



多模式降水预报产品对昆仑山北坡夏季暴雨预报性能检验对比

杨柳 杨霞 潘宁 冶晓婷

Comparison of forecast performance of summer rainstorms over the northern slopes of the Kunlun Mountains based on multi-model precipitation forecast products

YANG Liu, YANG Xia, PAN Ning, YE Xiaoting

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-029>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

中昆仑山北坡水汽含量的计算及其特征分析

Calculation and characteristic analysis of water vapor content in the north slope of the Middle Kunlun Mountains

暴雨灾害. 2024, 43(2): 224–233 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-053>

YHGS模式产品在华中一次暴雨预报应用的评估

Application evaluation of the YHGS model products in a rainstorm forecast in central China

暴雨灾害. 2020, 39(5): 462–469 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.004>

2018年三个华东登陆台风暴雨数值预报结果的空间检验

Spatial verification of multi-model forecast of three landing typhoons induced rainstorm in East China in 2018

暴雨灾害. 2022, 41(4): 365–374 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.001>

2020年梅雨特征分析及模式中期预报性能检验

Analysis of Meiyu characteristics and performance verification of the medium-range forecasting models in 2020

暴雨灾害. 2020, 39(6): 629–636 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.011>

基于多量级TS评分动态权重的多模式融合降水预报算法研究及应用

Research and application on multi-model blending precipitation forecast based on the dynamic weight of multi-level TS score

暴雨灾害. 2025, 44(3): 371–379 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-072>

ECMWF模式对2020年夏季江淮流域降水的预报偏差分析

Analysis of the deviation of precipitation forecast of ECMWF model over the Yangtze-Huaihe River Valley in summer 2020

暴雨灾害. 2022, 41(3): 315–323 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.008>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨柳,杨霞,潘宁,等.2026.多模式降水预报产品对昆仑山北坡夏季暴雨预报性能检验对比[J].暴雨灾害,45(3):373–383. YANG Liu, YANG Xia, PAN Ning, et al. 2026. Comparison of forecast performance of summer rainstorms over the northern slopes of the Kunlun Mountains based on multi-model precipitation forecast products [J]. *Torrential Rain and Disasters*,45(3):373–383 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–029

多模式降水预报产品对昆仑山北坡夏季暴雨 预报性能检验对比

杨柳¹, 杨霞², 潘宁², 冶晓婷¹

(1. 新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州气象局, 库尔勒 841000; 2. 新疆维吾尔自治区气象台, 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 昆仑山北坡夏季暴雨突发性强、预报预警难度大, 模式降水预报产品对该区域暴雨的预报性能尚不明确。利用降水观测资料和多源融合降水产品, 结合传统点对点检验与 MODE 检验方法, 对 ECMWF、CMA-GFS 和 CMA-MESO 三种模式的降水产品的预报性能进行检验和对比, 选取 2021—2022 年夏季昆仑山北坡三次暴雨过程, 分析模式预报的降水强度和落区空间分布 (位置、姿态和面积) 与实况的差异。结果表明: (1) 三种模式普遍高估小雨和中雨, 低估大雨和暴雨; 其中, ECMWF 对中雨和大雨的预报能力较强, CMA-MESO 对暴雨预报能力更优, CMA-GFS 对暴雨的预报能力低于其他两种模式。 (2) 在暴雨过程的强 (弱) 降水时段, 三种模式的漏 (空) 报率较高; 三种模式对暴雨强度的低估, 主要是因为对降水量的低估和对降水频次的高估。 (3) ECMWF 模式在 24 h 和 3 h 累计降水目标与实况的匹配数量上优于 CMA-GFS 和 CMA-MESO 模式, ECMWF 模式 24 h 累计降水目标较实况位置以偏南和偏东为主, CMA-GFS 和 CMA-MESO 模式以偏南和偏西为主; 三种模式对降水目标姿态的预报能力均较强, 对降水面积的预报普遍偏小。

关键词: 模式降水; 暴雨; 预报性能; 昆仑山北坡; MODE 检验

中图法分类号: P457.6

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–029

Comparison of forecast performance of summer rainstorms over the northern slopes of the Kunlun Mountains based on multi-model precipitation forecast products

YANG Liu¹, YANG Xia², PAN Ning², YE Xiaoting¹

(1. *Xinjiang Bayingol Meteorological Bureau, Korla 841000*; 2. *Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002*)

Abstract: Summer rainstorms on the northern slope of the Kunlun Mountains is highly sudden. This makes forecasting and early warning very difficult. The performance of model precipitation forecast products in predicting rainstorm in this region remains unclear. Based on precipitation observation data and multi-source merged precipitation products, this study combines traditional point-to-point verification with the MODE method to evaluate and compare the forecast performance of ECMWF, CMA-GFS, and CMA-MESO models for three rainstorm events on the northern slope of the Kunlun Mountains during summer in 2021–2022. It reveals the differences between the precipitation intensity and spatial distribution of rainfall areas (location, orientation and area) predicted by the models and the observations. The results are as follows. (1) All three models tend to overestimate light and moderate rainfall but underestimate heavy rain and rainstorms. The ECMWF model performs better in capturing moderate and heavy rain, while CMA-MESO shows superior skill in rainstorm forecasting, outperforming CMA-GFS. (2) During intense and weak rainfall phases of rainstorm events, all three models show higher false alarm and miss rates. This underestimation of torrential rain intensity primarily arises from the systematic underestimation of precipitation amounts coupled with overestimation of precipitation frequency. (3) ECMWF outperforms CMA models in matching 24-hour and 3-hour accumulated precipitation objects with observations. ECMWF's 24-hour precipitation objects show a southward and eastward displacement, while CMA models exhibit a southward and westward bias. All models effectively capture the morphology of precipitation objects but consistently underestimate their coverage area.

Key words: model precipitation; rainstorm; forecast performance; northern slope of Kunlun Mountains; MODE verification

收稿日期: 2025–02–19; 定稿日期: 2026–06–29

资助项目: 新疆“天山英才”培养计划项目 (2023TSYCCX0077, 2024TSYCJC0046, 2023TSYCJC0064); 新疆气象局引导性计划项目 (YD2024018); 新疆自然科学基金项目 (2023D01F29)

第一作者: 杨柳, 主要从事数值预报检验及评估研究。E-mail: evans0831@sina.com

通信作者: 杨霞, 主要从事灾害性天气预报机理及预报技术研究。E-mail: yangxia921@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

引 言

新疆昆仑山北坡属典型的内陆干旱气候, 具有独特的降水特征(张俊兰等, 2023; 杨霞和杨柳, 2025)。近年来受全球气候变暖影响, 该区域极端暴雨事件的发生频率和强度显著增加, 引发山洪、泥石流及山体滑坡等次生灾害的风险剧增, 严重威胁人民的生命和财产安全(毛炜峰等, 2007)。昆仑山北坡夏季暴雨的形成条件比季风区更加苛刻, 需要大尺度环流背景和多尺度天气系统紧密配合(杨霞和杨柳, 2025), 具有突发性、局地性和极端性的特征, 这极大地增加了预报难度, 如何提升该区域暴雨预报精确度已成为亟需解决的问题。随着数值预报技术的快速发展, 数值模式已成为现代气象预报工作的核心技术支撑。其中, 由欧洲中期天气预报中心开发的全球天气预报模式(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)、中国气象局自主研发的全球数值预报模式(CMA Global Forecast System, CMA-GFS)和区域数值预报模式(CMA Mesoscale Model, CMA-MESO)是新疆天气预报业务的主要依据。然而, 受到初始场误差、物理过程参数化不确定性及网格分辨率限制等多重因素的影响, 数值模式难以彻底消除预报误差, 不同数值模式间也存在明显的时空性差异, 因而系统性开展数值模式的预报性能检验是改进和释用预报产品的关键步骤(陈昊明等, 2021)。

国内科技工作者针对多种模式降水产品的暴雨预报性能开展了大量的检验工作。苏翔等(2022)对江苏省 2020 年主汛期(6—9 月)模式降水产品的检验发现, 在短时强降水预报中, 无论全球模式还是区域模式, 并非分辨率越高预报性能越好; 区域模式的暴雨预报大多降水落区面积偏大, 空报率较高; 全球模式除 ECMWF 外, 对暴雨降水落区的预报大多面积偏小、漏报率较高。ECMWF 对四川盆地强降水过程中的中雨和大雨预报更优, 各模式对中雨的预报范围普遍较实况偏大, 随着降水量级增大, 逐渐转为低估(龙柯吉等, 2024)。CMA-MESO 模式对新疆伊犁河谷地区 6.1~12.0 mm 量级降水的 TS 评分显著偏低, 其预报偏差与降水累积概率分布异常密切相关, 且未能准确再现该区域降水频率“昼少夜多”的日变化特征(牟欢等, 2025)。

传统模式降水产品的检验通常采用点对点方法, 检验指标包括 TS 评分、空报率、漏报率等(胡嘉纓, 2023; 李智玉等, 2024), 主要关注模式降水产品与实况降水的强度差异。此类检验结果可能导致当模

式预报的降水落区与实况较为相似时, 仅因落区的微小偏差而产生较高的漏报率和空报率, 进而导致模式降水产品的性能被低估, 即产生“双惩罚效应”(戴建华等, 2013), 可见传统检验方法难以全面检验模式降水产品的预报性能。MODE (Method for Object-based Diagnostic Evaluation) 检验是一种面向对象的空间检验方法(Davis et al., 2006a, 2006b; Lack et al., 2010), 针对给定的要素场, 通过识别超过特定阈值与实况相匹配的目标对象, 量化和对比目标对象的多种空间分布属性, 利用模糊逻辑函数来衡量对象之间的相似度(Flora et al., 2019; 潘留杰等, 2024), 给出模式预报与实况的空间分布差异。目前 MODE 方法已在我国季风区模式降水检验中广泛应用(Ma et al., 2019; 卜文惠等, 2022; Zhang et al., 2022)。

在地形复杂的昆仑山北坡区域, 模式降水产品相对较低的空间分辨率难以刻画地形细节, 山脉尺度特征与大气环流之间存在着多尺度相互作用, 模式对地形强迫抬升、水汽输送以及云微物理过程等关键机制的描述能力不足(廖菲等, 2007; Luo et al., 2014), 这些因素都可能导致模式降水产品在该区域的暴雨预报中产生误差。2015 年之前, 昆仑山北坡仅有 9 个国家级气象观测站(以下简称国家站), 且主要位于低海拔区域, 因此无法对模式降水产品在该区域的预报性能进行全面检验。近年来, 昆仑山北坡陆续建成了 400 多个区域级气象观测站(以下简称区域站); 加之, 多源融合降水产品在新疆地区的适用性已得到验证(杨柳等, 2025a), 为模式降水产品在该区域的检验提供了条件。ECMWF、CMA-GFS 和 CMA-MESO 模式是新疆气象部门降水业务预报的重要参考, 但目前尚未开展上述三种模式降水产品在昆仑山北坡预报性能的对比分析, 各模式预报的特征及偏差多为预报员的主观判断, 缺乏客观评价。此外, 目前新疆开展的模式降水检验多采用传统的点对点方法(牟欢等, 2025; 杨柳等, 2025b), 尚未开展基于 MODE 方法的降水落区空间检验。由于新疆的国家站/区域站相对较少, 在传统的点对点检验方法中, 常因降水落区位置的微小偏差而导致暴雨中心漏报或空报。因此, 本文利用降水观测资料和多源融合降水产品, 将传统点对点检验与 MODE 检验方法相结合, 针对 2021—2022 年夏季昆仑山北坡降水强度大、影响范围广的三次暴雨过程, 检验三种模式对昆仑山北坡暴雨的预报性能, 揭示模式预报的降水强度和落区空间分布(位置、姿态和面积)与实况的差异, 以期为提高模式在昆仑山北坡的适用能力及优化预报偏差订正方案提供参考依据。

1 研究区、资料与方法

1.1 研究区和资料说明

本文使用的资料包括:(1)新疆气象信息中心提供的2021—2022年6—7月昆仑山北坡(图1a)427个国家和区域站(图1b)逐小时降水资料,作为检验模式对暴雨过程降水强度预报性能的“真值”。(2)国家气象信息中心研发的多源融合降水产品(CMA Multi-source Precipitation Analysis System, CMPAS),作为检验模式对暴雨过程降水落区预报性能的“真

值”,空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,时间分辨率为1 h。(3)ECMWF、CMA-GFS和CMA-MESO 08时(北京时,下同)起报的12—36 h降水预报产品,用于检验三种模式对暴雨过程的降水强度和落区的预报性能;ECMWF、CMA-GFS和CMA-MESO的空间分辨率分别为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 、 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 和 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$,ECMWF和CMA-GFS的时间分辨率均为3 h,CMA-MESO为1 h。(4)中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台提供的SRTM3 V4.1数字高程数据产品,该产品覆盖研究区域,空间分辨率为90 m。

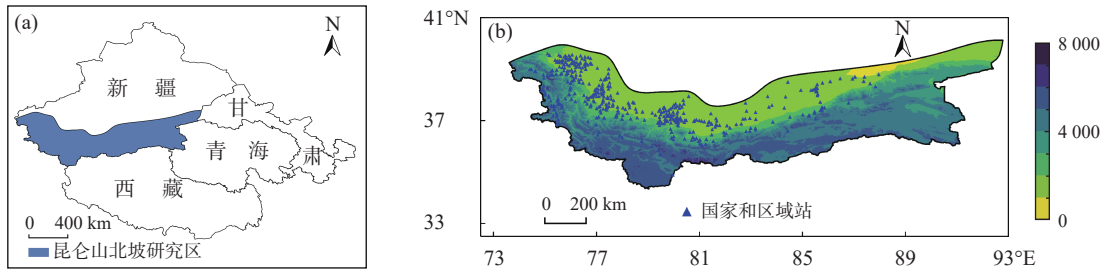


图1 昆仑山北坡研究区(a)、国家和区域站及海拔高度(填色,单位:m)(b)空间分布

Fig. 1 (a) Study area of the northern slope of Kunlun Mountains, (b) spatial distribution of national and regional stations, and altitude (shaded, unit: m)

1.2 研究方法

使用最邻近插值法,将模式降水产品插值到观测站点,以降水观测值作为实况值,对模式降水产品的性能进行检验。检验指标包括相关系数(COR,记为 C_{OR})、相对偏差(RE,记为 E_R)、均方根误差(RMSE,记为 E_{RMS})、技巧评分(TS,记为 T_S)、空报率(FAR,记为 R_{FA})、漏报率(MR,记为 R_M),计算公式如下:

$$C_{OR} = \frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (1)$$

$$E_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(G_i - O_i)}{O_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - O_i)^2} \quad (3)$$

$$T_S = \frac{\sum N_A}{\sum N_A + \sum N_B + \sum N_C} \quad (4)$$

$$R_{FA} = \frac{\sum N_B}{\sum N_A + \sum N_B} \quad (5)$$

$$R_M = \frac{\sum N_C}{\sum N_A + \sum N_C} \quad (6)$$

式中, O_i 为站点降水观测数据, G_i 为模式降水产品插

值到站点得到的数值, i 的取值范围为 $[1, N]$, N 为参与检验的样本数量。 N_A 表示观测与模式均有降水产生的站点数量, N_B 表示模式降水发生而观测不发生的站点数量, N_C 表示模式降水不发生而观测发生的站点数量。新疆24 h累计降水量的分级标准(张家宝等,1986)为:小雨 $[0.1, 6.1 \text{ mm}]$ 、中雨 $[6.1, 12.1 \text{ mm}]$ 、大雨 $[12.1, 24.1 \text{ mm}]$ 和暴雨 $(\geq 24.1 \text{ mm})$ 。

MODE检验以CMPAS为实况场,模式降水和CMPAS的空间分辨率通过插值统一为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$,降水最小面积阈值为5个格点,面积小于5个格点的降水目标则被删除。从位置、姿态和面积三个方面检验模式降水目标与实况的空间分布差异,具体方法为:

(1)位置检验。模式降水目标质心位置与实况的经、纬度差值,定义纬向偏差东向为正、西向为负;经向偏差北向为正、南向为负。

(2)姿态检验。降水目标主轴与正东向的夹角为主轴倾角,模式降水目标主轴倾角与实况的差值为主轴倾角偏差,取值范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$,主轴倾角偏差为负值指模式降水目标较实况顺时针旋转,正值表示逆时针旋转。

(3)面积检验。模式降水面积与实况相较偏大或偏小的比例为面积相对偏差,相对偏差越接近0,说明模式降水面积与实况的差异越小。

用于检验的三次暴雨过程分别发生在2021年6月15日20时—16日20时(以下简称“过程1”)、2021年7月20日20时—21日20时(以下简称“过

程 2”)和 2022 年 6 月 18 日 20 时—19 日 20 时(以下简称“过程 3”)。在对三次过程 24 h 累计降水的 MODE 检验中,根据降水强度的差异,设定高、低两种阈值,低阈值用于检验模式降水的整体落区偏差,高阈值则用于检验模式对暴雨落区的预报效果(潘留杰等, 2024),其中过程 1、过程 2、过程 3 的高阈值分别为 30 mm、15 mm 和 20 mm,低阈值分别为 12 mm、5 mm、6 mm; 3 h 累计降水量阈值分别为 5 mm、2 mm 和 3 mm。

由表 1 和图 2a 可知,过程 1 的暴雨中心位于(78°E, 38°N)、(80°E, 37°N)和(82°E, 36°N)附近,148 个国家和地区站出现暴雨,最大降水中心出现在和田洛浦县山普鲁乡站,24 h 累计降水量高达 106.6 mm;过程 2 的暴雨中心位于(75°E, 38°N)、(78°E, 38°N)和(81°E, 36°N)附近(图 2b),11 个国家和地区站出现暴雨,最大降水中心出现在和田皮山县铁提尔村站,24 h 累计降水量达 40.3 mm;过程 3 的暴雨中心位于

(78°E, 37°N)、(80°E, 38°N)、(82°E, 36°N)、(83°E, 36°N)和(85°E, 37°N)附近(图 2c),29 个国家和地区站出现暴雨,最大降水中心出现在和田于田县吐格曼巴什村站,24 h 累计降水量为 46.6 mm。

表 1 昆仑山北坡三次暴雨过程起止时间、降水站点占比、暴雨站数和最大 24 h 累计降水量统计

Table 1 Statistics of start-end times, precipitation station ratio, number of rainstorm stations and maximum 24-h precipitation of three rainstorm events in the northern slope of Kunlun Mountains

过程	起止时间	降水站点占比/%	暴雨站数/个	最大 24 h 累计降水量/mm
过程 1	2021 年 6 月 15 日 20 时—16 日 20 时	76.3	148	106.6
过程 2	2021 年 7 月 20 日 20 时—21 日 20 时	69.1	11	40.3
过程 3	2022 年 6 月 18 日 20 时—19 日 20 时	54.3	29	46.6

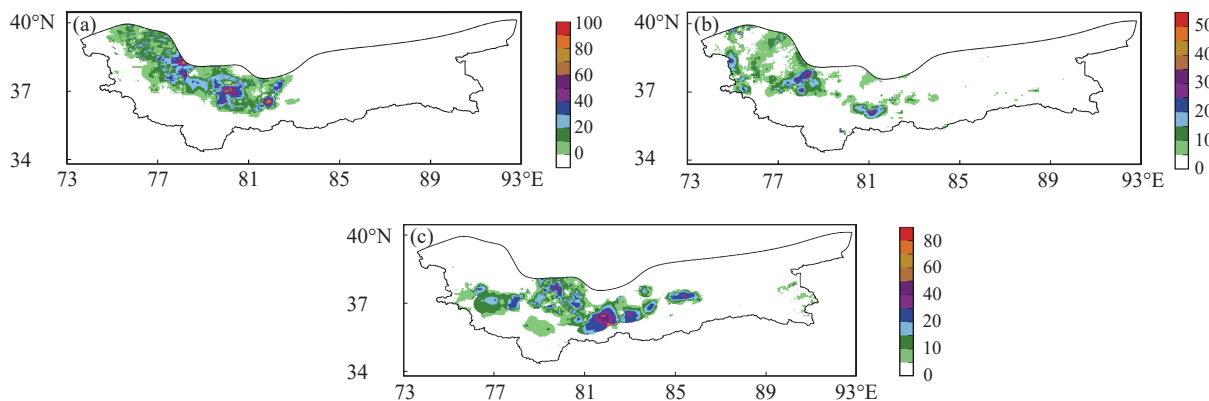


图 2 2021—2022 年昆仑山北坡过程 1 (a)、过程 2 (b)、过程 3 (c) 24 h 累计降水量 (单位: mm) 空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of 24-hour accumulated precipitation (unit: mm) of (a) event 1, (b) event 2, and (c) event 3 in the northern slope of Kunlun Mountains from 2021 to 2022

2 三种模式对降水强度和落区检验效果对比

2.1 降水强度检验效果

2.1.1 24 h 累计降水量检验效果

在三次暴雨过程中,ECMWF 和 CMA-MESO 两种模式的 24 h 累计降水量与实况的相关性整体较好(表 2),除在过程 2 中,CMA-GFS 和 CMA-MESO 模式的 RE 为负值外,其他过程中 3 种模式的 RE 均为正值,可见模式降水量整体较实况偏大,其中 ECMWF 偏大最多,CMA-GFS 最少。ECMWF 与 CMA-MESO 的 TS 评分接近,且明显优于 CMA-GFS。三种模式的 FAR 均明显高于 MR,说明空报率对降水准确度的影响更大,CMA-GFS 模式较高的 FAR 是导致其 TS 评分低于其他两种模式的原因之一。此外,三种模式的 TS 评分在过程 1 中最高,过程 2 其次,过程

3 中最低,由前文可知,过程 1 的降水范围最大,过程 2 其次,过程 3 最小,可见降水范围对 TS 评分的影响较大,随降水范围的减小,三种模式 TS 评分的差异增大。

图 3 给出三种模式对暴雨过程的 24 h 累计降水量分级检验结果,三种模式降水总体呈高估小雨和中雨、低估大雨和暴雨的特征(图 3b₁—b₃)。三种模式降水的 RMSE(图 3c₁—c₃)均随降水强度的增大而增大,COR(图 3a₁—a₃)则随降水强度的增大而减小。ECMWF 模式对中雨和大雨的 TS 评分在三种模式中最高(图 3d₁—d₃);ECMWF 和 CMA-MESO 对暴雨的 TS 明显高于 CMA-GFS,CMA-GFS 模式在两场暴雨过程中的暴雨 TS 均为 0,可见该模式对暴雨的预报能力相对较弱。对比三次过程的检验指标发现,三种模式预报在过程 1 中虽然 RMSE 较大,但大

表2 三种模式对2021—2022年昆仑山北坡三次过程24 h累计降水量检验结果

Table 2 Verification results of three models for 24-h accumulated precipitation during three rainstorm events in the northern slope of Kunlun Mountains from 2021 to 2022

天气过程	模式	COR	RE/%	RMSE/mm	TS	FAR	MR
过程1	ECMWF	0.329	387.0	19.823	0.886	0.112	0.003
	CMA-GFS	0.051	197.9	22.962	0.847	0.153	0.000
	CMA-MESO	0.128	326.8	25.109	0.887	0.082	0.037
过程2	ECMWF	0.381	352.6	9.156	0.818	0.163	0.027
	CMA-GFS	0.232	-32.7	8.153	0.777	0.212	0.017
	CMA-MESO	0.431	-17.4	7.375	0.777	0.157	0.092
过程3	ECMWF	0.639	341.0	7.578	0.586	0.412	0.004
	CMA-GFS	0.274	204.6	9.640	0.558	0.442	0.000
	CMA-MESO	0.539	300.3	8.014	0.633	0.362	0.013

雨和暴雨的TS高于其他两次过程,说明模式降水在过程1中对大雨和暴雨的把握能力较强,尤其是CMA-MESO模式暴雨的TS接近0.3。ECMWF模式中雨和大雨的TS为各模式中最大,这主要得益于该模式预报的MR(图3f₁—f₃)为各模式中最低;过程1和过

程2出现暴雨时,CMA-MESO模式降水的TS大于ECMWF,说明其暴雨捕捉能力优于ECMWF;CMA-GFS模式暴雨量级的TS在3次过程中均为最小,过程2和过程3中暴雨的TS为0,可见,CMA-GFS模式对暴雨的捕捉能力明显偏弱。

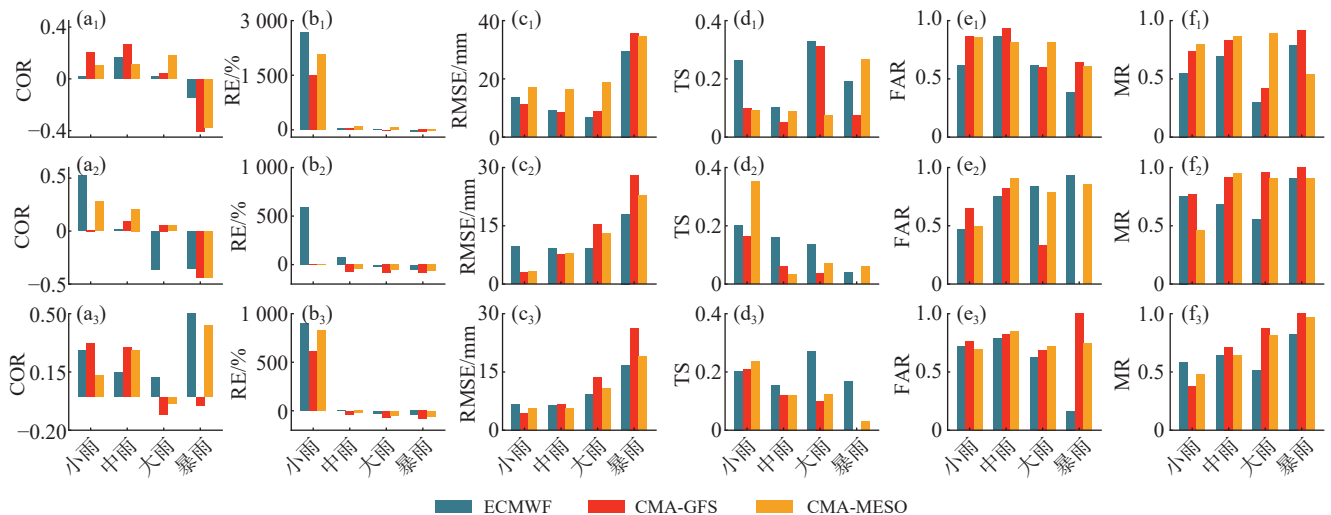
图3 ECMWF、CMA-GFS和CMA-MESO三种模式对2021—2022年昆仑山北坡过程1(a₁—f₁)、过程2(a₂—f₂)和过程3(a₃—f₃)的24 h累计降水量COR(a₁—a₃)、RE(b₁—b₃)、RMSE(c₁—c₃)、TS(d₁—d₃)、FAR(e₁—e₃)、MR(f₁—f₃)分级检验结果

Fig. 3 Categorical verification results of (a₁—a₃) COR, (b₁—b₃) RE, (c₁—c₃) RMSE, (d₁—d₃) TS, (e₁—e₃) FAR, and (f₁—f₃) MR for 24-hour accumulated precipitation forecasts of ECMWF, CMA-GFS, and CMA-MESO models for (a₁—f₁) event 1, (a₂—f₂) event 2, and (a₃—f₃) event 3 in the northern slope of Kunlun Mountains from 2021 to 2022.

2.1.2 3 h 累计降水量检验效果

图4给出实况和三种模式对暴雨过程的累计降水量、累计降水频次和降水强度随时间的演变特征。在过程1中,实况强降水时段主要出现在23:00—次日11:00(图4a₁),三种模式降水在此时段处于上升阶段且明显小于实况,模式降水峰值出现时次较实况滞后;14:00后模式降水的变化趋势与实况较为一致。模式的降水频次各时次小幅波动(图4b₁),并没有刻画出14:00起实况降水频次明显减少的趋势。三种模式和实况的降水强度变化趋势与降水量变化趋势基本一致(图4c₁),在实况强降水时段,模式预报

虽出现降水,但其降水强度远小于实况降水,只有CMA-MESO模式08:00起降水强度大于实况。

过程2中实况降水主要出现在08:00—14:00(图4a₂),11:00出现过程降水量峰值,ECMWF模式降水量变化趋势与实况基本一致,但各时次降水量均高于实况、峰值出现时间滞后3 h;CMA两种模式降水量的变化趋势与实况呈反相位分布,在实况降水大值时段明显低估降水量。实况降水频次的变化趋势与降水量一致(图4b₂),而三种模式的降水频次各时次则呈小幅波动趋势。ECMWF模式的降水强度变化趋势与实况较为相似(图4c₂),但峰值出现时

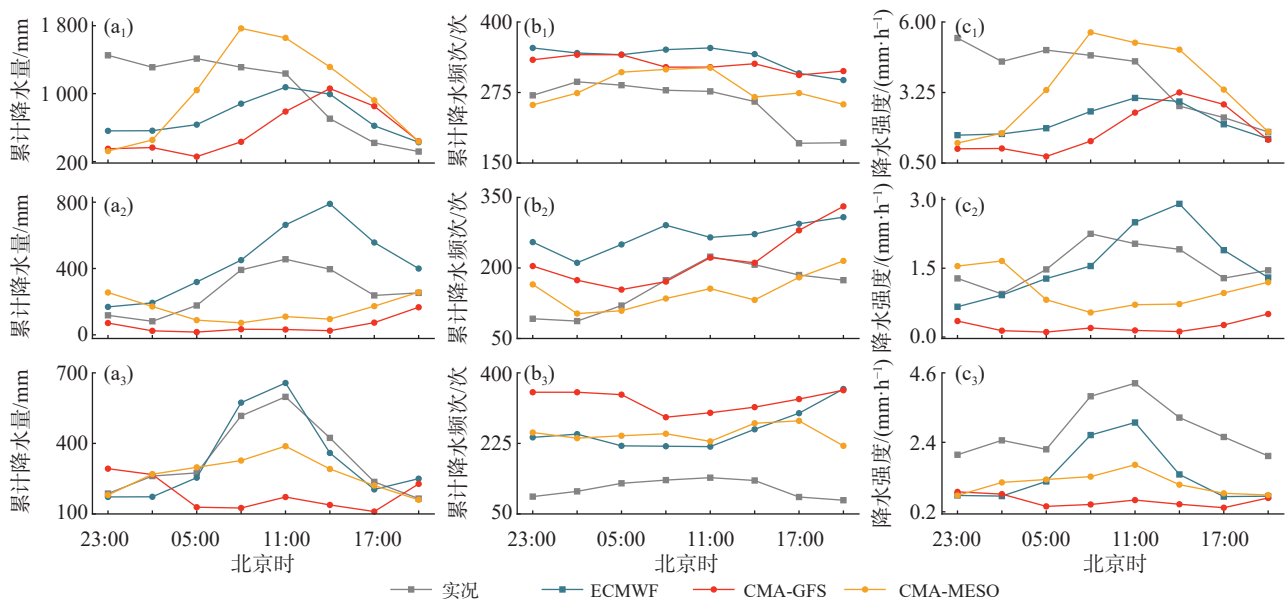


图 4 ECMWF、CMA-GFS 和 CMA-MESO 模式对 2021—2022 年昆仑山北坡过程 1 (a_1 — c_1)、过程 2 (a_2 — c_2) 和过程 3 (a_3 — c_3) 的累计降水量 (a_1 — a_3)、累计降水频次 (b_1 — b_3) 和降水强度 (c_1 — c_3) 预报与实况对比

Fig. 4 Temporal evolution of (a_1 — a_3) accumulated precipitation, (b_1 — b_3) accumulated precipitation frequency, and (c_1 — c_3) precipitation intensity for (a_1 — c_1) event 1, (a_2 — c_2) event 2, and (a_3 — c_3) event 3 of observations, ECMWF, CMA-GFS and CMA-MESO models in the northern slope of Kunlun Mountains from 2021 to 2022

间滞后, 其他两种模式的降水强度变化趋势较实况呈反向变化特征。

ECMWF 模式在过程 3 中的降水量变化曲线与实况降水一致 (图 4 a_3), CMA-MESO 模式的降水量变化趋势与实况较为相似, 但降水量峰值明显小于实况, CMA-GFS 模式与实况的降水量变化趋势呈现反相位。三种模式的降水频次各时次均明显大于实况 (图 4 b_3), 导致各时次模式的降水强度小于实况 (图 4 c_3), 说明各模式均低估了降水强度, 相比之下, ECMWF 模式的降水强度与实况最为接近。

综上, ECMWF 模式的降水量在过程 2 和过程 3 中基本能够反映实况降水的变化趋势, 过程 1 中 ECMWF 模式的降水量在实况降水大值时段与之差异明显; CMA 两种模式的降水量则在暴雨过程的降水大值时段均大幅低估实况降水。结合三次过程中各模式不同等级降水的变化趋势发现 (图略), 各模式在强降水时段与实况的显著差异, 主要源于此时段模式降水高估小雨和中雨、明显低估大雨和暴雨。在暴雨过程的强降水时段, 三种模式的降水频次普遍多于实况, 只有过程 2 中 CMA-MESO 模式的降水频次少于实况, 进而导致强降水时段模式的降水强度普遍小于实况。

对比暴雨过程中三种模式降水的检验指标变化曲线 (图略) 发现, ECMWF 模式降水各时次的 COR 基本都为各模式中最大, CMA-MESO 次之、CMA-GFS 最小; 在实况降水的大值时段, 各模式降水的 RMSE 相对较大。ECMWF 模式降水各时次的 TS 均

大于其他两种模式, 在实况降水大值时段相对较高, 结合空报率和漏报率可以看出, 在各模式降水 FAR 相差不大的情况下, ECMWF 模式的 MR 小于其他两种模式导致其 TS 相对较高。三种模式降水均呈现出实况降水大值时段易漏报、小值时段易空报的特征。在过程 1 中, 三种模式降水的 TS 均明显大于其他两次过程, 这主要得益于该过程中模式降水的 FAR 相对较低。

2.2 降水落区检验效果

2.2.1 24 h 累计降水落区检验效果

在过程 1 中, 实况降水落区出现在 82°E 以西, 三种模式降水预报的落区与实况均较为相似 (图 5 a_1 — d_1 、6 a_1 — d_1), 其中 ECMWF 和 CMA-GFS 模式降水面积与实况较为接近, CMA-MESO 模式降水落区较实况明显偏大。在此次过程中, 实况暴雨有三个中心 (图 7 a_1), 分别位于 (78°E , 38°N)、(80°E , 37°N) 和 (82°E , 36°N) 附近, ECMWF 模式仅预报出位于 (78°E , 38°N) 的暴雨中心 (图 7 b_1), CMA-GFS 模式未能预报出暴雨 (图 7 c_1), CMA-MESO 模式预报的暴雨落区范围较大 (图 7 d_1), 主要分布在 75° — 82°E 。通过 MODE 检验, ECMWF 模式预报的降水目标 1 (图 7 b_1 中序号为 1) 与实况匹配, 但其质心位置较实况略偏南、姿态和面积与实况基本一致, 整体相似度达 0.929。CMA-MESO 模式预报的降水目标 1 (图 7 d_1 中序号为 1) 的质心位置较实况偏西、偏南, 面积偏大, 整体相似度只有 0.036; CMA-MESO 模式预报的降水目标 2 (图 7 d_1 中序号为 2) 的质心较实况明显偏西、面

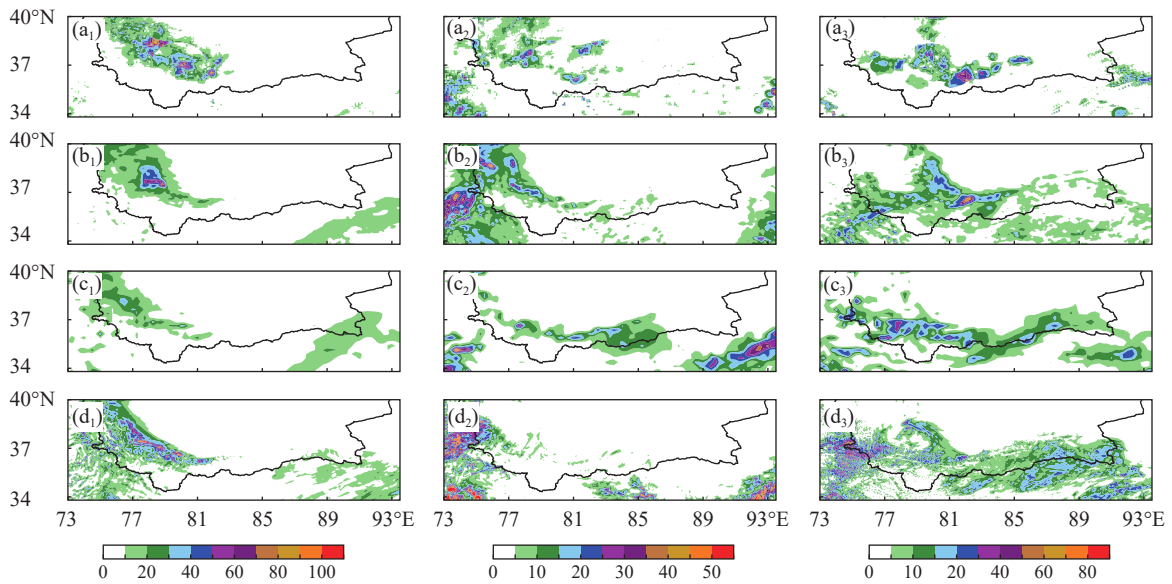


图5 实况 (a_1 — a_3)、ECMWF (b_1 — b_3)、CMA-GFS (c_1 — c_3) 和 CMA-MESO (d_1 — d_3) 三种模式对 2021—2022 年昆仑山北坡过程 1 (a_1 — d_1)、过程 2 (a_2 — d_2) 和过程 3 (a_3 — d_3) 24 h 累计降水 (单位: mm) 落区分布

Fig. 5 Spatial distribution of 24 h accumulated precipitation (unit: mm) of (a_1 — d_1) event 1, (a_2 — d_2) event 2, and (a_3 — d_3) event 3 from (a_1 — a_3) observations, (b_1 — b_3) ECMWF, (c_1 — c_3) CMA-GFS, and (d_1 — d_3) CMA-MESO models in the northern slope of Kunlun Mountains from 2021 to 2022

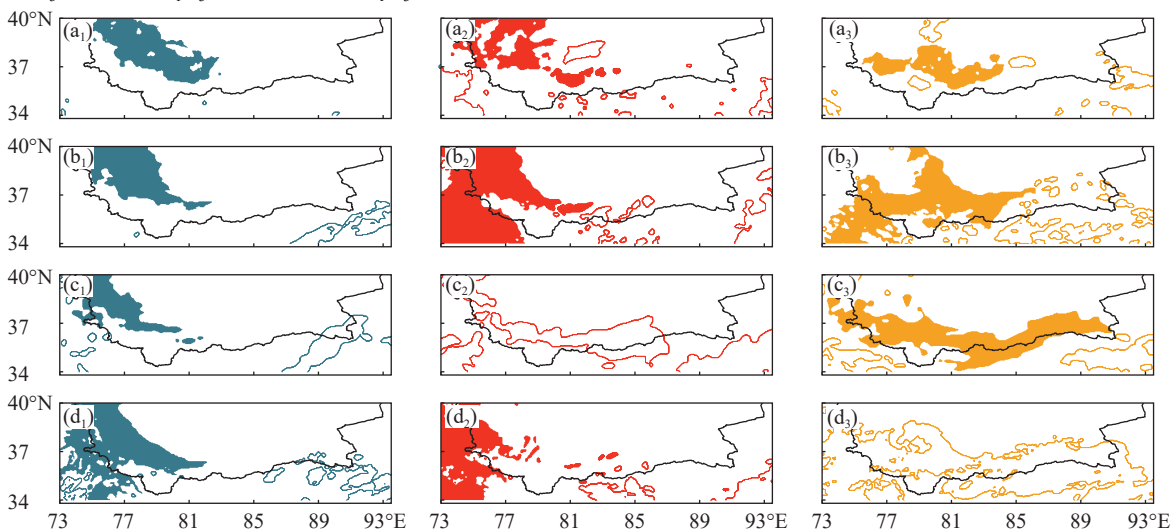


图6 实况 (a_1 — a_3)、ECMWF (b_1 — b_3)、CMA-GFS (c_1 — c_3) 和 CMA-MESO (d_1 — d_3) 三种模式对 2021—2022 年昆仑山北坡过程 1 (a_1 — d_1)、过程 2 (a_2 — d_2) 和过程 3 (a_3 — d_3) 24 h 累计降水落区的 MODE 检验 (低阈值) 降水目标 (填色) 分布 (填色代表降水目标; 绿色、红色、黄色分别代表过程 1—3, 下同)

Fig. 6 Distribution of identified objects from MODE verification (low threshold) for 24-hour accumulated precipitation in (a_1 — d_1) event 1, (a_2 — d_2) event 2, and (a_3 — d_3) event 3 of (a_1 — a_3) observations, (b_1 — b_3) ECMWF, (c_1 — c_3) CMA-GFS, and (d_1 — d_3) CMA-MESO in the northern slope of Kunlun Mountains from 2021 to 2022 (Colored areas representing precipitation objects. The green, red and yellow represent events 1—3, respectively, the same below)

积与实况较为接近,其姿态呈东—西走向,较实况目标的东北—西南走向存在顺时针偏转,整体相似度为 0.596。三种模式降水均未有效捕捉位于 (80°E , 37°N) 附近的实况降水目标。

过程 2 的降水落区相对分散,三种模式降水产品对降水落区的刻画能力存在差异 (图 5 a_2 — d_2), ECMWF 模式预报的降水落区与实况最接近 (图 6 b_2), 但降水落区面积较实况偏大; CMA-MESO 模式预报的降水落区较实况明显偏小 (图 6 d_2); 由于实况降水

主要分布在 35°N 以北、 83°E 以西的区域,而 CMA-GFS 模式的降水落区主要位于 35°N 以南的区域 (图 5 c_2), 因此未能有效捕捉到实况降水落区。此次过程中实况暴雨出现三个中心,位于 (75°E , 38°N)、(78°E , 38°N) 和 (81°E , 36°N) 附近, ECMWF 模式预报出位于 (75°E , 38°N) 和 (78°E , 38°N) 附近的两个暴雨中心 (图 7 b_2), CMA-GFS 模式仅预报出 (81°E , 36°N) 附近的暴雨中心 (图 7 c_2), 而 CMA-MESO 模式预报的暴雨落区较实况明显偏西,集中在 75°E 附近 (图 5 d_2)。ECMWF

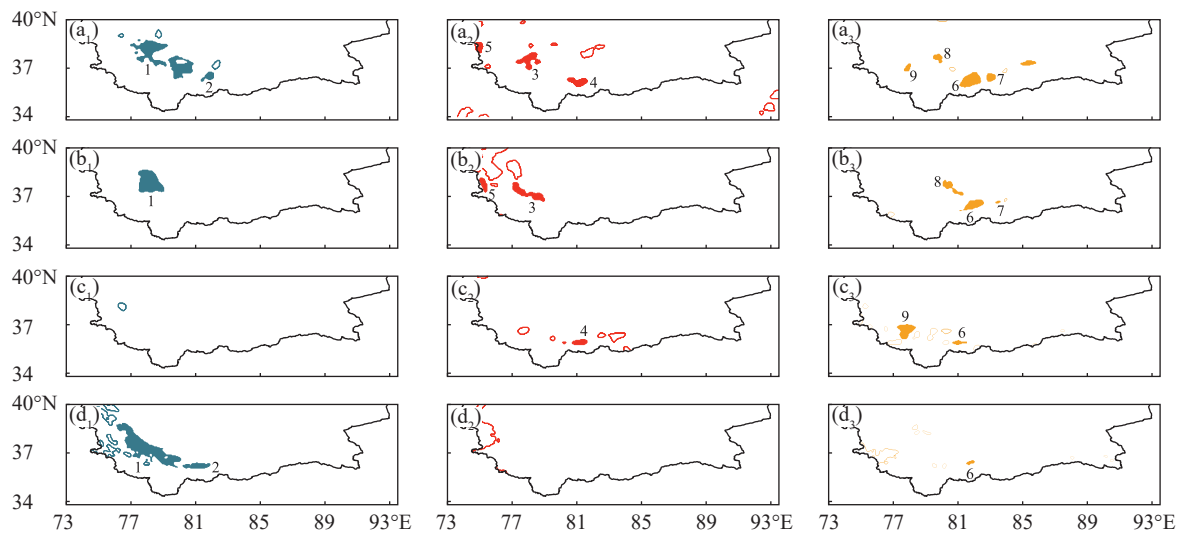


图 7 同图 6, 但为 MODE 检验 (高阈值) 降水目标分布 (图中数字为目标序号)

Fig. 7 Same as Fig. 6, but the distribution of identified objects from MODE verification (high threshold) (The numbers in the figures indicate object IDs.)

模式预报的降水目标 3 (图 7b₂ 中序号为 3) 的质心位置和面积与实况差异较小, 但其姿态较实况顺时针偏转, 实况目标 (图 7a₂ 中序号为 3) 呈东北—西南走向, 而模式预报则呈西北—东南走向; ECMWF 模式降水目标 5 (图 7b₂ 中序号为 5) 的面积与实况较为相似, 但质心较实况明显偏南。CMA-GFS 模式预报的降水目标 4 (图 7c₂ 中序号为 4) 与实况相比, 其质心略偏南、面积偏小、姿态较为一致。过程 2 中, 三个与实况匹配的模式降水目标整体相似度均不足 0.2, CMA-MESO 模式未能预报出与实况匹配的降水目标。

在过程 3 中, ECMWF 和 CMA-GFS 两种模式降水落区面积较实况均明显偏大。从主观判断来看 (图 5a₃—d₃), CMA-MESO 模式降水落区位于在 36°N 一线, 与实况降水落区有部分重叠, 但 MODE 检验结果却表明模式未能有效匹配出实况降水落区 (图 6d₃)。造成上述结果的原因是 MODE 检验通过比较对象的位置、主轴倾角、面积等多个属性的定量信息来判断模式降水目标与实况是否匹配 (刘湊华等, 2013; 潘留杰等, 2024), 在过程 3 中, CMA-MESO 模式降水落区虽与实况有部分重叠, 但因其降水目标过大导致其位置、面积等要素都与实况有显著差异, 因而模式降水目标与实况无法匹配。过程 3 的实况暴雨有五个中心 (图 7a₃), 主要分布在 (78°E, 37°N)、(80°E, 38°N)、(82°E, 36°N) (83°E, 36°N) 和 (85°E, 37°N) 附近, ECMWF 模式预报出位于 (80°—84°E, 36°—39°N) 的三个暴雨中心 (图 7b₃), CMA 两种模式预报的暴雨落区较实况明显偏西, CMA-GFS 模式预报出位于在 (78°E, 37°N) 和 (82°E, 36°N) 附近的两个暴雨中心 (图 7c₃), 而 CMA-MESO 模式仅预报出位于 (82°E, 36°N) 附近的暴雨中心 (图 7d₃)。三种模式均预报出降水目标 6, ECMWF 模式的降水目标 6

(图 7b₃ 中序号为 6) 较实况质心位置差异不大、面积偏小, 整体相似度为 0.928; CMA-GFS 模式降水目标 6 (图 7c₃ 中序号为 6) 的质心位实况明显偏西、偏南, 面积偏小, 其姿态呈东—西走向, 相较实况的东北—西南走向存在顺时针偏转, 整体相似度不足 0.1; CMA-MESO 模式预报的降水目标 6 (图 7d₃ 中序号为 6), 其面积虽明显小于实况, 但质心位置与实况接近, 因而其整体相似度为 0.801。ECMWF 模式的降水目标 7 和目标 8 (图 7b₃ 中序号为 7 和 8) 的质心位置和面积与实况相比差异明显, 整体相似度不高。CMA-GFS 模式预报的降水目标 9 (图 7c₃ 中序号为 9) 的质心较实况偏南, 面积较实况偏大近 400%, 整体相似度只有 0.311。三种模式均漏报位于 (85°E, 37°N) 附近的实况降水目标。

对比过程 2 中 CMA-GFS 模式 (图 6c₂、7c₂) 和过程 3 中 CMA-MESO 模式 (图 6d₃、7d₃) 的高、低两种阈值 MODE 检验结果, 可见在低阈值检验时, 模式未能有效匹配出实况降水落区, 但在高阈值检验时, 模式却能匹配到实况降水目标, 主要是在低阈值 MODE 检验时, 因识别出的模式降水目标过大, 导致其与实况降水落区的位置、面积等都有明显差异而无法有效匹配, 而高阈值检验识别出的模式降水面积较小, 与实况降水目标存在一定的相似性, 因而能够与实况匹配。

综上, ECMWF 模式预报的 24 h 累计降水目标与实况匹配数量最多, 整体相似度较高。结合图 8a 可知, 三种模式降水目标较实况的纬向偏差小于 0.5°的比例为 75%, 其中 ECMWF 模式以偏东为主、CMA 两种模式以偏西为主; 各模式降水目标较实况的经向偏差 (图 8b) 小于 0.5°的占比为 83%, 整体以偏南为主。各模式 24 h 累计降水目标的姿态与实况

较为一致(图8c),其中83%的模式降水目标与实况的主轴倾角偏差不超过 25° ,各模式降水面积较实况以偏小为主(图8d),且偏差基本不超过100%。

2.2.2 3 h 累计降水落区检验效果对比

为深入分析三次暴雨过程中模式降水落区与实

况的空间差异特征,对三种模式预报3 h 累计降水进行MODE检验,ECMWF模式预报的降水目标与实况匹配数量最多、CMA-MESO略少,CMA-GFS最少(图9a₁—c₁)。与实况相比,ECMWF模式降水目标的质心较实况的纬向偏差(图9a₂—c₂)方向具有随

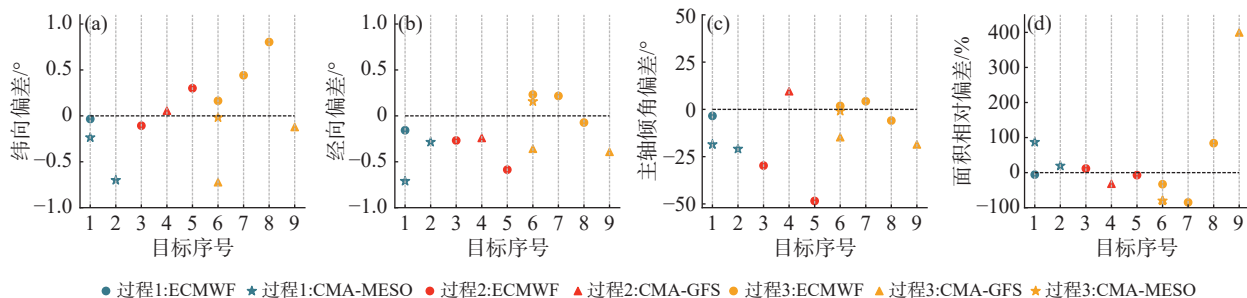


图8 ECMWF、CMA-GFS 和 CMA-MESO 三种模式对 2021—2022 年昆仑山北坡过程 1、过程 2 和过程 3 的 24 h 累计降水 MODE 检验(高阈值)降水目标的纬向偏差(a)、经向偏差(b)、主轴倾角偏差(c)和面积相对偏差(d)(y轴数字与图7中的目标序号相对应)

Fig. 8 (a) Zonal bias, (b) meridional bias, (c) orientation angle bias, and (d) area relative bias of MODE verification (high threshold) targets for 24-hour accumulated precipitation in event 1, event 2, and event 3 of ECMWF, CMA-GFS, and CMA-MESO in the northern slope of Kunlun Mountains from 2021 to 2022 (the Y-axis correspond to the Object IDs in Fig. 7)

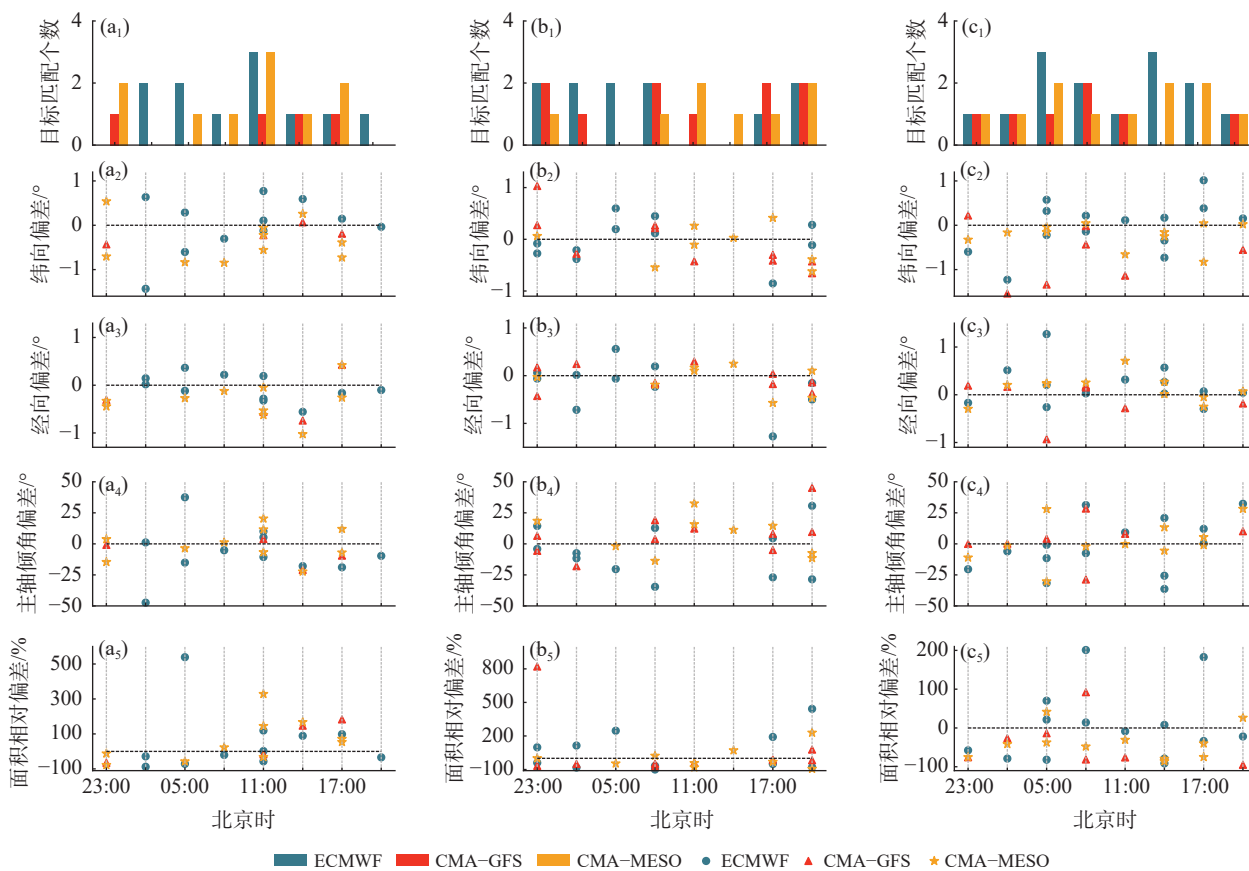


图9 ECMWF、CMA-GFS 和 CMA-MESO 三种模式对 2021—2022 年昆仑山北坡过程 1(a₁—a₅)、过程 2(b₁—b₅) 和过程 3(c₁—c₅) 的 3 h 累计降水 MODE 检验降水目标的匹配数量(a₁—c₁)、纬向偏差(a₂—c₂)、经向偏差(a₃—c₃)、主轴倾角偏差(a₄—c₄) 和面积相对偏差(a₅—c₅)

Fig. 9 (a₁–c₁) Matched objects, (a₂–c₂) zonal bias, (a₃–c₃) meridional bias, (a₄–c₄) orientation angle bias, and (a₅–c₅) area relative bias of MODE verification targets for 3-hour accumulated precipitation in event 1, (b₁–b₅) event 2, and (c₁–c₅) event 3: ECMWF, CMA-GFS, and CMA-MESO in the northern slope of Kunlun Mountains from 2021 to 2022

机性特征,而 CMA 两种模式降水目标的质心则呈现偏西的趋势,70% 的模式降水目标的质心纬向偏差小于 0.5° 。三种模式降水目标质心与实况的经向偏差(图 9a₃—c₃)方向在不同过程中表现各异,有 84% 的模式降水目标与实况的经向偏差不超过 0.5° ,ECMWF 模式降水目标的经向偏差相对较大。整体来看,模式降水目标的纬向偏差大于经向偏差。三种模式降水目标姿态与实况具有良好的一致性(图 9a₄—c₄),80% 的模式降水目标主轴倾角与实况的偏差小于 25° 。各模式降水面积较实况以偏小为主(图 9a₅—c₅),占比达 66%,面积偏大的离散程度明显大于偏小,例如过程 2 中(图 9b₅)23 时 CMA-GFS 模式降水目标较实况偏大 800%,而面积偏小的比例不超过 -100%。ECMWF 模式降水目标的姿态和面积与实况的差异大于其他两种模式。

3 结论与讨论

本文利用降水观测资料和多源融合降水产品,将传统点对点检验与 MODE 检验方法相结合,对 ECMWF、CMA-GFS 和 CMA-MESO 三种模式降水产品在 2021—2022 年夏季昆仑山北坡三次暴雨过程中的预报性能进行检验和对比,揭示模式的降水强度和落区空间分布(位置、姿态和面积)与实况的差异,得到以下主要结论:

(1) 三种模式降水产品普遍高估小雨和中雨,低估大雨和暴雨;ECMWF 对中雨和大雨的预报能力较强;ECMWF 和 CMA-MESO 模式的暴雨量级 TS 评分明显高于 CMA-GFS 模式,在大范围极端暴雨过程中,CMA-MESO 模式的暴雨量级 TS 评分最高,CMA-GFS 对暴雨的预报能力低于其他两种模式。

(2) ECMWF 模式较准确地预报出其中两次暴雨过程的降水强度变化,CMA-GFS 和 CMA-MESO 模式对三次暴雨过程的降水强度均存在显著低估;三种模式在强降水时段的预报误差主要源于模式对小雨和中雨的高估及对大雨和暴雨的低估。此外,在强降水时段模式降水产品的漏报率较高,在弱降水时段空报率较高。

(3) ECMWF 模式预报的降水目标与实况的匹配数量最多,CMA-MESO 其次,CMA-GFS 最少。三种模式对降水目标的经向偏差均呈现偏南特征,纬向偏差 ECMWF 模式以偏东为主,CMA-GFS 和 CMA-MESO 以偏西为主。三种模式对降水目标姿态的预报能力均较强,80% 以上的降水目标与实况的姿态偏差在 25° 以内;三种模式预报的降水面积较实况以偏小为主。

总体来看,ECMWF 和 CMA-MESO 模式降水产品对昆仑山北坡夏季暴雨预报有较好的参考价值,ECMWF 模式对暴雨过程的降水范围和强降水落区的预报能力较好,CMA-MESO 模式对暴雨极值雨量的预报能力较优;CMA-GFS 模式对暴雨的预报性能明显弱于上述两种模式。由于暴雨在昆仑山北坡是小概率事件,目前该区域的暴雨天气过程还相对较少,仅用本文检验的三次暴雨过程,尚不能完整概括每一种模式降水产品在昆仑山北坡暴雨预报中的稳定偏差,今后还需积累更多的暴雨过程进行系统分析。

传统检验方法定量且易于理解,但由于降水目标的空间分布属性与实况存在差异,常导致总体评分较低;MODE 检验通过计算降水目标的位置、形状等属性,从多视角展现了模式的预报能力,但 MODE 检验对降水阈值和卷积半径等参数较为敏感,在不同暴雨过程中选择不同的阈值也可能导致检验结果缺乏一致性(卜文惠等,2022;潘留杰等,2024)。在类似昆仑山北坡的资料匮乏地区,如何有效利用各种检验方法来提高数值模式的预报性能,有待于更进一步的研究。此外,后续还需开展针对模式热力场、动力场、水汽等方面的检验,从而进一步理解数值模式对干旱区暴雨预报偏差的可能成因。

参考文献 (References):

- 卜文惠,陈昊明,李普曦.2022. ECMWF 模式对 2020 年夏季江淮流域降水的预报偏差分析[J]. *暴雨灾害*,41(3):315–323. Bu W H, Chen H M, Li P X. 2022. Analysis of the deviation of precipitation forecast of ECMWF model over the Yangtze-Huaihe River Valley in summer 2020 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(3):315–323 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.008
- 陈昊明,李普曦,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]. *Advances in Meteorological Science and Technology*,11(3):155–164 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.018
- 戴建华,茅懋,邵玲玲,等.2013. 强对流天气预报检验新方法在上海的应用尝试[J]. *气象科技进展*,3(3):40–45. Dai J H, Mao M, Shao L L, et al. 2013. Applications of a new verification method for severe convection forecasting and nowcasting in Shanghai [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*,3(3):40–45 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2013.03.006
- 胡嘉纓,董春卿,操俊伟,等.2023. 山西复杂地形下 CMA-MESO 3 km 系统降水预报检验及订正[J]. *暴雨灾害*,42(4):384–394. Hu J Y, Dong C Q, Cao J W, et al. 2023. Assessment and correction of precipitation forecast with the CMA-MESO 3 km model under the complex terrain in Shanxi Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(4):384–394 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-218
- 廖菲,洪延超,郑国光.2007. 地形对降水的影响研究概述[J]. *气象科*

- 技,35(3):309–316. Liao F, Hong Y C, Zheng G G. 2007. Review of orographic influences on surface precipitation [J]. *Meteorology Science and Technology*,35(3):309–316 (in Chinese)
- 刘凑华,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]. *Meteorological Monthly*, 39(6):681–690 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.06.003
- 李智玉,杜小玲,朱育雷,等.2024.贵州典型地形下强降水特征及其模式预报订正研究[J].*暴雨灾害*,43(6):648–656. Li Z Y, Du X L, Zhu Y L, et al. 2024. Study on characteristics of heavy precipitation and model prediction correction under typical topography in Guizhou [J]. *Torrential Rain and Disasters*,43(6):648–656 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-079
- 龙柯吉,康岚,肖递祥,等.2024.基于多模式预报的四川盆地强降水订正方法[J].*暴雨灾害*,43(1):54–62. Long K J, Kang L, Xiao D X, et al. 2024. Correction method of heavy rainfall in the Sichuan Basin based on multi-model forecasting [J]. *Torrential Rain and Disasters*,43(1):54–62 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-008
- 毛炜峰,王素甫·阿布都拉,程鹏,等.2007.1999年夏季中昆仑山北坡诸河冰雪大洪水及其成因分析[J].*冰川冻土*,29(4):553–558. Mao W Y, Yusup A, Cheng P, et al. 2007. Extreme flood events in 1999 and their formation conditions in northern slopes of the Middle Kunlun Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,29(4):553–558 (in Chinese)
- 牟欢,陈春艳,杨霞,等.2025. CMA-MESO 模式暖季小时及日降水预报性能评估—以伊犁河谷为例[J].*干旱区地理*,48(2):179–189. Mou H, Chen C Y, Yang X, et al. 2025. Evaluation of hourly and daily precipitation forecasting performance of the CMA-MESO model in the warm season: A case of the Ili River Valley [J]. *Arid Land Geography*,48(2):179–189 (in Chinese). doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2024.350
- 潘留杰,张宏芳,刘嘉慧敏,等.2024. MODE 检验在天气预报中的应用研究进展[J].*地球科学进展*,39(2):193–206. Pan L J, Zhang H F, Liu J H M, et al. 2024. Advancements in study on the application of MODE verification method in weather forecasting [J]. *Advances in Earth Science*,39(2):193–206 (in Chinese). doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2024.012
- 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]. *Meteorological Monthly*,48(3):357–371 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.071301
- 杨柳,江远安,杨霞,等.2025a.多源降水融合产品在新疆暖季的适用性评估[J].*沙漠与绿洲气象*,19(2):37–46. Yang L, Jiang Y A, Yang X, et al. 2025a. Applicability assessment of multi-source precipitation fusion products in the warm season in Xinjiang [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,19(2):37–46 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2402.29005
- 杨柳,杨霞,刁鹏,等.2025b. ECMWF 模式对昆仑山北坡夏季降水日变化特征的预报性能分析[J].*干旱区研究*,42(1):27–39. Yang L, Yang X, Diao P, et al. 2025b. Analysis of the forecast performance of the ECMWF Model for the diurnal variation characteristics of summer-precipitation on the northern slope of the Kunlun Mountains [J]. *AridZone Research*,42(1):27–39 (in Chinese). doi:10.13866/j.azr.2025.01.03
- 杨霞,杨柳.2025.昆仑山北坡西段和中段暴雨的特征及差异[J].*干旱区研究*,42(2):202–211. Yang X, Yang L. 2025. Characteristics and differences in heavy rainfall in the western and central sections of the northern slope of the Kunlun Mountains [J]. *Arid Zone Research*, 42(2):202–211 (in Chinese). doi:10.13866/j.azr.2025.02.02
- 张家宝,苏起元,孙沈清,等.1986.新疆短期天气预报指导手册[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社:456. Zhang J B, Su Q Y, Sun S Q, et al. 1986. Guide Handbook on Xinjiang Short-Term Weather Forecast [M]. Urumqi:Xinjiang People Press,456 (in Chinese)
- 张俊兰,杨霞,肖俊安,等.2023.昆仑山北部夏季降水多尺度时空变化特征[J].*高原山地气象研究*,43(3):1–10. Zhang J L, Yang X, Xiao J A, et al. 2023. Multi-scale temporal and spatial variation characteristics of summer precipitation in northern Kunlun Mountains [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,43(3):1–10 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2023.03.001
- Davis C, Brown B, Bullock R. 2006a. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: methodology and application to mesoscale rain areas [J]. *Monthly Weather Review*,134(7):1772–1784. doi:10.1175/MWR3145.1
- Davis C, Brown B, Bullock R. 2006b. Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: application to convective rain systems [J]. *Monthly Weather Review*,134(7):1785–1795. doi:10.1175/MWR3146.1
- Flora M L, Skinner P S, Potvin C K, et al. 2019. Object based verification of short-term, storm-scale probabilistic mesocyclone guidance from an experimental warn-on-forecast system [J]. *Weather and Forecasting*, 34(6):1721–1739. doi:10.1175/WAF-D-19-0013.1
- Lack S A, Limpert G L, Fox N I. 2010. An object-oriented multiscale verification scheme [J]. *Weather and Forecasting*,25(1):79–92. doi:10.1175/2009WAF2222259.1
- Luo Y L, Gong Y, Zhang D L. 2014. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing meso-scale convective system along a Mei-Yu front in East China [J]. *Monthly Weather Review*,142(1):203–221. doi:10.1175/MWR-D-13-00111.1
- Ma J, Bowley K A, Zhang F. 2019. Evaluating the forecast performance of the Meiyu front rainbelt position: A case study of the 30 June to 4 July 2016 extreme rainfall event [J]. *Atmosphere*,10(11):648. doi:10.3390/atmos10110648
- Zhang H F, Pan L J. 2022. Diagnostic analysis of multi model rainstorm forecast for cases based on MODE method [J]. *Atmosphere*,13(7):1047. doi:10.3390/atmos13071047

(责任编辑 唐国瑛)