

陈龙,陈静静,胡媚,等,2024.华南快速循环同化模式在湖南不同环流型下的小时降水预报性能检验[J].气象,50(4):434-448. Chen L, Chen J J, Hu M, et al. 2024. Evaluation of hourly quantitative precipitation forecast of the Rapid Updating Cycle Assimilation and Forecasting System in South China based on circulation classification in Hunan Province[J]. Meteor Mon, 50(4):434-448(in Chinese).

华南快速循环同化模式在湖南不同环流型下的小时降水预报性能检验*

陈 龙^{1,2} 陈静静^{1,2} 胡 媚^{1,2} 陈 鹤^{1,2}

1 湖南省气象台,长沙 410118

2 气象防灾减灾湖南省重点实验室,长沙 410118

提 要: 利用 T-mode 斜交旋转主成分分析法,对湖南 2021 年汛期(4—9 月)逐小时 850 hPa 风场进行环流分型,在此基础上开展同期华南快速循环同化模式(CMA-GD-R3)小时降水预报性能检验。结果表明:影响湖南 2021 年汛期的主要环流型为西南涡切变型、切变型、副热带高压边缘南风型和台风外围东风型 4 类;模式小时降水预报的晴雨准确率和分级降水 TS 评分日变化特征明显,晴雨准确率夜间高于白天,分级降水 TS 评分峰值出现在早晨,各环流型的临近时效降水预报效果较好,短时强降水发生频次最高的西南涡切变型晴雨准确率较低,副热带高压边缘南风型在较大量级降水表现相对较差;SAL(structure amplitude and location)检验显示,西南涡切变型、切变型过程模式位置预报较接近实况,强度预报表现为前弱后强,副热带高压边缘南风型过程预报落区分散,位置预报不稳定,整体强度较实况明显偏弱,台风外围东风型过程在短时预报时效落区接近实况,强度预报显著偏弱,该方法能较客观地反映模式降水预报空间偏差。

关键词: 华南快速循环同化模式(CMA-GD-R3),环流分型,小时降水预报,SAL 检验

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.061401

Evaluation of Hourly Quantitative Precipitation Forecast of the Rapid Updating Cycle Assimilation and Forecasting System in South China Based on Circulation Classification in Hunan Province

CHEN Long^{1,2} CHEN Jingjing^{1,2} HU Mei^{1,2} CHEN He^{1,2}

1 Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410118

2 Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Changsha 410118

Abstract: The circulation classification of 850 hPa hourly wind field in the rainy season in Hunan Province from April to September in 2021 is carried out by using the T-mode oblique rotating principal component analysis method. On this basis, the evaluation is carried out for the hourly precipitation forecast of Rapid Updating Cycle Assimilation and Forecasting System in South China (CMA-GD-R3) in the same period. The results show that the main circulation types affecting the rainy season in Hunan in 2021 are the southwest vortex shear type, the shear type, the southerly type at the edge of the subtropical high and the easterly type at the periphery of the typhoon. The model shows good forecasting ability for the clear-rainy

* 中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J025)、珠江流域(华南区域)气象科研开放基金项目(ZJLY202310)、湖南省重点领域研发计划项目(2019SK2161)和湖南省气象局重点科研课题(XQKJ22A005)共同资助

2022 年 10 月 25 日收稿; 2024 年 3 月 3 日收修定稿

第一作者:陈龙,主要从事天气预报技术研究. E-mail:chlnuist@163.com

通讯作者:陈静静,主要从事灾害性天气预报预警研究. E-mail:17860294@qq.com

accuracy rate and graded precipitation. The daily variations of clear-rainy accuracy rate and TS of hourly precipitation forecast of CMA-GD-R3 are obvious. The clear-rainy accuracy rate is higher in the night time than that during the day, the peak value of TS score for graded precipitation appears in the morning, and the effects of rainfall nowcasting of all circulation types are better. The southwest vortex shear type, which has the highest frequency of short-term heavy precipitation, has the lowest accuracy. The southerly type at the edge of the subtropical high has relatively poor performance in heavier precipitation. The SAL test shows that the rainfall location forecast of the model in the cases of the southwest vortex shear type and the shear type is closer to the observation. The intensity forecast is weak first but then strong. The precipitation location forecast in the cases of the southerly type at the edge of the subtropical high is scattered, and the location forecast is unstable. The overall intensity is obviously weaker than the observation. The location forecast in the cases of the easterly type at the periphery of the typhoon is close to the observation in the short-time forecast, and the intensity forecast is significantly weaker. The SAL method can more objectively reflect the structure, intensity, and location deviation in the hourly precipitation forecast.

Key words: CMA-GD-R3, circulation classification, hourly precipitation forecast, SAL (structure amplitude and location) test

引言

湖南地处东亚季风气候区,降水过程频繁,强降水是造成洪涝灾害的重要诱因(戴泽军等,2015),开展小时定量降水预报,特别是短时强降水预报研究,为提高降水预报的精细化、精准化水平和提升气象防灾减灾能力提供必要支撑。强降水的发生发展与多尺度过程及其相互作用密切相关,对降水过程进行天气分型研究是一个重要研究方向。因此,有大量气象学者利用主观分型和 T-mode 斜交旋转主成分分析(T-mode principal component analysis using oblique rotation,以下简称 PCT)、自组织映射(self-organizing maps,SOM)、模拟退火算法和多元化随机化技术相结合的 SANDRA(simulated annealing and diversified randomization)、迁移卷积神经网络(convolutional neural networks,CNN)等客观分型方法,开展了不同地区、不同天气型下的降水特征及机理机制分析,为降水预报业务提供参考(Huth,1996;许爱华等,2014;闵晶晶等,2015;钱维宏等,2016;罗未萌等,2018;黎慧琦等,2019;吴胜男和江志红,2019;蔡金圻等,2021)。陈静静等(2016)在针对湖南地区暴雨过程的天气分型研究中指出,影响汛期暴雨的环流型主要有低涡冷槽型、地面暖倒槽锋生型、副热带高压(以下简称副高)边缘型、台风型、梅雨锋切变型和华南准静止锋型,其他学者也对湖南持续性暴雨、西南涡暴雨、极端降水的环流分型

开展了研究(戴泽军等,2019;毛紫怡和刘金卿,2021;陈红专,2021)。

近年来,随着高时空分辨率的中尺度区域数值模式发展,其具备的模拟中尺度系统和局地对流的能力为小时定量降水预报提供了可靠支撑,分析不同环流形势下模式对于特定物理过程的模拟性能及偏差特征是提高强降水预报的重要环节(王彬雁等,2020;王婧卓等,2021;陈昊明等,2021;谢漪云和王建捷,2021)。传统的降水预报检验方法有 TS、ETS 等(Schaefer,1990;Casati et al,2008;苏翔等,2022),但这一类点对点的评分方法往往会产生“双惩罚效应”,即预报与实况雨带位置的细微偏差带来漏报、空报偏高结果,对高分辨率数值模式的适用性降低,开展面向对象的空间检验方法研究可有效避免双重惩罚,并且能够反映模式预报的空间结构和尺度变化(刘凑华和牛若芸,2013;潘留杰等,2017;陈昊明等,2021)。目前,面向对象的空间检验方法主要有基于对象检验的空间检验方法(method for object-based diagnostic evaluation,MODE)、SAL(structure amplitude and location)等。MODE 是 Davis et al(2006a;2006b)在热带气旋预报评估基础上发展而来的模式降水预报检验技术,许多学者基于 MODE 方法评估了日本细网格、ECMWF 细网格、华东区域中尺度模式、本地中尺度区域模式等降水预报(薛春芳和潘留杰,2016;曲巧娜等,2019;王彬雁等,2020),并在此基础上发展了 MODE-TD(Bullock,2011)和降水预报优选方法(徐同等,

2020;盛春岩等,2021)。MODE 方法参数确定的主观性强,而 SAL 检验是德国学者 Wernli et al (2008)提出的,该方法在研究范围内的降水主、个体识别的基础上,可对降水预报的结构、强度、位置进行检验,方法科学、结果直观,公颖(2010)、王彬雁等(2020)应用此方法检验日本、T639、CMA-MESO(原 GRAPES-MESO)等模式降水预报,结果显示 SAL 检验能从多角度反映模式降水预报性能,为预报员提供了较为合理、可靠的参考依据。

空间检验方法在评估模式预报性能过程中,大多是针对整体或者部分个例的 24 h 累计降水预报进行检验,未针对模式小时降水预报开展空间检验,也未探讨不同环流背景下模式预报性能差异。而小时环流场样本多、主观分型结果因人而异,PCT 可以较准确地反映原始环流场的特征,不会因分型对象的调整而有太大变化,得到的时空场也更加稳定(Huth, 1996; Dong et al, 2020)。因此,本文利用 PCT 对 850 hPa 纬向风和经向风进行客观环流分型,结合 SAL 检验从多个角度评估模式预报性能特点,开展 CMA-GD-R3 不同环流型下小时降水预报的空间检验,更系统、全面地考察模式降水预报能力,对小时降水预报产品应用、模式改进及客观预报技术研发具有实际参考意义。

1 资料与方法

1.1 资料

模式预报场为 2021 年 4—9 月 CMA-GD-R3 每日 24 h 逐 1 h 起报滚动更新未来 30 h 逐 1 h,空间分辨率 3 km×3 km 的降水预报产品,双线性插值至 5 km×5 km,预报检验范围为 24.50°~30.25°N、108.65°~114.40°E(图 1)。总样本数为 4392 个,剔除文件不完整、错误等样本,实际检验样本数为 4173 个。

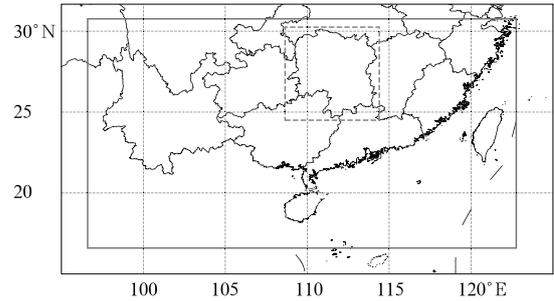


图 1 CMA-GD-R3 预报场范围(灰色实线方框)及预报检验范围(灰色虚线方框)

Fig. 1 The prediction (grey solid box) and evaluation (grey dotted box) range of CMA-GD-R3

观测实况场采用同期中国区域融合降水分析系统(CMA multi-source merged precipitation analysis system, CMPAS)逐 1 h 实况格点分析产品,空间分辨率为 5 km×5 km(潘昞等,2018;师春香等,2019)。本文中国地图底图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网下载的审图号为 GS(2019)3082 号的标准地图制作,底图无修改。

1.2 方法

传统的点对点检验采用晴雨准确率(accuracy, ACC)和分级降水 TS 评分,1 h 累计降水分级检验阈值设置为 0.1、1、3、5、10、20 mm。计算时采用列联表形式(表 1)将预报和观测晴雨或降水事件进行判定,对符合阈值条件的降水事件赋值为“1”,反之则赋值为“0”。计算如式(1)和式(2)所示, H 代表命中, F 代表空报, M 代表漏报, C 代表正确否定。

$$ACC = \frac{\sum(H + C)}{\sum(H + F + M + C)} \quad (1)$$

$$TS = \frac{\sum H}{\sum(H + F + M)} \quad (2)$$

表 1 晴雨准确率和降水 TS 评分列联表

预报	降水 TS 评分		预报降水/mm	晴雨准确率		
	观测			实况降水/mm		
	有	无		(0, 0.1)	[0.1, +∞)	0
有	H	F	≥ 0.1	H	H	F
无	M	C	< 0.1	C	M	C

1.2.1 个例挑选标准

挑选短时强降水个例:若 1 个格点出现 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降水,且以该点为中心 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 范围内,20%以上格点出现 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降水,则认为出现 1 个短时强降水单体;1 个时次至少出现 1 次短时强降水单体,则认为该时次为短时强降水发生时次,记为 1 次短时强降水事件。

1.2.2 SAL 检验

在 SAL 检验前首先完成降水阈值确定识别对象、预报与实况目标匹配合并,具体步骤如下:(1)降水阈值确定识别对象:采用王彬雁等(2020)提出的,将 $\geq 0.1 \text{ mm}$ 的降水量从小到大排列得到新的序列,再将最大降水量序号乘以 0.95 后,将最接近该整数序号对应降水量的 1/15 作为降水阈值,将大于此阈值的格点作为降水主体成员;(2)匹配预报与实况目标:通过目标质心距离、目标面积、最小边界距离等属性,将相似的观测场和预报场目标进行匹配,如果观测场和预报场目标存在多对多的情况,将多对多的目标进行合并;(3)在被标记过的网格范围内降水场中进行 SAL 检验。

SAL 检验的强度参数 A 计算方法如下(Wernli et al,2008):

$$\begin{cases} A = \frac{D(R_{\text{mod}}) - D(R_{\text{obs}})}{0.5[D(R_{\text{mod}}) + D(R_{\text{obs}})]} \\ D(R) = \frac{1}{n} \sum_{(i,j) \in D} R_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $D(R)$ 为区域内所有格点降水量的平均值(单位:mm), R_{ij} 为格点 (i,j) 处的降水量(单位:mm), $D(R_{\text{mod}})$ 为预报场的平均值, $D(R_{\text{obs}})$ 为实况场的平均值。 A 取值范围为 $[-2,2]$, $A > 0$ 表示模式预报较实况偏强, $A < 0$ 表示模式预报较实况偏弱, $A = 0$ 表示预报与实况强度一致。 A 的绝对值越接近 0,表明预报强度与实况越接近。

SAL 检验的位置参数 L 计算方法如下(Wernli et al,2008):

$$\begin{cases} L = L_1 + L_2 \\ L_1 = \frac{|x(R_{\text{mod}}) - x(R_{\text{obs}})|}{d} \\ L_2 = 2 \times \frac{|r(R_{\text{mod}}) - r(R_{\text{obs}})|}{d} \\ r = \frac{\sum_{n=1}^m R_n \times |x - x_n|}{\sum_{n=1}^m R_n} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x(R_{\text{mod}})$ 为预报场降水主体的重心位置, $x(R_{\text{obs}})$ 为实况场降水主体的重心位置, d 为区域内格点间的最大距离, x 为降水主体重心, x_n 为第 n 个降水个体的重心, r 为 m 个降水个体以体内总降水量值为权重的 $|x - x_n|$ 加权平均,其中 $r(R_{\text{mod}})$ 为预报场的加权平均, $r(R_{\text{obs}})$ 为实况场的加权平均, r 值越大,表示降水个体的降水量越大、离降水主体重心越远。 L 由 L_1 、 L_2 两部分组成, L_1 为区域内预报与实况降水主体两个重心间的距离, L_2 为降水主体重心与每个降水个体重心之间的平均距离, L_1 、 L_2 的取值范围均为 $[0,1]$, L 取值范围为 $[0,2]$ 。

对 L 的分析可知,如果 L_1 对 L 误差贡献大,表明降水主体整体位置预报与实况有一定差异;如果 L_2 对 L 误差贡献大,表明预报场与实况场识别的降水个体与主体重心位置存在一定偏差,未能很好地捕捉到个体与主体重心的分布情况。因此,预报降水主体重心与实况降水主体重心重合度越高,且预报与实况降水个体重心加权平均值越接近时, L 越趋近 0,预报降水位置与实况降水位置越逼近。

SAL 检验的结构参数 S 计算方法如下(Wernli et al,2008):

$$\begin{cases} S = \frac{V(R_{\text{mod}}) - V(R_{\text{obs}})}{0.5[V(R_{\text{mod}}) + V(R_{\text{obs}})]} \\ V(R) = \frac{\sum_{n=1}^m R_n V_n}{\sum_{n=1}^m R_n} \\ V_n = \frac{\sum_{(i,j) \in D} R_{ij}}{R_n^{\text{max}}} = \frac{R_n}{R_n^{\text{max}}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: m 为降水个体数; R_n 为第 n 个降水个体内的总降水量(单位:mm), R_n^{max} 为第 n 个降水个体内的最大降水量(单位:mm); V_n 为第 n 个降水个体内总降水量与最大降水量的比值, $V(R)$ 为 m 个降水个体以体内总降水量为权重 V_n 的加权平均,其中 $V(R_{\text{mod}})$ 为预报场的加权平均, $V(R_{\text{obs}})$ 为观测场的加权平均。 S 取值范围为 $[-2,2]$, $S > 0$ 表示预报降水范围较实况偏大,或者预报降水中心降水量较实况偏小,或者前述两种情况同时存在; $S < 0$ 则相反。例如实况为大范围强降水,预报为小范围对流性强降水,则 $S < 0$ 。

1.2.3 客观环流分型方法

客观环流分型方法 PCT 将多个物理量作为一个整体进行时空展开,可同时表现要素的空间分布

以及各要素之间的空间关系。本方法将原始高维数据 Z 分解为 F 和 A 的 2 个低维矩阵, 每行为 N 个空间格点, 每列为 M 个观测时次, F 为主成分, A 为主成分载荷。所有的主成分按照对应特征值的大小排序, 特征值越大表示对原数据的贡献最大。环流分型结果评估采用可释簇方差 (explained cluster variance, ECV) 和轮廓系数 (silhouette index, SIL) (Philipp et al, 2016), 当 ECV 达到拐点或 SIL 最大时, 分型结果最可信。

本文利用 2021 年 4—9 月 ERA5 逐小时再分析资料, 对 $23^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$ 范围的 850 hPa 经向风和纬向风开展分型, 参与分型的样本总数为 4392 个, 分别对 3~9 类分型结果进行评估, 图 2 显示, 分型结果为 4 类时, ECV 达到拐点, SIL 最大, 因此分析 4 种环流型下 CMA-GD-R3 的降水预报效果。

2 降水实况分析

2.1 降水量分布

从 2021 年 4—9 月逐月累计降水量和短时强降水累计次数分布来看, 4 月 (图 3a, 3g) 累计降水量大值区 (≥ 200 mm) 主要出现在湘北和湘西南地区, 累计降水基本未受短时强降水影响; 5 月 (图 3b, 3h) 降雨自北向南明显增多, 总累计降水量最大, 湘中以南大部地区均达 300 mm 以上, 湘南局地达 500 mm 以上, 湘西、湘中以南短时强降水发生次数较多; 6 月和 7 月 (图 3c, 3i, 3d, 3j) 累计降水量大值区范围明显缩小, 雨带北抬, 短时强降水发生次数较多区域与累计降水量大值区基本一致; 8 月 (图 3e, 3k) 受低涡切变东移影响, 湘西北、湘北部分地区累计降水量

超过 300 mm, 湘东有分散的累计降水量大于 200 mm 区域, 湘西北、湘东短时强降水发生次数增多; 9 月 (图 3f, 3l) 雨带进一步北抬, 全省累计降水量明显减小, 仅山区局地超过 100 mm, 局地发生短时强降水。2021 年汛期湖南降雨整体呈现南北多、中部少分布, 短时强降水累计次数分布与累计降水量分布基本一致。

2.2 降水逐小时分布

分析湖南范围空间平均的逐小时累计降水量和短时强降水累计频次 (图 4), 小时累计降水量呈双峰型分布, 2 个峰值分别出现在清晨 (00 时) 和午后 (08 时) (世界时, 下同), 呈半日循环, 清晨峰值可能与向东传播的中尺度对流系统、低空急流的日变化等因素有关 (Dai, 2001; Chen et al, 2010), 午后峰值与热力作用加强有关 (Bao et al, 2011; 宇如聪等, 2014), 最大值出现在 00 时, 白天时段累计降水量高于夜间时段, 在正午 (04 时) 和午夜 (16 时) 分别达到累计降水量最小值, 与宇如聪等 (2014) 分析的中国中东部降水日变化特征一致。逐时短时强降水累计频次也呈双峰分布, 午后 (06 时) 受热力作用影响, 短时强降水频次增加, 13 时达到峰值, 随着热力作用减弱, 频次逐步下降, 夜间西南气流的加强等因素导致 17 时之后短时强降水频次再次增加, 伴随着白天西南气流减弱和热力作用偏弱, 22 时后短时强降水频次快速下降, 在 05 时达到谷值。

3 评估结果分析

3.1 环流分型结果分析

4 类环流型的总解释方差达 97.99%, 各环流型的样本数分别为 1631、895、1118、748 次, 各环流型下短时强降水的样本数分别为 521、94、55、40 次 (表 2)。第 1 类占比最高, 短时强降水发生概率也最大, 达 31.9%, 主要出现在 4—6 月, 其次是 8 月, 7 月出现 95 次该环流型, 其中 60 次达到短时强降水个例标准, 夜间发生频次高于白天 (图略), 从 850 hPa 合成风场来看, 此类为西南涡切变型 (图 5a, 5b), 西南风最大达 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风速中心位于广西中部, 辐合切变位于湘中以北, 累计降水量大值与风速辐合区相对应。第 2 类为切变型 (图 5c, 5d), 南北风切变位于湘南地区, 切变线附近累计降水量大, 各月均有

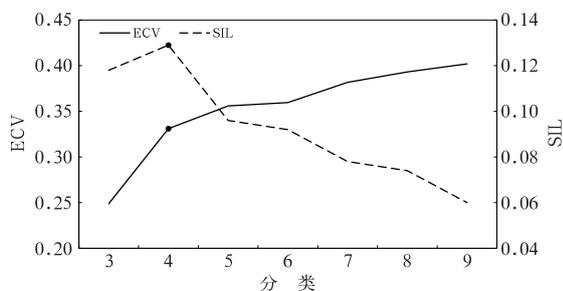


图 2 利用 PCT 分为 3~9 类的 ECV 和 SIL
Fig. 2 The ECV and SIL classified into 3 to 9 categories by the PCT

分布, 占总样本数的 20.4%, 夜间发生频次下降, 有明显的日变化特征, 该型影响下短时强降水频次不高。第 3 类为副高边缘南风型(图 5e, 5f), 偏南风向北推至川陕豫一带, 湘西北、鄂西、渝东山区存在风速辐合, 对应累计降水量较大区域, 局地达 3 mm 以上, 南风区仅有分散型降雨, 此类占总样本数的 25.5%, 主要出现在 6—9 月, 有明显的日变化特征, 夜间发生频次明显增加, 与第 2 类相反, 短时强降水

发生概率是 4 类环流型中最低的, 仅为 4.9%。第 4 类为台风外围东风型(图 5g, 5h), 湖南具有三面环山向北开口的马蹄状地形特点, 受台风外围偏东风气流影响, 在湘东存在累计降水量大值区, 此类占总样本数的 17.0%, 8—9 月出现次数较多, 40 次短时强降水样本也出现在 8—9 月, 发生概率为 5.3%, 日变化特征不明显。

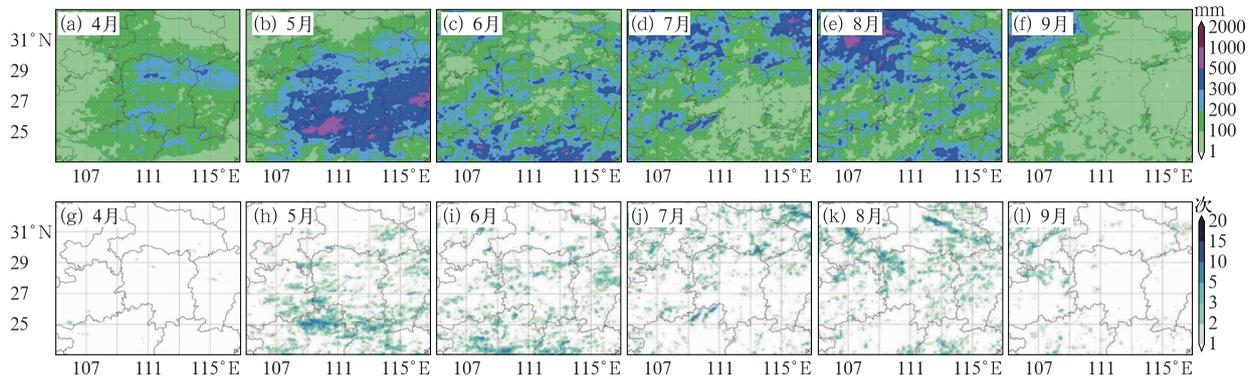


图 3 2021 年 4—9 月逐月(a~f)累计降水量和(g~l)短时强降水累计次数

Fig. 3 Monthly (a-f) accumulated rainfall and (g-l) accumulated frequency of short-time heavy rainfall from April to September in 2021

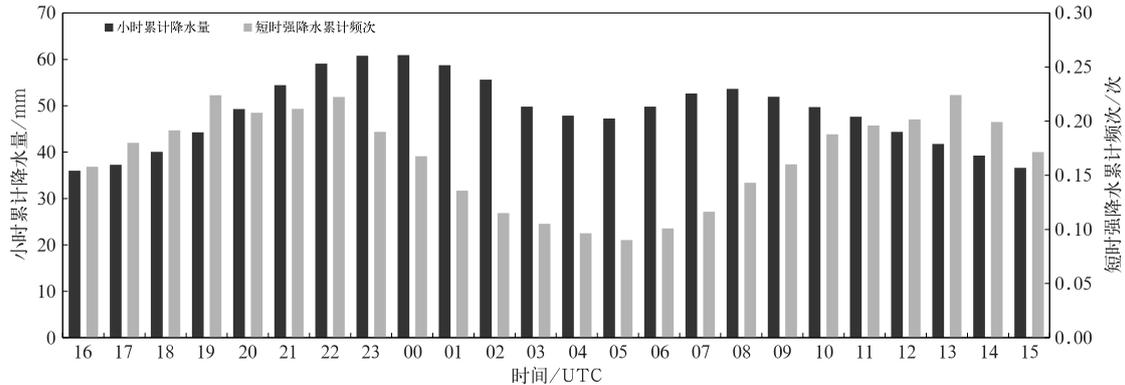


图 4 2021 年 4—9 月湖南空间平均的逐小时累计降水量和短时强降水累计频次

Fig. 4 Spatial averages of the hourly accumulated rainfall and the accumulated frequency of short-time heavy rainfall in Hunan from April to September in 2021

表 2 2021 年 4 类环流型逐月短时强降水发生次数/该类环流型总次数分布情况(单位:次)

Table 2 Monthly occurrence number of short-time heavy rainfall/monthly total number of every circulation type in 2021 (unit: number)

类别	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	总计
第 1 类(西南涡切变型)	7/411	177/412	156/401	60/95	120/297	1/15	521/1631
第 2 类(切变型)	0/161	36/251	10/86	18/160	6/42	24/195	94/895
第 3 类(副高边缘南风型)	0/5	5/44	9/181	32/382	3/182	6/324	55/1118
第 4 类(台风外围东风型)	0/143	0/37	0/52	0/107	29/223	11/186	40/748
总计	7/720	218/744	175/720	110/744	158/744	42/720	710/4392

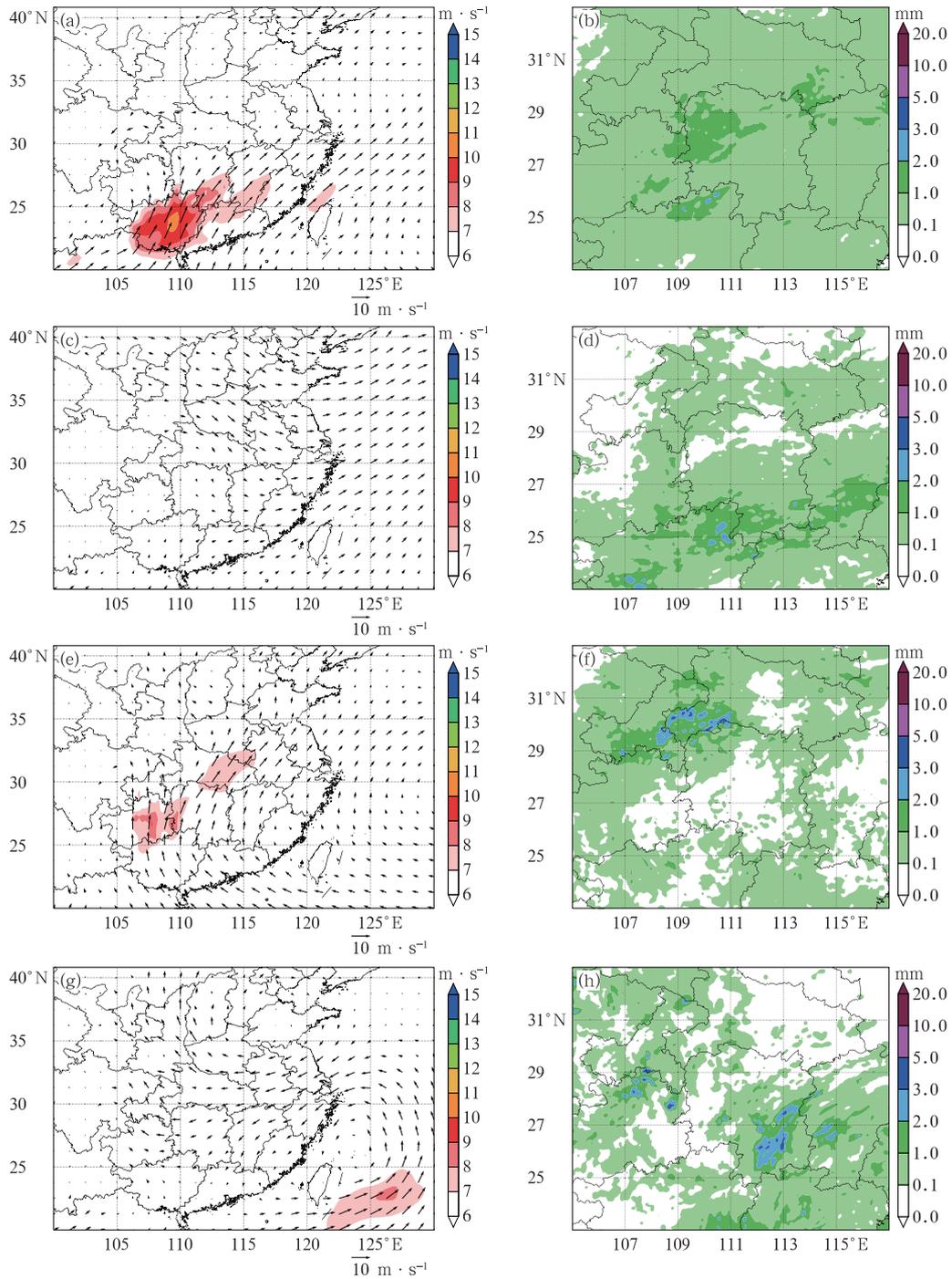


图 5 4 类环流型(a,c,e,g)850 hPa 合成风场(风矢和填色)和(b,d,f,h)该环流型下短时强降水发生时次平均累计降水量
(a,b)第 1 类,(c,d)第 2 类,(e,f)第 3 类,(g,h)第 4 类

Fig. 5 (a, c, e, g) The 850 hPa wind synthetic field (wind vector and colored) of the four circulation types and
(b, d, f, h) the average accumulated rainfall during the occurrence of
short-time heavy rainfall under this circulation type
(a, b) type 1, (c, d) type 2, (e, f) type 3, (g, h) type 4

3.2 模式降水预报检验

分析不同起报时次和预报时效的晴雨准确率和

分级降水预报效果(图 6),结果显示,CMA-GD-R3 的晴雨准确率较高,由图 6a 可见在 0.80~0.92,随起报时次呈前低后高变化,各起报时次的晴雨准确

率在前 2 个预报时效均表现出较好的预报效果,平均为 0.90,最高达 0.92,准确率预报效果的日变化特征明显,不同起报时次的夜间预报效果均明显好于白天,午间预报评分相对低,最低为 0.80。奇数时次起报的第 13 个预报时效预报评分均低于前个偶数时次起报,出现准确率下降现象。

降水级别越大,预报难度越大,CMA-GD-R3 的 TS 评分越低,1~5 mm 级别降水各起报时次在预报时效对应的 23 时至 02 时仍存在峰值(以 5 mm 为例,图 6b),TS 评分优于其他时次,对于 20 mm 级别以上降水预报(图略),00—12 时起报的降水预报效果略优于其他时次起报。CMA-GD-R3 在临近时效预报效果较好,各起报时次的前 2 个预报时效预报表现优于其他临近预报时效。奇数时次起报的第

13 个预报时效较前个偶数时次起报的预报存在评分下降的现象,偶数时次起报的第 1 个预报时效预报效果优于奇数时次起报的预报。

CMA-GD-R3 小时降水预报的晴雨准确率和分级降水 TS 评分的日变化特征,与实况降水的日变化有关,午后以热力型的突发、局地性降水为主,模式难以模拟准确,因此评分较低。早晨实况累计降水量较大,此时段评分较高,表明模式对急流加强阶段的降水有较好的预报性能。CMA-GD-R3 快速循环同化的特点,使其在临近预报时效表现较好。

3.3 不同环流型模式降水预报检验

分析不同环流型下的 CMA-GD-R3 晴雨准确率和 5 mm 级别降水 TS 评分(图 7),结果显示,短时

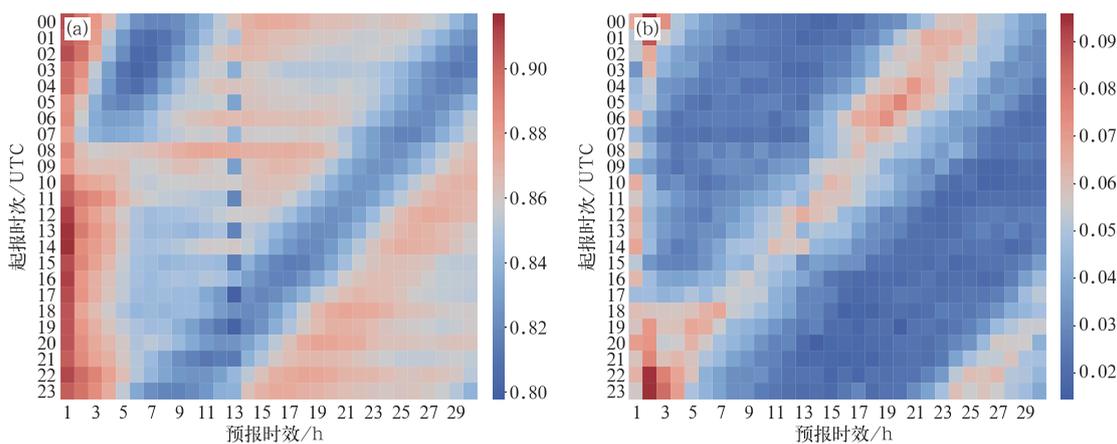


图 6 2021 年 4—9 月 CMA-GD-R3 各起报时次的各预报时效(a)晴雨准确率和(b)5 mm 级别降水 TS 评分
Fig. 6 (a) The clear-rainy accuracy rate and (b) TS score of the 5 mm precipitation with each leadtime initiated at each time by CMA-GD-R3 from April to September in 2021

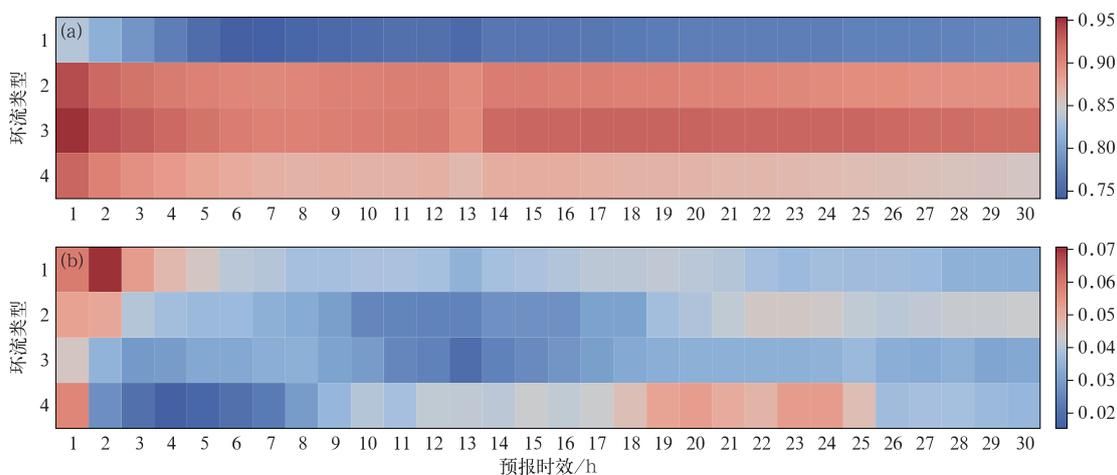


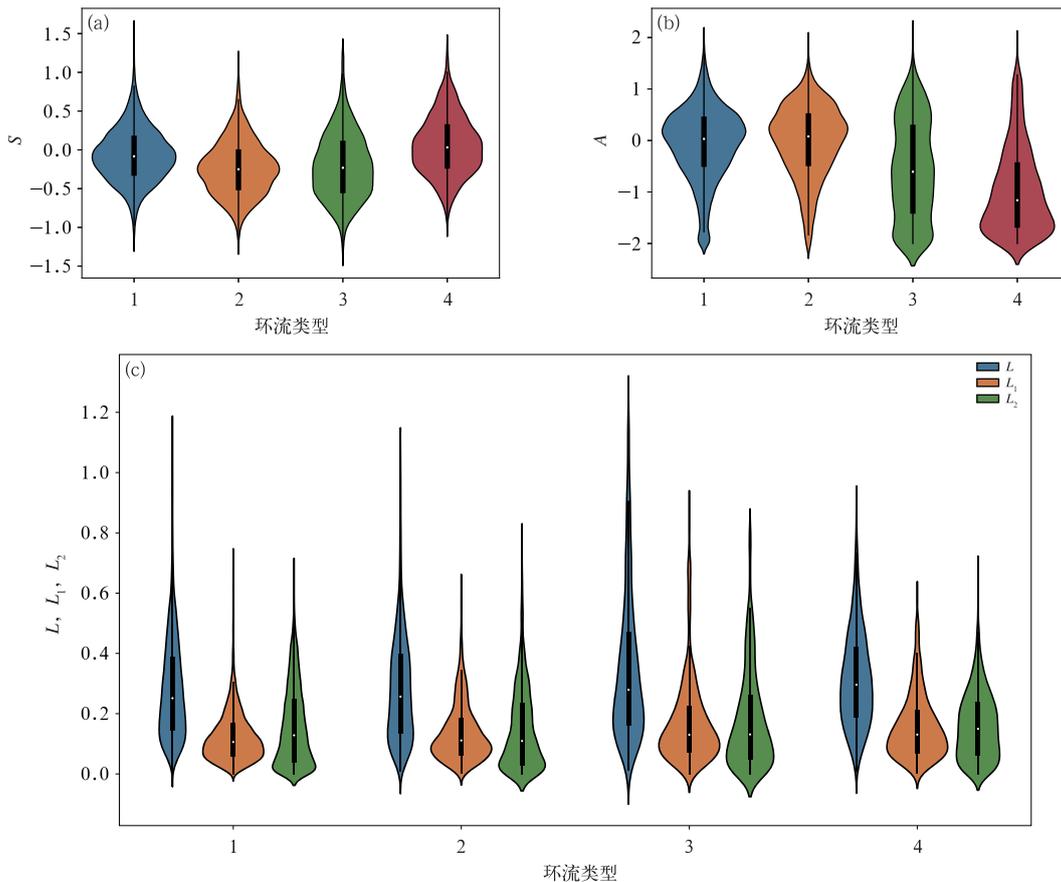
图 7 2021 年 4—9 月 4 类环流型下 CMA-GD-R3 各预报时效(a)晴雨准确率和(b)5 mm 级别降水 TS 评分
Fig. 7 (a) The clear-rainy accuracy rate and (b) TS score of the 5 mm precipitation with each leadtime by CMA-GD-R3 under four circulation types from April to September in 2021

强降水发生频次最高、降水落区最大的 1 类晴雨准确率最低(图 7a), 平均为 0.77, 第 3 类降水落区最小, 在各预报时效表现均相对最优, 平均达 0.92, 第 2、第 4 类分别平均为 0.91、0.88, 参与评估的样本数、环流型下的累计降水变化和降水落区是准确率存在差异的可能原因。第 1 类随预报时效延长准确率先降低后略升高, 第 2~4 类则表现为先降低后升高、再降低。每类的前 3 个预报时效晴雨准确率高与其他时效, 第 13 个预报时效评分最低。较大量级降水以 5 mm 评分为例(图 7b), 第 3 类在各预报时效表现均相对较差, 各类评分随预报时效延长均呈先降低后升高、再降低变化, 评分谷值对应时效有所差异, 每类的前 2 个预报时效评分高于其他时效, 前 3 类第 13 个预报时效评分最低。各类环流型下降水的日变化特征和模式在不同环流型下的降水模拟差异是造成各环流型评分出现差异的可能原因。同样,

CMA-GD-R3 快速循环同化的特点, 使其在各环流型的临近预报时效表现较好。

3.4 不同环流型 SAL 检验

对 4 类环流型下的短时强降水过程 CMA-GD-R3 小时降水量预报进行 SAL 检验, 如图 8 所示, 结构参数 S (图 8a), 第 1~3 类 S 中位数均小于 0, 第 1 类在 -0.1 处数据密度高, 说明此处样本更密集, 第 2、第 3 类 S 中位数更小, 第 2 类样本更集中于中位数附近, 第 3 类是数据密度分布峰值更平缓, 样本分布更离散, 大部样本仍小于 0, 模式预报范围偏小或中心强度预报偏大, 第 4 类 S 略大于 0, 核密度峰值在 $-0.2 \sim 0.3$, 大部样本预报均匀性与实况较为相似。强度参数 A (图 8b), 第 1、第 2 类特征类似, A 中位数略大于 0, 样本大部集中在 0.2 附近, 强度预报略大于实况, 第 3、第 4 类中位数明显小于 0, 第 3 类



注:小提琴图是核密度与箱线图的结合, 填色外曲线宽度代表数据密度, 箱体上、下边界分别代表 75%、25%分位数, 白色圆点代表中位数。

图 8 4 类环流型下短时强降水过程的 CMA-GD-R3 小时降水量预报 SAL 检验参数分布
(a) S , (b) A , (c) L, L_1, L_2

Fig. 8 Distribution of the SAL test parameters of hourly rainfall of short-time heavy rainfall under four circulation types by CMA-GD-R3
(a) S , (b) A , (c) L, L_1, L_2

75%分位数接近于 0,数据密度分布较为均匀,离散程度最高,大部样本小于 0,强度预报不确定性大,此类环流型下预报整体偏弱,第 4 类偏弱更为明显,中位数小于-1,数据密度峰值在-1.8,大部分样本强度预报明显偏弱。位置参数 L 、 L_1 、 L_2 (图 8c),各类环流型下 L 中位数在 0.3 以内,第 1~3 类数据密度峰值在 0.1~0.2,第 3 类异常大值更多,位置预报偏差更大,第 4 类 L 值也偏大,其中,第 1、第 2 类 L_1 、 L_2 中位数相当, L_1 的数据密度峰值更大, L_2 更离散,降水主体位置预报稳定,第 2 类个体重心与主体重心的位置偏差有更大的不确定性,第 3 类 L_1 、 L_2 对 L 贡献相当,降水主体位置和个体与主体重心的相对位置均存在偏差,第 4 类 L_2 中位数更大,数据分布平缓,峰值不明显,离散程度大,即降水个体位置预报不确定性较大。各环流型下的实况降水特征

差异大,模式对各类降水的结构、强度和位置模拟能力存在差异。

分析 4 类环流型的短时强降水过程各预报时效 SAL 检验参数分布,结果显示:

从结构参数分布来看(图 9a),第 1 类在第 1 个预报时效 $S > 0$,预报范围偏大或中心强度偏小,其他时效 $S < 0$,预报范围均偏小或中心强度偏大,前 12 个时效更为明显,第 2、第 3 类与第 1 类变化趋势基本一致, $S < 0$ 幅度更大,预报范围更小或中心强度更大,第 4 类则表现为基本前 12 个时效 $S < 0$,后 18 个时效 $S > 0$,随预报时效延长 S 绝对值越大,预报范围越大或强度预报越小。

从强度参数分布来看(图 9b),各类第 1 个预报时效 $A < 0$,强度偏弱,第 1、第 2 类第 1~12 个时效 $A > 0$,预报强度偏强,第 13~30 个时效强度偏弱,强

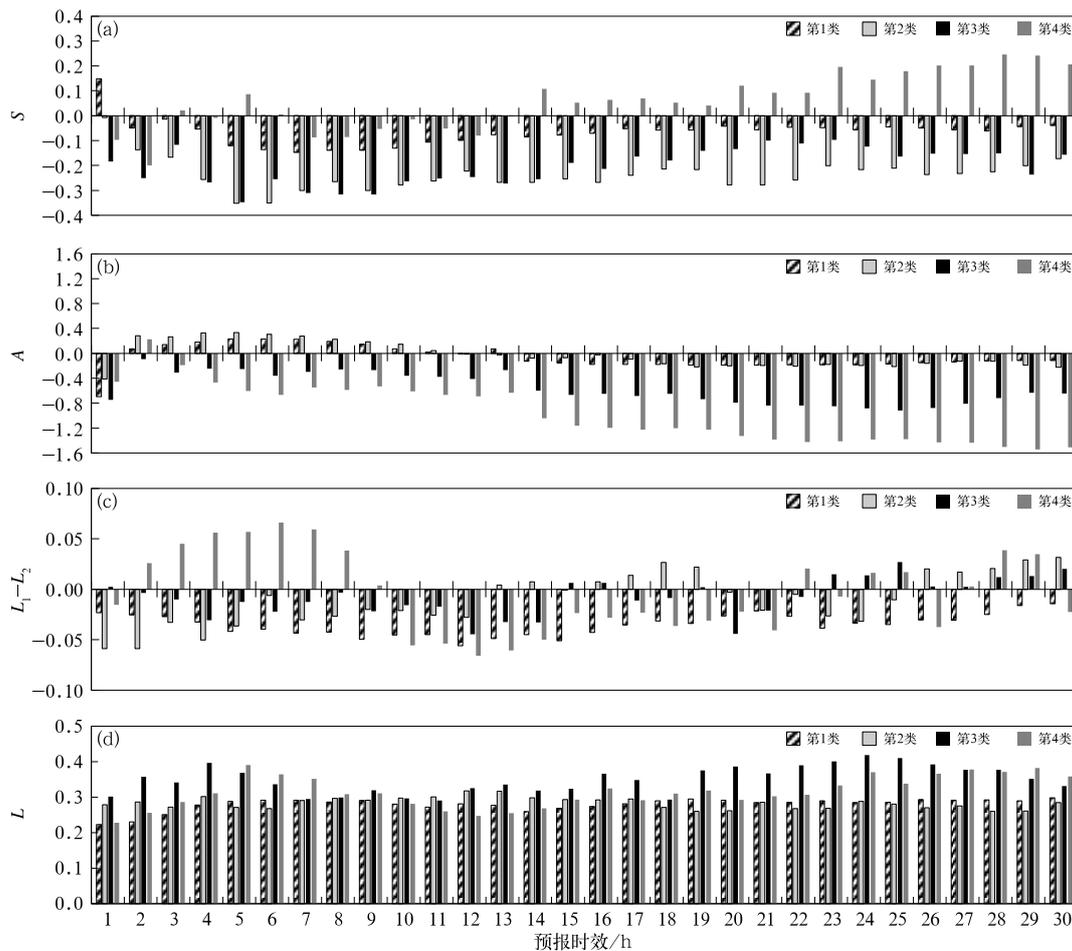


图 9 4 类环流型下短时强降水过程的 CMA-GD-R3 各预报时效 SAL 检验参数分布
(a) S , (b) A , (c) $L_1 - L_2$, (d) L

Fig. 9 Distribution of the SAL test parameters of short-time heavy rainfall with each leadtime under four circulation types by CMA-GD-R3
(a) S , (b) A , (c) $L_1 - L_2$, (d) L

度偏差幅度不大,第 3、第 4 类整体呈强度偏弱态势,随预报时效延长偏差幅度增大,第 4 类强度偏差最大。

从位置参数分布来看(图 9c,9d),各类第 1 个预报时效 L 值均较小,第 1、第 2 类位置偏差相对较小,第 1 类各预报时效 L_2 贡献均相对大,降水个体的离散程度带来更多位置偏差,第 2 类则表现为前个体离散度相对大、后主体落区偏差相对大,第 3 类各预报时效降水落区偏差最大,以个体离散偏差为主,第 4 类落区偏差也较大,短时预报时效 L_1 贡献大于 L_2 ,降水主体落区偏差更明显。

综合分析,第 1、第 2 类过程模式临近预报范围偏大或中心强度偏小,其他时效范围偏小或中心强度偏大,第 2 类偏差幅度更大,强度预报均呈前弱后强,第 1 类降水个体的位置离散度对降水落区偏差影响更大;第 3 类过程较第 1、第 2 类预报范围明显偏小或中心强度明显偏大,整体强度较实况明显偏弱,降水主体、个体与主体重心与实况存在明显偏差,位置预报不稳定;第 4 类过程在短时预报时效范

围接近实况,强度预报显著偏弱,主体重心位置偏差较大。造成各类预报偏差的主要原因是模式对各环流型下降水的模拟能力不同。CMA-GD-R3 的启动方式和需在初始阶段进行自身调整(张兰等,2019; Chen et al,2021),可能是造成各类第 1 个与第 2 个预报时效强度预报发生明显变化的原因。

4 个例检验

挑选 2021 年 5 月 15 日一次受高空槽引导西南涡东移、配合西南急流引起的强降水过程,评估 CMA-GD-R3 小时降水预报能力和 SAL 检验的适用性。此过程为第 1 类西南涡切变型,降水在 15 日午后自西向东开始发展,18 时起,短时强降水出现在湘西北地区,15 日 20 时至 16 日 05 时为最强阶段,16 日 06 时之后雨带持续南压,降水减弱,11 时趋于结束,检验时段为 15 日 18 时至 16 日 11 时。分析此次过程 CMA-GD-R3 的晴雨准确率和分级降水 TS 评分(图 10),结果显示,晴雨准确率平均达

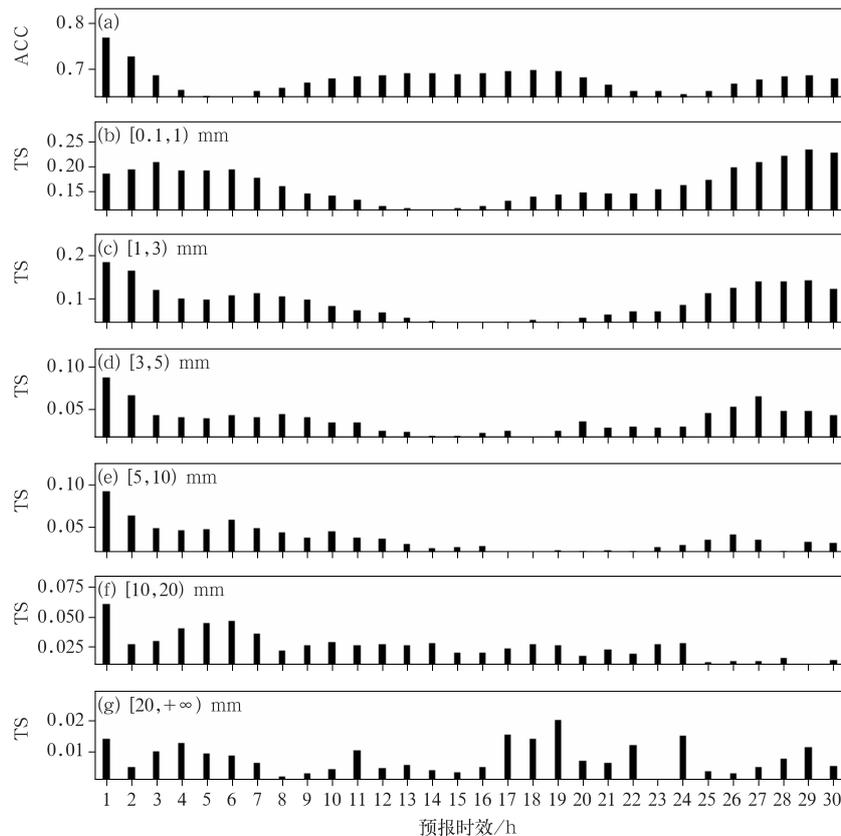


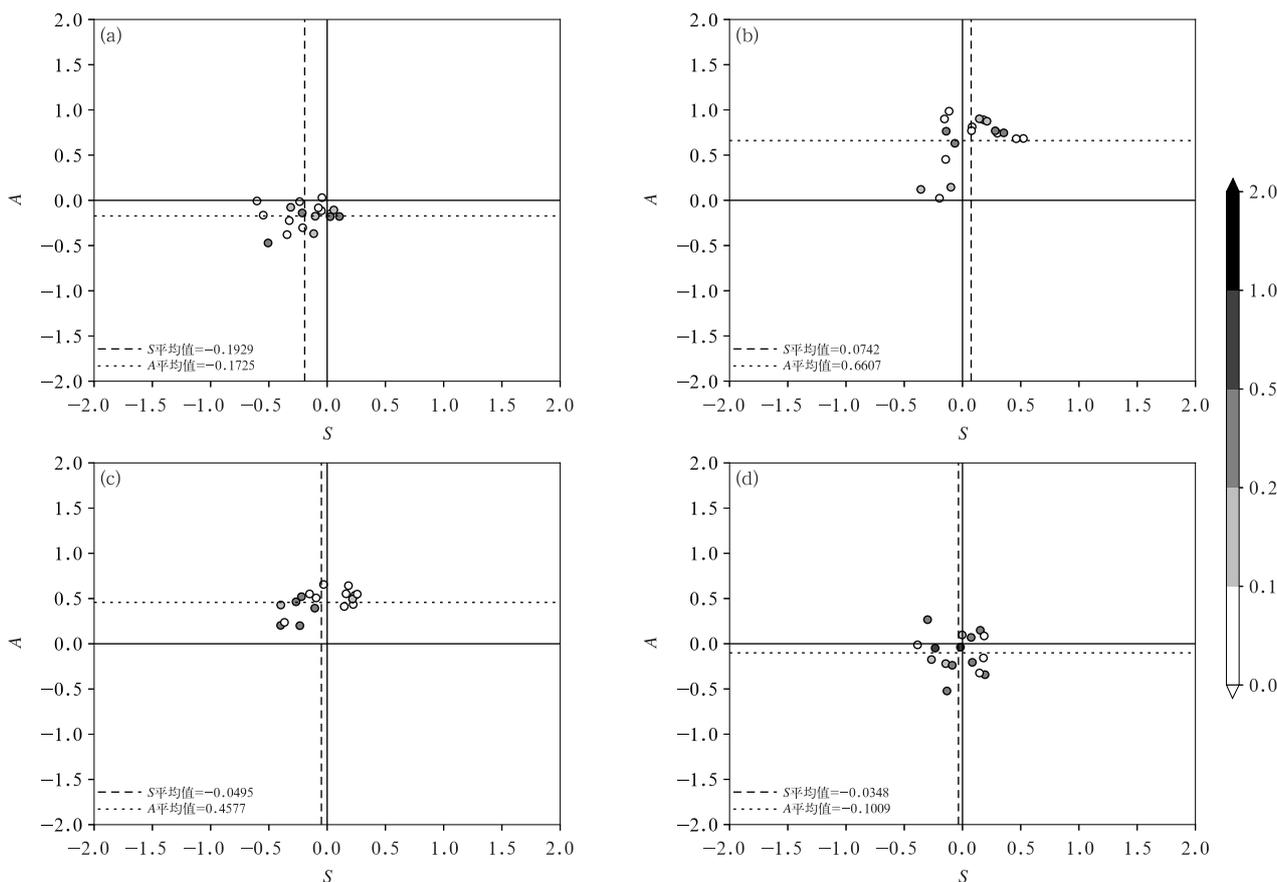
图 10 2021 年 5 月 15 日 CMA-GD-R3 各预报时效的 (a) 晴雨准确率和 (b~g) 分级降水 TS 评分

Fig. 10 (a) Clear-rainy accuracy rate and (b~g) TS scores of the graded precipitation with each leadtime by CMA-GD-R3 on 15 May 2021

0.68(图 10a),随预报时效呈三峰型分布,第 1 个时效最高,达 0.78,各级降水预报第 1 个时效预报效果均较好(图 10b~10g),随级别增长评分下降,模式对此次过程各级降水均有一定的预报能力,5 mm 及以下级别降水 TS 评分随时效呈中间低、两边高分布(图 10b~10d),10 mm 以上级别降水评分峰值变化与短时强降水发生频次变化有关(图 10f, 10g)。

以第 1、第 3、第 6、第 12 个预报时效 SAL 评分作为分析对象,评估此次过程模式降水预报在空间结构、强度、位置的偏差,由图 11 可见,第 1 个预报时效样本(图 11a)强度预报与实况一致或偏弱,A 平均为-0.17,结构预报与实况一致或为负值,S 平均为-0.19,预报范围偏小或中心强度偏大,即以小

范围对流性降水为主,位置预报与实况较一致,L 平均为 0.2;随着预报时效的延长,第 3、第 6 个时效(图 11b,11c)强度预报明显偏强,A 平均分别达到 0.66、0.45,结构预报较离散,不稳定加大,位置预报效果稳定;第 12 个时效(图 11d)强度预报偏差再次降低,样本集中在 0 附近或小于 0,A 平均为-0.10,离散度不大,有一定的可参考性,结构预报偏差分布于 0 两侧,较离散,位置预报偏差明显增大,各样本间差异加大,模式不稳定性增强。综上所述,此次过程 CMA-GD-R3 预报降水强度、结构、位置预报可信度较高,强度预报偏差前弱后强、再偏弱,位置预报与实况接近,时效延长偏差增大,临近时效结构预报与实况接近或小范围短时强降水为主,时效延长不稳定性增大。



注:阴影为位置参数 L。

图 11 2021 年 5 月 15 日短时强降水过程 CMA-GD-R3(a)第 1、(b)第 3、(c)第 6、(d)第 12 个预报时效的 SAL 检验参数散点分布

Fig. 11 The SAL test parameters scatter point distribution of the (a) 1st, (b) 3rd, (c) 6th, and (d) 12th forecast leadtimes by CMA-GD-R3 of the cases of short-time heavy rainfall on 15 May 2021

5 结论和讨论

本文利用 PCT 对湖南地区 2021 年汛期(4—9 月)850 hPa 风场进行环流分型,采用晴雨准确率、分级降水 TS 和 SAL 评分,对 2021 年 4—9 月 CMA-GD-R3 每日 24 h 逐 1 h 降水预报开展检验,得到以下结论:

(1)2021 年湖南汛期降水南北多、中间少,4 月降水过程多、短时强降水发生少,其他月份累计降水量大的区域短时强降水发生频次较高,累计降水量和短时强降水出现频次日变化特征明显,均呈双峰型分布,峰值出现的时间受热力和动力作用共同影响。

(2)湖南汛期天气主要受西南涡切变型、切变型、副高边缘南风型、台风外围东风型影响,其中西南涡切变型占比最高,短时强降水发生概率最大,夜间发生频次高于白天,切变型和副高边缘南风型日变化特征明显,夜间发生频次前者下降、后者增加,后者短时强降水发生频次最低。

(3)CMA-GD-R3 晴雨准确率较高,白天低于夜间,其中西南涡切变型最低,副高边缘南风型最高,分级降水 TS 评分随级别增大而降低,夜间相对较高,副高边缘南风型降水预报效果相对较差。CMA-GD-R3 在每类环流型临近时效降水预报效果较好,前 2 个时效降水评分较优。奇数起报时次的第 13 个时效较偶数时次出现准确率下降现象。

(4)SAL 方法能较客观地反映模式小时降水预报结构、强度、位置偏差,西南涡切变型、切变型过程模式临近预报范围偏大或中心强度偏小,其他时效范围偏小或中心强度偏大,强度预报表现为前弱后强;副高边缘南风型过程预报范围明显偏小,整体强度较实况明显偏弱,预报落区分散,位置预报不稳定;台风外围东风型过程在短时预报时效范围接近实况,强度预报偏差显著偏弱,降水中心位置偏差较大。

本文对湖南 2021 年汛期小时 850 hPa 风场进行了分型,在此基础上利用 SAL 方法评估了 CMA-GD-R3 小时降水预报效果,其反映的结构、强度、位置偏差对预报员有很好的参考意义。但是,本文仅对湖南地区开展评估,结论不一定适用于其他地区,并且未开展长时间序列的环流分型研究和多模式小

时降水预报评估,需进一步展开相关研究拓展环流分型和检验方法的适用性。

参考文献

- 蔡金圻,谭桂容,牛若芸,2021. 基于迁移 CNN 的江淮持续性强降水环流分型[J]. 应用气象学报,32(2):233-244. Cai J Q, Tan G R, Niu R Y, 2021. Circulation pattern classification of persistent heavy rainfall in Jianghuai Region based on the transfer learning CNN model[J]. J Appl Meteor Sci, 32(2):233-244(in Chinese).
- 陈昊明,李善曦,赵妍,2021. 千米尺度模式降水的检验评估进展及展望[J]. 气象科技进展,11(3):155-164. Chen H M, Li P X, Zhao Y, 2021. A review and outlook of verification and evaluation of precipitation forecast at convection-permitting resolution[J]. Adv Meteor Sci Technol, 11(3):155-164(in Chinese).
- 陈红专,2021. 湖南极端降水的气候特征及天气系统分型研究[J]. 气象,47(10):1219-1232. Chen H Z, 2021. Climatic characteristics and weather system classification of extreme precipitation in Hunan Province[J]. Meteor Mon, 47(10):1219-1232(in Chinese).
- 陈静静,叶成志,吴贤云,2016. 湖南汛期暴雨天气过程环流客观分型技术研究[J]. 暴雨灾害,35(2):119-125. Chen J J, Ye C Z, Wu X Y, 2016. Objectively classified patterns of atmospheric circulation for rainstorm events in flood season in Hunan[J]. Torr Rain Dis, 35(2):119-125(in Chinese).
- 戴泽军,蔡荣辉,彭莉莉,等,2019. 湖南持续性区域暴雨气候特征及暴雨落区分型[J]. 高原气象,38(3):573-582. Dai Z J, Cai R H, Peng L L, et al, 2019. Climatic characteristics of regional persistent heavy rain and heavy rainfall pattern over Hunan[J]. Plateau Meteor, 38(3):573-582(in Chinese).
- 戴泽军,刘志雄,李易芝,等,2015. 近 54a 湖南区域暴雨的时空分布特征[J]. 暴雨灾害,34(1):41-46. Dai Z J, Liu Z X, Li Y Z, et al, 2015. Climatic characteristics of regional heavy rain over Hunan during the last 54 years[J]. Torr Rain Dis, 34(1):41-46(in Chinese).
- 公颖,2010. SAL 定量降水预报检验方法的解释与应用[J]. 暴雨灾害,29(2):153-159. Gong Y, 2010. The explanation and application of SAL quantitative verification for precipitation forecasts[J]. Torr Rain Dis, 29(2):153-159(in Chinese).
- 黎慧琦,崔晓鹏,李琴,等,2019. SANDRA 法对北京小时强降水扰动环流场的分型研究[J]. 气候与环境研究,24(4):445-454. Li H Q, Cui X P, Li Q, et al, 2019. Anomaly-based classification study of synoptic patterns associated with hourly heavy rainfall over Beijing by SANDRA method[J]. Climatic Environ Res, 24(4):445-454(in Chinese).
- 刘凌华,牛若芸,2013. 基于目标的降水检验方法及应用[J]. 气象,39(6):681-690. Liu C H, Niu R Y, 2013. Object-based precipitation verification method and its application[J]. Meteor Mon, 39(6):681-690(in Chinese).

- 罗未萌,钱维宏,蒋宁,等,2018. SOM方法在中国东部夏季降水分型中的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版),54(5):970-982. Luo W M, Qian W H, Jiang N, et al, 2018. Application of SOM method in summer precipitation patterns in eastern China[J]. Acta Sci Nat Univ Pekinensis, 54(5):970-982(in Chinese).
- 毛紫怡,刘金卿,2021. 湖南省西南涡暴雨的分类研究[J]. 暴雨灾害, 40(1):52-60. Mao Z Y, Liu J Q, 2021. Classification of rainstorms in Hunan Province affected by the Southwest China vortex[J]. Torr Rain Dis, 40(1):52-60(in Chinese).
- 闵晶晶,邓长菊,曹晓钟,等,2015. 强对流天气形势聚类分析中SOM方法应用[J]. 气象科技, 43(2):244-249. Min J J, Deng C J, Cao X Z, et al, 2015. Synoptic circulation pattern clustering analysis of severe convective weather based on self-organizing maps (SOM)[J]. Meteor Sci Technol, 43(2):244-249(in Chinese).
- 潘留杰,薛春芳,张宏芳,等,2017. 三种高分辨率格点降水预报检验方法的对比[J]. 气候与环境研究, 22(1):45-58. Pan L J, Xue C F, Zhang H F, et al, 2017. Comparison of three verification methods for high-resolution grid precipitation forecast[J]. Climatic Environ Res, 22(1):45-58(in Chinese).
- 潘畅,谷军霞,宇婧婧,等,2018. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J]. 气象学报, 76(5):755-766. Pan Y, Gu J X, Yu J J, et al, 2018. Test of merging methods for multi-source observed precipitation products at high resolution over China[J]. Acta Meteor Sin, 76(5):755-766(in Chinese).
- 钱维宏,蒋宁,杜钧,2016. 中国东部7类暴雨异常环流型[J]. 气象, 42(6):674-685. Qian W H, Jiang N, Du J, 2016. Seven anomalous synoptic patterns of regional heavy rain in eastern China[J]. Meteor Mon, 42(6):674-685(in Chinese).
- 曲巧娜,盛春岩,范苏丹,等,2019. 基于目标对象检验法的多种模式强降水能力的比较[J]. 气象, 45(7):908-919. Qu Q N, Sheng C Y, Fan S D, et al, 2019. Comparison of the multi-model forecasts for severe precipitation based on the object verification[J]. Meteor Mon, 45(7):908-919(in Chinese).
- 盛春岩,曲巧娜,范苏丹,等,2021. 基于目标对象的数值模式区域降水预报选优方法[J]. 气象, 47(10):1206-1218. Sheng C Y, Qu Q N, Fan S D, et al, 2021. Object-oriented selection method of numerical model regional precipitation forecast[J]. Meteor Mon, 47(10):1206-1218(in Chinese).
- 师春香,潘畅,谷军霞,等,2019. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J]. 气象学报, 77(4):774-783. Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al, 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products[J]. Acta Meteor Sin, 77(4):774-783(in Chinese).
- 苏翔,刘梅,康志明,等,2022. 2020年江苏主汛期短期暴雨预报检验[J]. 气象, 48(3):357-371. Su X, Liu M, Kang Z M, et al, 2022. Verification of short-range torrential rain forecast during the 2020 Jiangsu main flood season[J]. Meteor Mon, 48(3):357-371(in Chinese).
- 王彬雁,陈朝平,黄楚惠,2020. SAL方法在四川降水预报检验中的应用[J]. 干旱气象, 38(3):472-479. Wang B Y, Chen C P, Huang C H, 2020. Application of SAL method to verification of precipitation forecasts in Sichuan Province[J]. J Arid Meteor, 38(3):472-479(in Chinese).
- 王婧卓,陈法敬,陈静,等,2021. GRAPES区域集合预报对2019年中国汛期降水预报评估[J]. 大气科学, 45(3):664-682. Wang J Z, Chen F J, Chen J, et al, 2021. Verification of GRAPES-REPS model precipitation forecasts over China during 2019 flood season[J]. Chin J Atmos Sci, 45(3):664-682(in Chinese).
- 吴胜男,江志红,2019. 基于自组织映射的长江中下游夏季天气分型及其降水特征[J]. 气象科学, 39(5):588-598. Wu S N, Jiang Z H, 2019. Synoptic classification and precipitation characteristics in summer over the Yangtze River Basin based on self-organizing map[J]. J Meteor Sci, 39(5):588-598(in Chinese).
- 谢漪云,王建捷,2021. GRAPES千米尺度模式在西南复杂地形区降水预报偏差与成因初探[J]. 气象学报, 79(5):732-749. Xie Y Y, Wang J J, 2021. Preliminary study on the deviation and cause of precipitation prediction of GRAPES kilometer scale model in southwest complex terrain area[J]. Acta Meteor Sin, 79(5):732-749(in Chinese).
- 许爱华,孙继松,许东蓓,等,2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 40(4):400-411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteor Mon, 40(4):400-411(in Chinese).
- 徐同,张蕾,李佳,等,2020. MODE-TD检验方法在上海快速更新同化业务预报系统中的初步应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 14(5):1-10. Xu T, Zhang L, Li J, et al, 2020. Preliminary application of object-based time-domain verification method to Shanghai rapid updated cycling analysis and forecast system[J]. Desert Oasis Meteor, 14(5):1-10(in Chinese).
- 薛春芳,潘留杰,2016. 基于MODE方法的日本细网格模式降水预报的诊断分析[J]. 高原气象, 35(2):406-418. Xue C F, Pan L J, 2016. Diagnostic analysis of precipitation forecasting from Japan thin-grid model based on MODE[J]. Plateau Meteor, 35(2):406-418(in Chinese).
- 宇如聪,李建,陈昊明,等,2014. 中国大陆降水日变化研究进展[J]. 气象学报, 72(5):948-968. Yu R C, Li J, Chen H M, et al, 2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China[J]. Acta Meteor Sin, 72(5):948-968(in Chinese).
- 张兰,徐道生,胡东明,等,2019. 雷达反演资料的Nudging同化对华南暴雨过程短临预报的影响[J]. 高原气象, 38(6):1208-1220. Zhang L, Xu D S, Hu D M, et al, 2019. Nudging radar data impact on southern China rainstorm short-term forecast[J]. Plateau Meteor, 38(6):1208-1220(in Chinese).
- Bao X H, Zhang F Q, Sun J H, 2011. Diurnal variations of warm-season precipitation east of the Tibetan Plateau over China[J]. Mon Wea Rev, 139(9):2790-2810.
- Bullock R, 2011. Development and implementation of MODE Time

- Domain Object-based verification [C] // 24th Conference on Weather and Forecasting/20th Conference on Numerical Weather Prediction. Seattle: Amer Meteor Soc.
- Casati B, Wilson L J, Stephenson D B, et al, 2008. Forecast verification: current status and future directions[J]. Meteor Appl, 15(1):3-18.
- Chen H M, Yu R C, Li J, et al, 2010. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River Valley[J]. J Climate, 23(4):905-917.
- Chen Z T, Dai G F, Wu K X, et al, 2021. Development of 1 km-scale operational model in South China[J]. J Trop Meteor, 27(4):319-329.
- Dai A G, 2001. Global precipitation and thunderstorm frequencies. Part II: diurnal variations[J]. J Climate, 14(6):1112-1128.
- Davis C, Brown B, Bullock R, 2006a. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: methodology and application to mesoscale rain areas[J]. Mon Wea Rev, 134(7):1772-1784.
- Davis C, Brown B, Bullock R, 2006b. Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: application to convective rain systems[J]. Mon Wea Rev, 134(7):1785-1795.
- Dong Y M, Li J, Guo J P, et al, 2020. The impact of synoptic patterns on summertime ozone pollution in the North China Plain[J]. Sci Total Environ, 735:139559.
- Huth R, 1996. An intercomparison of computer-assisted circulation classification methods[J]. Int J Climatol, 16(8):893-922.
- Philipp A, Beck C, Huth R, et al, 2016. Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software[J]. Int J Climatol, 36(7):2673-2691.
- Schaefer J T, 1990. The critical success index as an indicator of warning skill[J]. Wea Forecasting, 5(4):570-575.
- Wernli H, Paulat M, Hagen M, et al, 2008. SAL-a novel quality measure for the verification of quantitative precipitation forecasts[J]. Mon Wea Rev, 136(11):4470-4487.

(本文责编:王蕾 何晓欢)