	0.37	0.09	0.06	0.04	0.56	0.79	0.87	0.94	0.31	0.86	0.90	0.92	1.59	0.68	0.78	1.32
	48 h	0.35	0.07	0.04	0.02	0.59	0.84	0.91	0.97	0.32	0.89	0.92	0.96	1.66	0.68	0.86	1.52
	72 h	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	均值	0.36	0.08	0.05	0.03	0.58	0.82	0.89	0.96	0.31	0.88	0.91	0.94	1.62	0.68	0.82	1.42
CMA-SH9	24 h	0.39	0.15	0.08	0.04	0.54	0.79	0.88	0.95	0.25	0.67	0.80	0.87	1.64	1.56	1.65	2.31
	48 h	0.39	0.13	0.07	0.03	0.55	0.81	0.89	0.96	0.26	0.71	0.84	0.92	1.63	1.50	1.47	1.96
	72 h	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	均值	0.39	0.14	0.08	0.03	0.55	0.80	0.89	0.95	0.26	0.69	0.82	0.90	1.63	1.53	1.56	2.14
CMA-GD	24 h	0.37	0.13	0.08	0.05	0.55	0.80	0.87	0.92	0.32	0.72	0.82	0.90	1.53	1.39	1.39	1.31
	48 h	0.36	0.12	0.08	0.04	0.56	0.81	0.86	0.94	0.34	0.77	0.83	0.92	1.49	1.24	1.23	1.24
	72 h	0.35	0.10	0.07	0.02	0.57	0.83	0.89	0.96	0.36	0.80	0.87	0.96	1.48	1.21	1.19	1.08
	均值	0.36	0.12	0.08	0.03	0.56	0.82	0.87	0.94	0.34	0.76	0.84	0.93	1.50	1.28	1.27	1.21
科研所 WRF	24 h	0.39	0.14	0.09	0.04	0.53	0.77	0.84	0.93	0.32	0.72	0.83	0.92	1.44	1.25	1.10	1.06
	48 h	0.37	0.13	0.08	0.03	0.54	0.80	0.87	0.94	0.37	0.74	0.84	0.93	1.37	1.29	1.24	1.22
	72 h	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	均值	0.38	0.14	0.08	0.04	0.53	0.78	0.86	0.93	0.34	0.73	0.83	0.93	1.41	1.27	1.17	1.14
CMA-GFS	24 h	0.32	0.15	0.12	0.04	0.66	0.82	0.80	0.83	0.17	0.58	0.78	0.96	2.43	2.32	1.12	0.26
	48 h	0.30	0.12	0.08	0.01	0.67	0.85	0.87	0.96	0.18	0.60	0.80	0.98	2.50	2.64	1.60	0.48
	72 h	0.31	0.11	0.08	0.02	0.67	0.86	0.89	0.96	0.19	0.63	0.79	0.96	2.46	2.63	1.89	0.87
	均值	0.31	0.13	0.09	0.02	0.67	0.84	0.85	0.91	0.18	0.60	0.79	0.97	2.46	2.53	1.54	0.54

根据数值模式不同预报时效的空报率结果来看, 各数值模式 24 小时小雨预报空报率在 0.53~0.66, 48 小时在 0.54~0.67, 72 小时在 0.57~0.67; 在中雨量级下, 24 小时预报空报率在 0.76~0.82, 48 小时在 0.77~0.85, 72 小时在 0.78~0.86; 在大雨量级下, 24 小时预报空报率在 0.78~0.88, 48 小时在 0.82~0.91, 72 小时在 0.83~0.89; 在暴雨量级下, 24 小时预报空报率在 0.83~0.95, 48 小时在 0.83~0.95, 72 小时在 0.94~0.96。

根据数值模式不同预报时效的漏报率结果来看, 各数值模式 24 小时小雨预报漏报率在 0.07~0.32, 48 小时在 0.07~0.37, 72 小时在 0.08~0.36; 在中雨量级下, 24 小时预报漏报率在 0.47~0.86, 48 小时在 0.49~0.89, 72 小时在 0.53~0.80; 在大雨量级下, 24 小时预报漏报率在 0.78~0.90, 48 小时在 0.80~0.92, 72 小时在 0.79~0.87; 在暴雨量级下, 24 小时预报漏报率在 0.87~0.98, 48 小时在 0.92~0.98, 72 小时在 0.96~0.98。

根据数值模式不同预报时效的预报偏差结果来看, 各数值模式 24 小时小雨预报偏差在 1.44~2.76, 48 小时在 1.37~2.73, 72 小时在 1.48~2.67; 在中雨量级下, 24 小时预报偏差在 0.68~2.32, 48 小时在 0.68~2.64, 72 小时在 1.21~2.63; 在大雨量级下, 24 小时预报偏差在 0.78~1.65, 48 小时在 0.86~1.60, 72 小时在 0.98~1.89; 在暴雨量级下, 24 小时预报偏差在 0.18~2.31, 48 小时在 0.22~1.96, 72 小时在 0.30~1.08。

经分析, 在不同降水量级下, 逐 24 小时预报时效 TS 评分变化并不显著(见图 3)。随着预报时效逐渐增长, 各模式 TS 评分均略有下降, 空报率和漏报率均略有上升。这一结果表明, 在 1~3 天的短期预报中, 时效越长模式预报的准确性均越低。



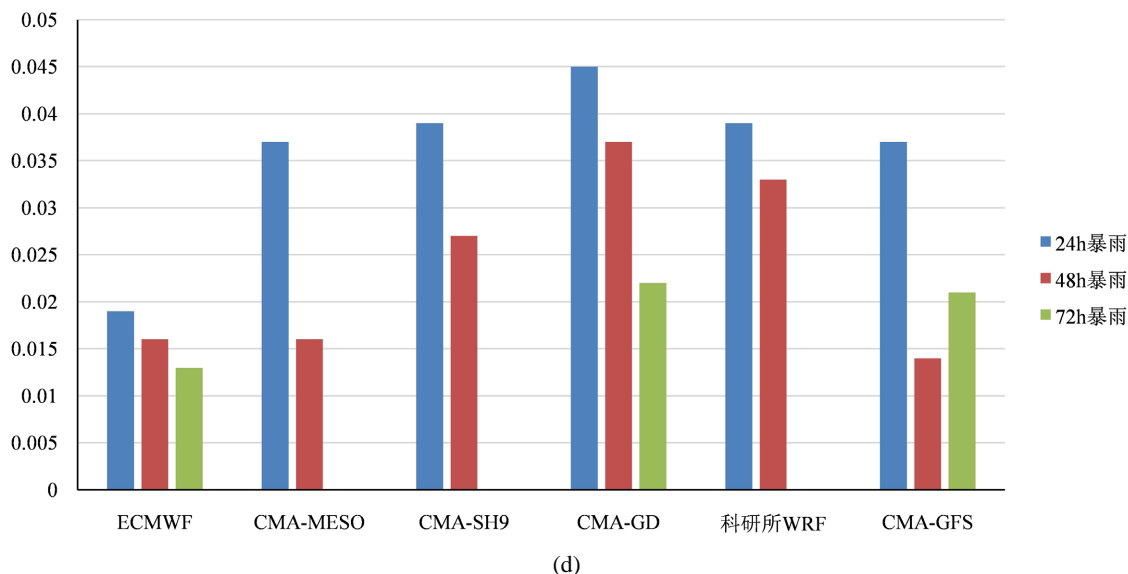


Figure 3. TS score of 6 numerical prediction models by 24 hours under 4 precipitation levels

图 3. 6 种数值预报模式在 4 种降水量级下逐 24 小时预报时效 TS 评分

4. 结论与讨论

1) 从各数值预报模式逐 24 小时晴雨预报正确率检验结果来看, 欧洲中心全球模式正确率低于国产模式, 随着预报时效的增长, ECMWF 全球模式正确率基本保持稳定水平, 其余区域模式均略微有下降, 但下降趋势并不显著。结果表明, 国产数值预报模式的晴雨预报具有较强的参考价值, 其中尤以研究所 WRF 和 CMA-SH9 准确率较高。

2) 从各数值预报模式降水量级 TS 评分检验结果来看, 各模式对于降水量级的预报效果较差, TS 评分均低于 0.4, 其中, 所有模式的小雨量级 TS 评分显著高于其余量级, 且随着降水量级增大, 各模式 TS 评分显著下降。在小雨量级下, TS 评分依次为 CMA-SH9 > 研究所 WRF > CMA-GD > CMA-MESO > ECMWF > CMA-GFS; 在中雨和大雨量级中, 全球模式 ECMWF 表现最佳, CMA-MESO 表现最差, 其余数值模式间差异较小; 在暴雨量级中, 研究所 WRF 评分相对更高。

3) 从各数值预报模式降水量分级空报率和漏报率检验结果来看, 所有数值模式的空报率和漏报率与降水量呈现显著正相关关系, 即量级越大, 空报率和漏报率越高。在小雨量级下, 研究所 WRF、CMA-GD、CMA-SH9、CMA-MESO 的空报率较低, 但漏报率较高, ECMWF 和 CMA-GFS 反之。在中雨量级中, 各模式空报率差异不大, 其中 ECMWF、CMA-SH9、研究所 WRF 表现出相对较低空报率; 而 ECMWF 漏报率最低, CMA-MESO 漏报率最高, 其余模式差异较小。在大雨量级中, ECMWF 空报率最低, CMA-MESO 漏报率最高, 其余模式差异较小。在暴雨量级中, 空报率和漏报率均达到 0.9 以上, 此时 ECMWF 和 CMA-GFS 空报率最低, 但其漏报率最高。从预报偏差的检验结果来看, ECMWF、CMA-GD、研究所 WRF、CMA-GFS 这 4 种数值预报模式中, 随着降水量级增大, 预报偏差均有所下降, 可见在小量级下空报次数远大于漏报次数, 而在大量级下, 空报次数与漏报次数间差异逐渐减小。

4) 从各数值预报模式不同预报时效的检验结果来看, 随着预报时效逐渐增长, 各数值模式 TS 评分均略有下降, 空报率和漏报率均略有上升。

综合多项数值模式的检验结果可知: 丽江市在进行晴雨预报时 CMA-SH9、研究所 WRF 和 CMA-GD 这 3 种模式具有较强的参考意义; 在进行降雨预报时, 对于小雨量级, 所有数值模式的预报效果均可参考, 对于中雨量级, 可参考 ECMWF 全球模式, 其 TS 评分、漏报率和空报率表现均相对较好; 对于大

雨和暴雨量级, CMA-SH9、科研院所 WRF 和 CMA-GD 这 3 种模式在各指标下表现相对稳定。在所有模式中, CMA-MESO 在各预报中整体表现较差, 科研院所 WRF 整体表现良好, 因此, 在预报中可着重参考科研院所 WRF 数值模式开展工作。

基金项目

2023 年度云南省气象局自筹科研项目(YZ202318)。

参考文献

- [1] 吴徐燕. 广州 GRAPES 模式与 EC 模式广西地面要素预报检验评估——以 2019 年汛期为例[J]. 农业与技术, 2020, 40(18): 108-111.
- [2] 王晓峰, 周荣卫. 全球模式降水预报在雅砻江流域汛期的效果检验[J]. 气象, 2021, 47(10): 1193-1205.
- [3] 徐同, 杨玉华, 李佳, 等. SMS-WARMS V2.0 模式对中国西南地区降水预报能力的客观检验[J]. 气象, 2019, 45(8): 1065-1074.
- [4] 刘静, 任川, 赵梓淇, 等. 多区域高分辨率模式强降水预报检验分析[J]. 气象, 2022, 48(10): 1292-1302.
- [5] 赵宁坤, 张秀年, 孙俊奎, 等. 高分辨率区域模式降水预报在云南的检验[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(1): 78-86.
- [6] 李华宏, 王曼, 曹杰, 等. WRF 模式在云南一次强降水过程中的应用[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 538-545.
- [7] 段旭, 王曼, 陈新梅, 等. 中尺度 WRF 数值模式系统本地化业务试验[J]. 气象, 2011, 37(1): 39-47.
- [8] 邹阳, 孙俊奎, 王将. WRF 模式对昆明降水量预报的模拟检验[J]. 云南地理环境研究, 2018, 30(1): 57-64.
- [9] 朱莉, 王曼, 李华宏, 等. 基于 WRF 模式的云南短时强降水物理量特征[J]. 大气科学学报, 2019, 42(5): 755-768.
- [10] 赵韬, 周泓, 杨靖新, 等. 丽江市汛期 2 次暴雨天气过程对比分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(S1): 93-102.
- [11] Gofa, F., Boucouvala, D., Louka, P., *et al.* (2017) Spatial Verification Approaches as a Tool to Evaluate the Performance of High Resolution Precipitation Forecasts. *Atmospheric Research*, **208**, 78-87.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.09.021>
- [12] 李珊珊, 涂静, 陈玉梅, 等. 2023 年广东龙舟水特征及模式降水预报检验[J]. 广东气象, 2023, 45(5): 44-47.
- [13] 李璠, 王曼, 张瑾文. 华东区域数值预报降水产品在云南区域的检验评估[J]. 云南地理环境研究, 2020, 32(3): 34-40.