暖季东北冷涡背景下吉林省降水预报偏差分析

姚凯[1] 朱晓彤[2] 涂钢[2*] 陈长胜[1] 秦玉琳[1]

(1 吉林省气象台,长春 130062;2 吉林省气象科学研究所,长春 130062)

摘要 利用2021—2023年5—9月东北冷涡背景下吉林省1436站逐小时降水观测资料,对比检验欧洲中心中期天气预报模式(EC)、中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)、中国气象局全球同化预报系统(CMA-GFS)、中国气象局台风模式(CMA-TYM)、上海数值预报模式系统(CMA-SH9)、北京快速更新循环数值预报系统(CMA-BJ)等6种业务数值模式降水预报产品,使用定量评估、分级评估与日变化预报对比等方法揭示不同模式在平原与山地丘陵区逐3 h降水预报及其偏差的特征差异。结果表明:①EC对平原与山地丘陵组的降水量日变化预报均最优,但对站次平均降水量峰值无预报能力,降水站次预报在中午前后偏高尤为明显。而CMA-MESO与CMA-SH9能够更好地预报出降水站次与站次平均降水量的日变化峰值或趋势特征。②各模式的弱降水站次预报偏多,存在湿偏差;在中等及以上强度降水预报中,CMA-MESO与CMA-TYM预报优于全球模式,全球模式存在明显干偏差;在不同强度降水预报中,除CMA-SH9的强降水外,各模式在山地丘陵组预报效果均优于平原组。③预报时钟环形图指出,EC中午前后降水站次预报偏多明显主要由弱降水预报偏多导致,其对于全天各时次的强降水预报误差较大主要由漏报导致;CMA-MESO强降水预报能力强于EC,对傍晚峰值有预报能力且能够预报出强降水,其误差由预报位置偏差导致。

关键词 东北冷涡;数值模式;预报偏差;逐3 h降水;地形

中图分类号:P457.6 **DOI**:10.19517/j.1671-6345.20240327 **文献标识码**:A

引言

东北冷涡是影响我国东北地区的重要天气系统之一[1]。在东北地区暖季(5—9月)降水中,东北冷涡降水量占比较大,通常能占总降水量的20%以上,部分站点可达50%;暖季暴雨事件中,与冷涡相关的暴雨事件降水量在部分站点占比可超过70%[2],出现频次超过20%[3-4]。由于东北冷涡有利于中尺度对流系统发生发展,从而其暖季降水还具有局地性强、突发性强、对流特征明显等特点[5-7]。基于上述特性,如何准确预报暖季东北冷涡降水一直是预报员关注的焦点。

随着数值模式预报能力不断提升,模式降水预报产品已经成为东北冷涡降水预报的重要参考依据。全球模式与区域模式在预报中各有优势,以欧洲中心中期天气预报模式(EC)与中国气象局全球同化预报系统(CMA-GFS)为代表的全球模式对中高纬度位势高度预报准确度较高,对环流形势的把握较为准确[8-10],以中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)为代表的高分辨率区域模式则对中尺度系统诱发的暴雨以及降水强度有较好的预报能力[9,11]。

不同模式预报各有优势,开展模式降水预报检验对于了解模式预报能力从而提高预报准确率有重要意义。针对暖季东北冷涡背景下降水的数值模式预报,已有研究主要集中在日累计降水或过程降水的预报检验:张旭等[12]研究了EC、CMA-GFS等全球模式在辽宁阜新地区冷涡日的降水预报能力,指出EC的降水预报能力较优,且大雨以上量级,TS(Threat Score)评分最高;于跃等[13]对比了四种模

http://www.qxkj.net.cn 气象科技

吉林省科技发展计划项目(20240304119SF)、中国气象局复盘专项(FPZJ2024-032)、吉林省气象局技术发展专项(202304)共同资助

作者简介:姚凯,男,1993年生,硕士,工程师,主要从事预报模式检验与客观订正算法研究,Email:kai3yao@126.com

收稿日期:2024年10月30日;定稿日期:2025年9月28日

* 通信作者,Email:shenxintu@aliyun.com

©《气象科技》编辑部 (CC BY-NC-ND 4.0)

式在辽宁12次大暴雨事件的预报能力后指出，相较于台风型与气旋型暴雨，东北冷涡型暴雨的模式预报能力较优，其中CMA区域模式对于暴雨量级的降水预报参考性较高；王卓宁等[14]指出EC在吉林省冷涡日区域平均降水预报中具有一定的参考价值，但是对于最大降水量预报整体偏小；姚凯等[15]指出CMA区域模式中，CMA-MESO在吉林省冷涡日大雨以上量级降水的TS评分最优，在不同预报时效预报稳定性及均方根误差的表现方面均优于上海数值预报模式系统（CMA-SH9）和北京快速更新循环数值预报系统（CMA-BJ）两个区域模式。

近年来，降水预报检验的精细化程度不断提高，研究更趋向于分析降水频率、强度等日变化特征[16-18]或逐3 h、逐小时降水预报偏差等降水预报能力[19]。京津冀、山东、川渝、海南等地区均开展了相应的研究[20-22]，并提高了对不同业务模式在不同地区小时预报偏差的认知。研究表明，地形和海拔高度对降水日变化[23]、东北冷涡垂直环流与降水落区[24]、冷涡降水预报效果[15]等方面，均有重要的影响。为此，开展针对暖季东北冷涡背景下小时降水的模式预报检验评估与偏差分析，并讨论其与地形、海拔高度的关系，对于指导暖季东北冷涡降水精细化预报有重要价值与实际意义。

在东北冷涡影响区域中，吉林省受冷涡影响明显，是冷涡活动的高频区[2]与冷涡强降水的频发区之一[5]，同时根据《吉林省天气预报技术手册》[25]，东北冷涡是吉林省四大降水影响系统之一（其他三个分别为切变、台风、地面气旋），研究冷涡降水预报能力有实际业务需求。吉林地区地势分布东高西低，中西部平原平均海拔高度不足200 m，东部长白山脉最高海拔可达2000 m以上，中间为丘陵至山地过渡地带，地势差异明显，高度落差较大。据此，本文以吉林省为研究区域，收集2021—2023年暖季逐小时降水站点观测资料，分析多种业务模式对暖季东北冷涡背景下小时降水的预报偏差及其与地形的联系，以期更好地了解模式预报性能，更有针对性地开展模式预报产品精细化主、客观订正。

1 资料与方法

1.1 冷涡日确定

采用孙力等[26]对东北冷涡的定义，结合降水实况，参照主观识别的方法[27]，从2021—2023年暖季（5—9月）降水事件中选定冷涡降水日146 d（以下简称冷涡日）。

1.2 资料

实况降水选用2021—2023年暖季冷涡日的吉林省逐小时站点降水数据，包括国家气象站与区域自动气象站，总计1436站。该数据从气象大数据云平台获取，经过气候学界限值检查、区域界限值检查、时间一致性检查和空间一致性检查等方法进行质量控制[28]。模式预报场包括业务常用的EC、CMA-GFS两个全球模式，以及CMA-MESO、CMA-BJ、CMA-SH9、中国气象局台风模式（CMA-TYM）四个区域模式，六个模式时空分辨率相关信息详见表1；预报场为对应实况起始时刻前一天20:00起报的12～36 h的逐3 h降水预报。

表1 数值模式相关信息

Table 1 Relevant information of numerical models

	EC	CMA-GFS	CMA-TYM	CMA-MESO	CMA-BJ	CMA-SH9
模式类型	全球	全球	区域	区域	区域	区域
水平分辨率/km	12.5	25	10	3	9	9
预报时效/h	240	240	120	72	48	72
时间分辨率/h	3	3	3	1	1	1

注：EC指欧洲中心中期天气预报模式，CMA-GFS、CMA-TYM、CMA-MESO、CMA-BJ、CMA-SH9分别指中国气象局全球同化预报系统、台风模式、中尺度天气数值预报系统、北京快速更新循环数值预报系统、上海数值预报系统。

参考已有研究[29]，统计吉林省范围内1436站的降水，有效降水定义为3 h内出现0.1 mm以上的降水，降水量（单位：mm）定义为过去3 h内有效降水的累加，降水站次（单位：站次）定义为发生有效降水的站点次数和（如单站在两个时段内发生有效降水或两站在同一时段内发生有效降水均记为2站次），降水量除以降水站次为站次平均降水量（单位：mm）。

此外，根据业务实际情况对逐3 h降水进行分级，定义0.1～10 mm·(3 h)$^{-1}$为弱降水，10～20 mm·(3 h)$^{-1}$为中等强度降水，≥20 mm·(3 h)$^{-1}$的为强降水。

1.3 检验方法

采用分级TS评分、分级偏差评分（Bias）评价模式分级降水预报。采用平均相对误差（MRE）与平均绝对误差（MAE）评价模式定量降水预报。

TS(T_S)与偏差 B_{ias} 评分的定义域分别为 0～1 与 0～+∞，计算分别为[30]：

$$T_S = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C} \tag{1}$$

$$B_{ias} = \frac{N_A + N_B}{N_A + N_C} \tag{2}$$

其中，N_A，N_B，N_C 分别对应命中，空报与漏报站次。T_S、B_{ias} 同时越接近 1 预报效果越优，B_{ias} 大于 1 代表预报空报站次大于漏报站次，误差主要由空报导致，存在湿偏差，反之则说明存在干偏差。在进行检验前，采用临近点插值方法将预报场数据插值到站点上。

平均相对误差 M_{RE} 的计算如下：

$$M_{RE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left| \frac{R_{ob} - R_{fo}}{R_{ob} + R_{fo}} \right| \tag{3}$$

式中，R_{ob} 为实况降水量，R_{fo} 为预报降水量，M_{RE} 取值范围为 0～1，越接近 0 预报效果越好，M_{RE} 考察的是模式预报的相对能力，对小量级降水较为敏感，当实况和预报均同时较小时，即使实况同预报的绝对值差异不大，仍会有较大的 M_{RE}。

平均绝对误差 M_{AE} 的计算如下：

$$M_{AE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left| R_{ob} - R_{fo} \right| \tag{4}$$

式中，M_{AE} 的取值为 0～+∞，越接近 0 预报效果越好，M_{AE} 考察的是模式预报的绝对能力，预报同实况的数值相差越大，则 M_{AE} 越大。

2　冷涡日降水与地形的关系

吉林省的地形自西向东由平原向丘陵山脉过渡，通常东北平原指海拔高度在 0～200 m，因而本文以 200 m 为界并以 200 m 间隔探究冷涡日降水与地形高度的关系。

2.1　实况降水与地形的关系

图 1 展示了 2021—2023 年冷涡日期间，吉林省 1436 个站点在不同海拔高度分组下的站点年平均实况降水量、降水站次及站次平均降水量的小提琴图。小提琴图是箱线图和核密度图的结合，能够直观的得到数据的统计与密度分布以及数据的集中趋势（即核密度主峰）特征。各组样本数及平均值、核密度主峰值信息见表 2。

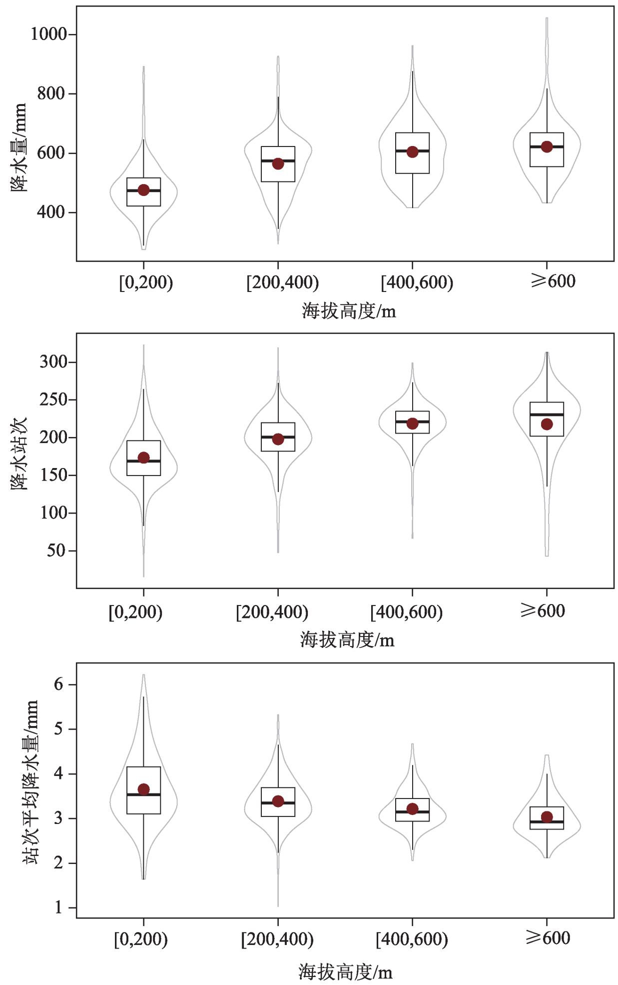

图 1　2021—2023 年冷涡日吉林省 1436 个站点在不同海拔高度分组下的年平均实况降水量(a)、降水站次(b)与站次平均降水量(c)的小提琴图

（图中红色圆点为平均值；箱体自上而下分别代表 75%分位数、中位数与 25%分位数，箱体上下触须分别为上极值与下极值；包络线为样本核密度分布曲线）

Fig. 1　Violin plots depicting the distribution of 3-hourly observed precipitation amount (a), precipitation station counts (b), and precipitation averaged by station counts (c) grouped by different elevation levels in Jilin Province during the cold vortex days from 2021 to 2023

(The red circles represent the mean values; the box spans from the 75th percentile to the median and then to the 25th percentile. The upper and lower whiskers indicate the maximum and minimum values, respectively. The envelope represents the kernel density distribution curve of the samples)

表2　四组地形分组中降水量、站次与强度的年平均值、核密度主峰值统计

Table 2　Average values, peak values of kernel density for precipitation amount, number of precipitation stations, and intensity of different topographic heights

	0～200 m (34.4%)		200～400 m (43.66%)		400～600 m (14.42%)		大于600 m (7.52%)	
	年平均值	核密度主峰	年平均值	核密度主峰	年平均值	核密度主峰	年平均值	核密度主峰
降水量/mm	476.38	470.19	564.89	611.48	604.62	630.83	622.13	631.38
降水站次	173	160	198	200	219	220	218	237
站次平均降水量/mm	3.65	3.36	3.39	3.20	3.22	3.04	3.04	2.83

注:括号中数值表示样本占比。

实况降水同地形高度关系密切,降水量随地形高度的增高逐渐增加,但趋势渐缓(图1a)。0～200 m组的站点降水量统计特征值均明显低于200 m以上的站点,200 m以上的各组降水量统计特征值相差不大。如表2所示,0～200 m组的平均降水量仅476.38 mm,而200 m以上各组的平均值为564.89～622.13 mm,25%分位数、75%分位数、中位数也同样存在明显差异。降水量核密度主峰值(箱体外部包络线的凸起处)以200m为界显示出跃升趋势:0～200 m组站点大多分布在470 mm左右,而200 m以上的三组的降水量核密度主峰均位于610 mm以上。

降水站次同地形高度的关系与降水量类似,即随地形高度增高站次增加,但趋势渐缓(图1b)。0～200 m组与200～400 m组的降水站次平均数相差25站次,高于200 m以上相邻组的平均数差值。0～200 m组的站点核密度分布主峰值约为160站次,同200～400 m组相差40站次,200 m以上的3组核密度主峰均大于等于200站次,且相邻两组之间相差约20站次。

站次平均降水量同降水量与降水站次的分布趋势相反(图1c),即随高度增加站次平均降水量逐渐减弱。各组之间平均相差约0.2 mm,其中0～200 m组与200～400 m组平均相差最大,达到0.26 mm,且该组的25%和75%分位数均大于其他组。

综上,从吉林省暖季冷涡降水观测统计结果来看,海拔200 m以下的站点同200 m以上的站点降水差异明显。

2.2　模式降水预报偏差与地形的关系

以吉林省冷涡日逐3 h降水的站点平均MRE为评价指标,各模式中EC表现最优(MRE为0.82),而后为CMA-TYM(MRE为0.83)和CMA-MESO(MRE为0.85)(图略)。以EC为例,给出了各站点MRE空间分布,误差大值区主要集中在200 m以下的区域(图2a中白色填色),以200 m为界将站点分为两组,站点平均MRE相差可达0.04左右。分析EC的MRE同地形高度之间关系(图2b)发现,海拔高度低于200 m且MRE大于0.85的站点数为184站,占总站数的12.71%,而大于200 m以上且MRE大于0.85的站数为96站,占总站数的

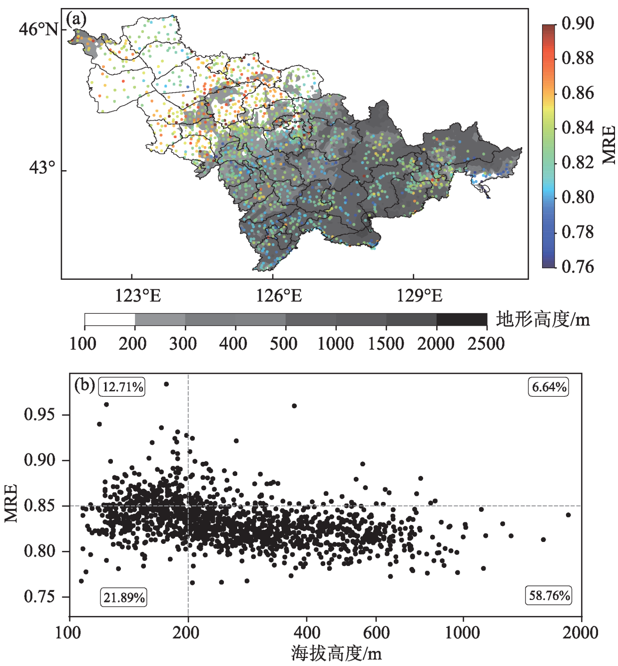

图2　2021—2023年暖季冷涡日EC逐3 h降水预报的平均相对误差(MRE)空间分布(a)以及MRE与地形高度散点分布(b)

(图b中百分比代表由虚线构成的不同框中站点占比)

Fig. 2　Spatial distribution of MRE for the precipitation forecasts from EC during cold vortex days in the warm season from 2021 to 2023 (a), scatter plot of MRE versus elevation (b)

(In Fig. b, the percentages represent the proportion of stations within different categories)

6.64%,两者相差近一倍,说明 MRE 误差较大的站点主要分布在低海拔地区,其他模式也有相似的结论。通过分析 EC 模式预报的 MAE 可知(图略),200 m 以下站点平均的 MAE 为 0.739,200 m 以上站点 MAE 为 0.711,相差达到 0.028,两组中 MAE 大于 0.8 的站点站数比约为 1∶1,并且在 MAE 前 20 位中,有 10 个站点海拔低于 200 m,其中的 8 个站点集中于平原地区的白城北部地区,存在明显的系统性绝对误差大值区,其他站点集中特征不明显。平原地区预报误差较大可能是该地区对流发生发展预报较困难导致,由于没有明显地形影响,平原地区对流触发多为热力因素,而模式对于热对流的发生发展预报同地形动力抬升触发的对流相比,往往存在更大偏差,因此预报效果较差。

综上,MRE 同 MAE 均表明以 200 m 为分界线能够显著的体现地形差异对降水预报能力的影响。因此本文将 200 m 地形高度作为分组指标,将站点分为小于等于 200 m 的平原组与大于 200 m 的山地丘陵组,在此基础上进一步分析两组的降水预报及偏差。

3　降水预报检验

3.1　降水日变化预报检验

图 3 给出了 2021—2023 年暖季东北冷涡降水平原组和山地丘陵组中,实况和预报降水的逐 3 h 降水量、降水站次及站次平均降水量日变化。平原组降水量日变化可见(图 3a),实况为傍晚单峰型,3 h 累计降水量峰值出现在 17:00,为 40.1 mm。EC 降水量预报最接近实况,对降水量峰值预报最优,为 41.0 mm,仅略高于实况。CMA 模式中,CMA-MESO 预报降水量日变化曲线最接近实况;CMA-SH9 与 CMA-BJ 的振幅偏大;CMA-TYM 在 00:00—11:00 预报明显偏小,在 11:00—23:00 同 CMA-MESO 接近;CMA-GFS 各时次降水量均明显偏小,凌晨与傍晚预报峰值相近,没有体现出实况傍晚单峰的变化特征。

从平原组降水站次(图 3b)与站次平均降水量(图 3c)日变化看,实况降水站次日变化不明显,凌晨(02:00)降水站次略高于傍晚(17:00);站次平均降水量日变化为傍晚单峰型,峰值出现在 17:00,这可能与吉林省西部平原有利于东北冷涡午后对流发展有关[31]。EC 降水站次在中午前后(11:00—17:00)预报明显偏高,在 14:00 预报站次达实况的 2.8 倍,是所有模式各个时次中偏差最大的,且其各时次站次平均降水量明显偏低,因而 EC 预报的降水站次与站次平均降水量日变化趋势与峰值对实际业务参考性较低。CMA 模式站次预报中,CMA-MESO 有多个时次均贴近实况,CMA-TYM 变化趋势同实况接近但量级偏大。CMA 模式站次平均降水量预报中,CMA-SH9 与 CMA-MESO 虽然预报的傍晚峰值出现时间晚于实况,但都能够预报出日变化的峰值强度,08:00 之前 CMA-MESO 较 CMA-SH9 的强度预报更优。

从山地丘陵组降水量日变化看(图 3d),实况降水量日变化为双峰型,主峰值位于傍晚 17:00,约为 83.7 mm,副峰值位于清晨 05:00,约为 69.3 mm,出现双峰的区域与峰值时间同前人[32]研究结果基本一致,主、副峰值量级均远高于平原组(图 3a)。各模式对于傍晚峰值量级预报均较好,其中 EC 最优;且清晨峰值也是 EC 预报最优;08:00—14:00 的谷值预报,CMA-MESO 最贴近实况,而 EC 的降水量明显偏高。

山地丘陵组实况降水站次存在一傍晚弱单峰(图 3e),站次平均降水量则为傍晚、清晨双峰型(图 3f)。同平原组一样,EC 对于降水站次与站次平均降水量日变化预报能力有限,08:00—17:00 站次预报明显偏大。CMA 模式站次预报中,CMA-MESO 表现相对较好,能够预报出 23:00—05:00 的降水站次,但是整体变化趋势预报较差,峰值偏大且出现位相提前,11:00—17:00 高估明显;CMA-SH9 变化趋势同实况较为一致,但量级明显偏大。CMA 模式站次平均降水量预报中,CMA-MESO 能够预报出清晨与傍晚的站次平均降水量,但是清晨峰值大于傍晚峰值;CMA-SH9 的站次平均降水量预报趋势同实况较接近,但是主次峰值时间偏晚、各时次强度偏小;其他 CMA 模式均无法预报出站次平均降水量的峰值或变化趋势。

综上,在地形分组的降水日变化预报中,EC 虽然对于降水量的预报较好,但却无法体现站次平均降水量与站次的日变化,14:00 前后存在明显预报误差;CMA-MESO 虽然对降水量略有低估,但是能够预报出不同地形下的站次平均降水量峰值特征;CMA-SH9 对于降水站次与站次平均降水量变化趋势预报较好,但对峰值与位相的预报存在偏差。

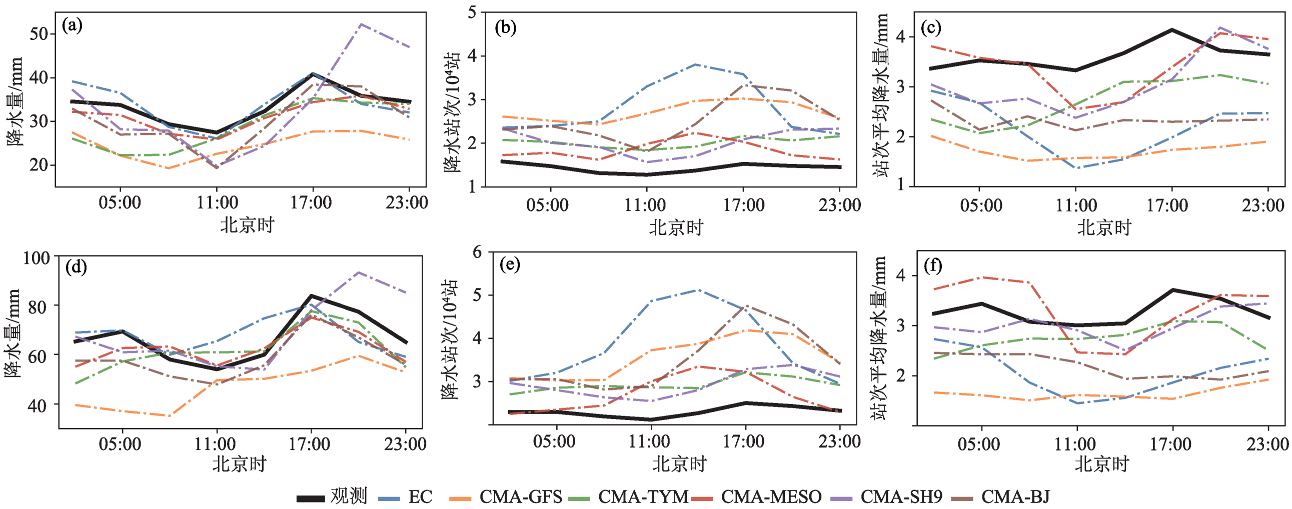

图 3 2021—2023 年暖季冷涡日实况和预报的平原组(a～c)及山地丘陵组(d～f)逐 3 h 降水量、降水站次、站次平均降水量日变化

(EC 指欧洲中心中期天气预报模式,CMA-GFS、CMA-TYM、CMA-MESO、CMA-BJ、CMA-SH9 分别指中国气象局全球同化预报系统、台风模式、中尺度天气数值预报系统、北京快速更新循环数值预报系统、上海数值预报系统,下同)

Fig. 3 Diurnal variation of observed and forecasted three-hour-interval precipitation amount, precipitation station counts, and precipitation averaged by station counts at the plain group (a—c) and hilly group (d—f) during cold vortex days in the warm season from 2021 to 2023

(EC: European Center for Medium-Range Weather Forecasts, CMA-GFS: China Meteorological Administration Global Forecast System, TYM:Typhoon Model, MESO: Mesoscale Model, SH9: South China Mesoscale Model 9, BJ:Beijing Rapid Update Cycle Numerical Forecasting System, the same below)

3.2 逐 3 h 分级降水预报检验

图 4 给出了平原组与山地丘陵组的逐 3 h 尺度降水预报分级 TS-Bias 图,以探究不同模式在两种地形中分级的降水预报,图中的点越接近右上角代表综合预报效果越好(TS 评分更高同时 Bias 更贴近 1)。

两组中各模式对于弱降水(图 4a)的预报 Bias 值均大于 1,存在不同程度空报,EC 在两组中虽然 TS 评分最高,但 Bias 最大,空报最严重,湿偏差明显;CMA-TYM 在 TS 评分略低于 EC 的同时,Bias 更贴近 1,预报效果最好。同一模式在山地丘陵组的综合预报效果优于平原组,具体体现为山地丘陵组的 Bias 均小于同模式在平原组中的 Bias 值(即山地丘陵组空报更少)。

在中等强度以及强降水预报中(图 4b),模式 TS 评分较弱降水下降明显,CMA-MESO 与 CMA-TYM 模式 Bias 数值在这两个强度降水中表现基本一致,接近或者大于 1,预报降水站次存在一定高估。而 EC、CMA-GFS 等全球模式随着降水强度的增加,Bias 由弱降水中的大于 1,变为中等强度中的小于 1,后在强降水中进一步降低为 0.4 左右,漏报愈发明显。除 CMA-SH9 的强降水预报外,同一模式在山地丘陵组中的预报效果仍优于平原组,CMA-MESO、CMA-TYM 等在山地丘陵组中优势明显。综合看来,中等及以上强度的降水预报中,全球模式存在干偏差,CMA-MESO 与 CMA-TYM 预报更具有参考意义。

4 EC 和 CMA-MESO 降水预报偏差分析

本节以 EC 和 CMA-MESO 分别作为全球模式和区域模式的代表,进一步细致分析逐 3 h 分级降水预报,及各个时次预报偏差对预报效果的影响。图 5 给出了两个模式在平原组与山地丘陵组中不同强度降水的逐 3 h TS、Bias、MRE 时钟环形图。

4.1 逐 3 h 弱降水预报

时钟环形图可以清楚地看出 EC 在各时次弱降水预报中均存在湿偏差(图 5a、5c,最外环),山地丘陵组(图 5a)中各时次的 TS 评分均高于或等于平原组(图 5c),且同时 Bias 更小,综合预报效果略优。02:00 与 05:00, EC 在平原组和山地丘陵组的 TS

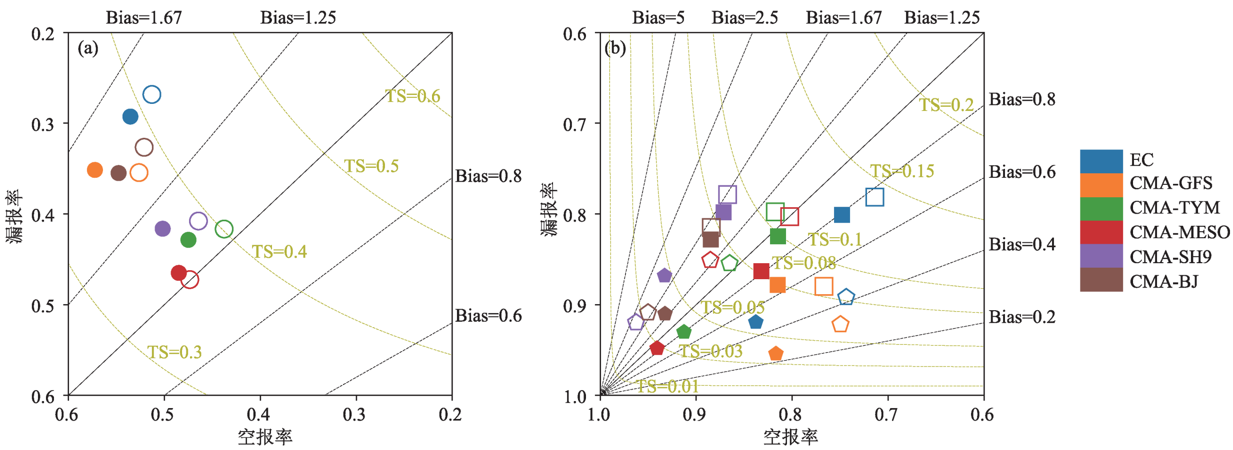

图 4　2021—2023 年暖季冷涡日弱降水(a)、中等降水与强降水(b)模式预报 TS-Bias 综合分析

(图中颜色代表不同模式，图形代表降水强度：圆形为弱降水，方形为中等强度降水，五角型为强降水；空心图形为山地丘陵组，实心图形为平原组)

Fig. 4　Composite analysis of TS-Bias for weak precipitation (a), moderate precipitation, and heavy precipitation (b) from model forecasts during cold vortex days in the warm season from 2021 to 2023.

(In the figure, the color represents different models; the shapes indicate different precipitation intensities: circles for weak precipitation, squares for moderate precipitation, and pentagons for heavy precipitation; hollow shapes represent the hilly group, and solid shapes represent the plain group)

均高于 0.4 且 Bias 较接近 1，是预报效果最好的时段，两组中 TS 和 Bias 评分基本一致，说明该时段的预报与地形关系不大。自 08:00 之后，Bias 开始逐渐增大，直至正午前后(14:00)达到峰值，弱降水空报率偏大明显，这与图 3c 与图 3d 中 EC 预报站次偏差随时间逐渐增大并在正午前后达到极值的趋势一致。14:00—23:00 平原组和山地丘陵组 TS 差异较为明显，其中 14:00—17:00 两组 Bias 评分差异明显，平原组的弱降水站空报明显大于山地丘陵组，湿偏差严重，因此可以认为，该时段弱降水预报差异对图 4a 中 EC 两种地形分组弱降水预报有重要影响，这可能与 EC 不能很好地描述平原组热力触发对流的发生发展有关。

CMA-MESO 逐 3 h 弱降水预报中(图 5b、5d，最外环)，在 23:00—5:00 段预报效果最优，但逐 3 h 预报能力同地形关系不密切。在 11:00—17:00 Bias 大于 1，在 20:00—08:00 Bias 小于 1，说明对白天(08:00—20:00)弱降水易空报，夜间(20:00—08:00)易漏报。同 EC 相比，CMA-MESO 平原组和山地丘陵组的各时次 TS 评分较低。但是在 11:00—17:00，CMA-MESO 的 Bias 更接近 1，预报降水站次与实况更接近。

4.2　逐 3 h 中等降水预报

EC 逐 3 h 中等强度降水预报(图 5a、5c，次外环)同地形分组关系密切，两组中表现不同。山地丘陵组中，EC 误差主要由漏报导致，其在白天(08:00—20:00)TS 评分较高，11:00—14:00 可达 0.15 以上，在夜间(23:00—02:00)TS 明显降低，仅为 0.02 左右。平原组中，14:00、20:00 与 23:00 存在湿偏差，其他时次为干偏差，各时次预报效果相较于山地丘陵组均有下降，主要体现在 TS 评分均较低，特别是出现降水量与降水强度峰值的 17:00 TS 评分仅 0.02，这说明 EC 对平原中等强度降水傍晚峰值的预报能力不足。

CMA-MESO 逐 3 h 中等强度降水预报同地形关系不密切(图 5b、5d，次外环)，两组均为 11:00 TS 评分最高，山地丘陵组 TS 评分在除 11:00 外的多数时刻仅略高于平原组。同 EC 不同，CMA-MESO 的误差基本由空报导致，平原组的空报率高于山地丘陵组。

4.3　逐 3 h 强降水预报

山地丘陵组强降水预报中(图 5a、5b，最内环)，凌晨 05:00 出现了降水量与站次平均降水量的副峰值，该时次 EC 与 CMA-MESO 的 TS 评分均为 0，两个模式都无法正确预报出此峰值，其中 EC 的 Bias 仅为 0.27，说明 EC 对于强降水出现漏报，出现站次预报低估明显；CMA-MESO 的 Bias 为 0.73，预报发生站次更接近实况。两个模式虽然 TS 均为 0，

但原因不同，其中 EC 主要是因为对强降水几乎无预报能力导致漏报严重，而 CMA-MESO 虽然能够预报出强降水事件，但对预报位置存在偏差。对于 17:00 的主峰值，CMA-MESO 对出现站次的预报较 EC 更接近实况，Bias 更贴近 1，TS 评分较高，对傍晚对流降水有一定的预报能力，而 EC 仍出现了十分明显的干偏差。在除峰值外的其他时次，EC 多次出现 TS 评分为 0 且 Bias 较接近 0 的情况，漏报严重；CMA-MESO 的 Bias 则更接近 1，预报站次贴近或多于实况。可见 CMA-MESO 能够更有效的指示出山地丘陵组是否发生强降水。

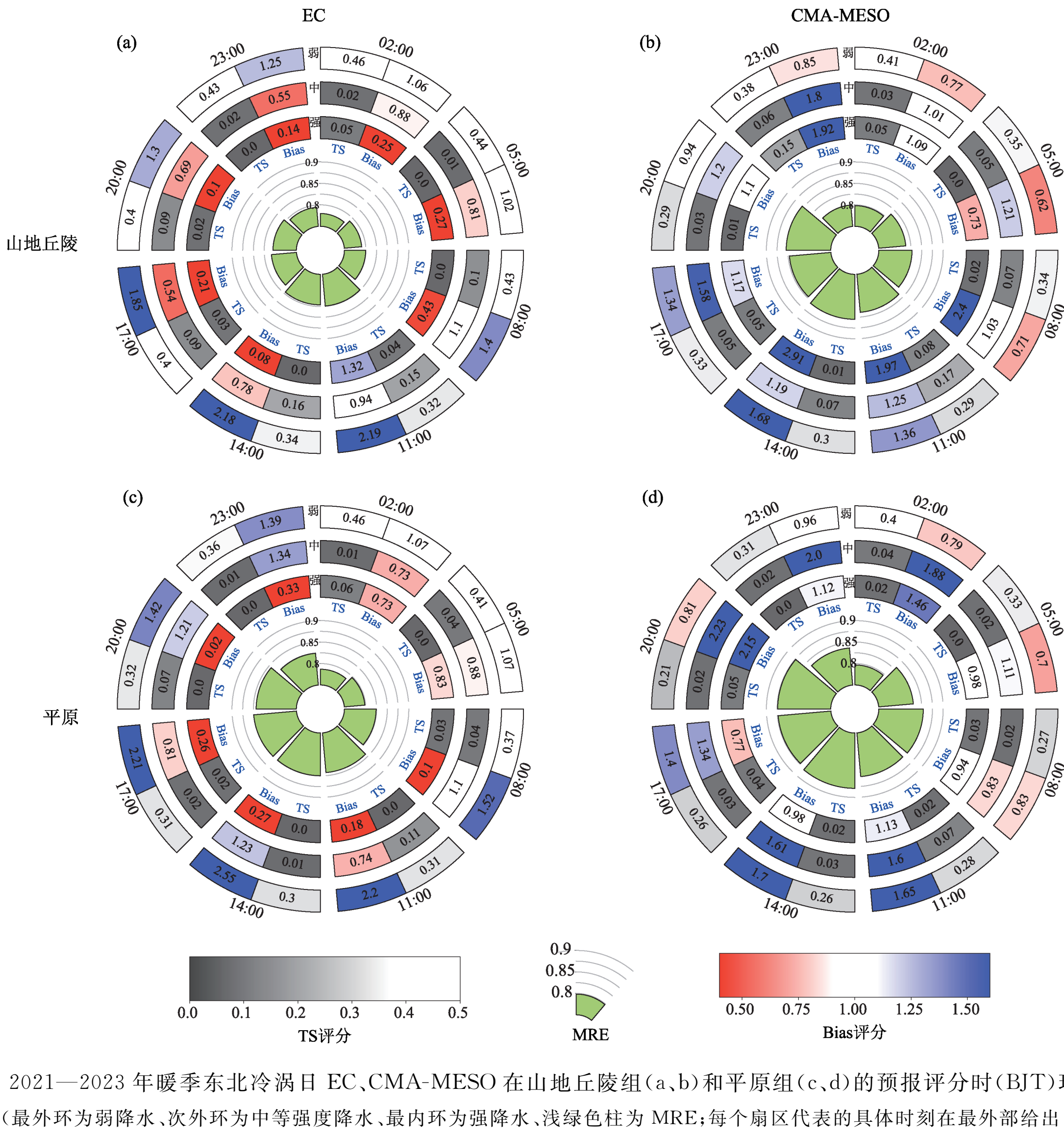

图 5　2021—2023 年暖季东北冷涡日 EC、CMA-MESO 在山地丘陵组(a、b)和平原组(c、d)的预报评分时(BJT)环形图

(最外环为弱降水、次外环为中等强度降水、最内环为强降水、浅绿色柱为 MRE；每个扇区代表的具体时刻在最外部给出，扇区中按顺时针方向分别为 TS、Bias 评分，两者颜色同时越浅预报效果越好)

Fig. 5　Forecast skill clock diagrams of EC and CMA-MESO for the warm season cold vortex days from 2021 to 2023

(a and b represent the hilly and mountainous group, c and d represent the plain group; the outermost ring indicates weak precipitation, the second ring indicates moderate precipitation, and the innermost ring indicates heavy precipitation, with light green bars representing MRE; specific times represented by each sector are indicated on the outermost ring, and the TS and Bias scores are shown in each sector in clockwise order, with lighter colors indicating better forecast performance for both scores)

平原组强降水预报中(图 5c、5d，最内环)，在出现降水量的 17:00，CMA-MESO 的 TS 评分、Bias 评分均优于 EC。在其他时次，EC 对强降水站次的预报均偏少，其中 08:00 和 20:00 的 Bias 几乎为 0，

无法预报出强降水事件。CMA-MESO 有两个时次 TS 评分为 0，较山地丘陵组多 1 次，EC 有 5 个时次为 0，较山地丘陵组多 4 次，可见模式对于 200 m 以下平原地区的强降水预报能力较差。同山地丘陵组类似的是，当 CMA-MESO 的 TS 评分为 0 时，Bias 较接近 1，预报强降水站次接近实况，这说明预报偏差主要由位置偏差导致；而 EC 的 TS 为 0 时，对应的预报站次远低于实况站次，特别是 20：00，Bias 接近于 0，这说明 EC 的预报偏差主要由对强降水事件的漏报导致。

MRE 的日变化（图 5，绿色柱形）表现为同模式在山地丘陵组中的误差低于平原组的误差；两个模式在不同地形分组中均表现为 02：00—5：00 MRE 较小，14：00—17：00 MRE 较大。在 2.2 部分分析中，EC 的区域平均 MRE 表现优于 CMA-MESO，这是因为 EC 在两组地形中逐 3 h 的各时次 MRE（图 5，绿色柱形）均低于 CMA-MESO。此外，CMA-MESO 站点强降水预报出现既空又漏的情况，这导致在计算 MRE 时强降水既有空报站点，又有漏报站点，公式的分子项明显增大，因而中午前后两个模式 MRE 相差较大。

为验证上述结论，选取冷涡出现站次最高的 7 月[2]，并依据《吉林省降雨过程划分业务规定（试行）》，筛选出 2024 年 7 月 3 次冷涡强降水事件（7 月 6 日、8 日以及 17 日）作为验证个例。由三次冷涡日 17：00（平原组与山地组日变化极值时刻）降水实况与模式预报空间分布对比可知（图 6），在弱降水预报方面，EC 的预报范围在所有个例中均大于 CMA-MESO 与实况。具体表现为：7 月 6 日个例中（图 6a），EC 弱降水预报北界较实况更加偏北；7 月 8 日个例中（图 6b），EC 弱降水在吉林中部以及东部范围偏大；7 月 17 日个例中（图 6c），弱降水东界偏东，西界偏西，整体范围偏大。对于强降水预报，7 月 6 日个例中，EC 预报的强降水落区范围明显偏小且偏东，而 CMA-MESO 的强降水落区范围更大，能够预报 127°E 附近的强降水，对 123°E 以及 126°E 附近的强降水预报存在位置偏差。7 月 8 日个例中，EC 与 CMA-MESO 的强降水 TS 评分均为 0，图 6b 显示 EC 无法预报出强降水，因而其 Bias 为 0，CMA-MESO 预报出了零散的、位置偏差较大的强降水落区，Bias 不为 0。在 7 月 17 日个例中，EC 仅预报出了十分有限的强降水落区，而 CMA-MESO 强降水落区较 EC 更大，能预报部分站点的强降水，但是预报位置与实况位置存在偏差。从 MRE 看，7 月6 日个例中，由于 CMA-MESO 预报效果较好，特别是弱降水预报范围同实况十分接近，因此

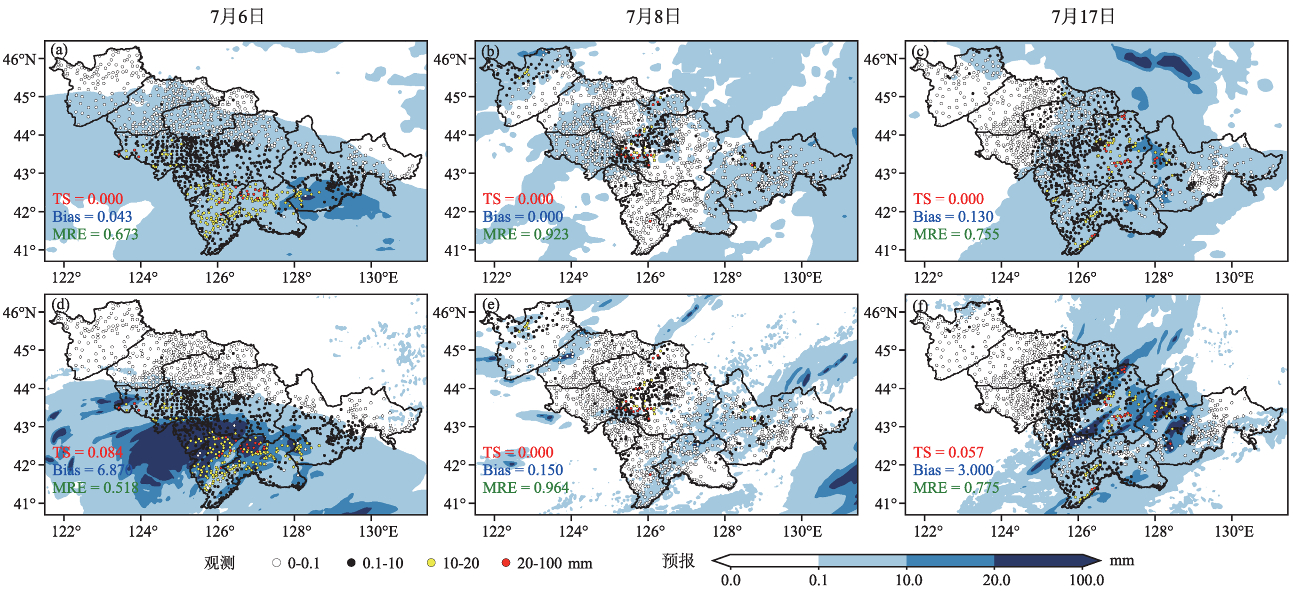

图 6　2024 年 7 月 6 日、8 日以及 17 日 17：00 的过去 3 h 实况降水同 EC（a、b、c）、CMA-MESO（d、e、f）预报降水空间落区分布对比
（其中散点为实况降水、填色为预报降水）

Fig. 6　Comparison of spatial distribution of observation precipitation in the past three hours at 17：00 on 6，8，and 17 July，2024，with the precipitation forecast by EC (a，b，c) and CMA-MESO (d，e，f)
(Scatter points represent observation，and filled colors represent forecast)

其MRE优于EC的MRE，在其他两个个例中CMA-MESO的MRE均大于EC的MRE。由3个个例的对比分析可见，评分得到的结论是可信的。

综合上述结论，可以认为EC对于降水站次与站次平均降水量的预报误差主要由中午至傍晚弱降水的空报和各时次强降水的严重漏报导致，这可能是现阶段全球模式的系统性偏差[33]。降水站次日变化的傍晚正偏差由过多的弱降水空报导致，体现在平面图上为大范围虚假的弱降水落区，预报员可对弱降水进行基于统计方法的消空处理；强降水预报偏差主要由过低的预报站次引起，可以通过频率匹配方法进行订正。CMA-MESO对于不同降水强度站次预报同时实况较为接近，特别是在强降水预报中，预报站次接近或多于实况，CMA-MESO预报误差主要源自强降水预报位置偏差，需要预报员结合相关对流物理量产品进行订正，而位置偏差导致MRE双重计算使其MRE数值在各个时刻，特别是午后，均大于EC对应时刻的MRE数值。

5 结论

本文选取2021—2023年暖季东北冷涡降水，研究了业务常用数值模式在吉林省不同海拔高度的小时尺度降水预报，通过检验对比与偏差分析发现：

(1)暖季东北冷涡模式降水预报同地形分布关系密切。以海拔200 m为界划分的平原组与丘陵山地组对降水统计和模式预报均存在差异，平原组(山地丘陵组)中降水量与站次较少(多)，但站次平均降水量强(弱)，站点平均MRE与MAE较大(小)。

(2)在平原组与山地丘陵组中，EC对于3 h平均降水量的预报误差在六种模式中最小，但中午前后(尤其是14:00)降水站次预报偏高十分明显，对站次平均降水量几乎无预报能力。CMA-MESO与CMA-SH9对降水量日变化预报能力虽不及EC，但能够更好的预报出降水站次与站次平均降水量的日变化峰值或趋势特征。

(3)不同强度降水预报检验方面，弱降水中各模式预报站次较实况偏多，存在湿偏差。对中等及以上强度的降水预报，全球模式存在干偏差，CMA-MESO与CMA-TYM在此强度降水预报更具有参考意义。除CMA-SH9的强降水预报外，各模式的各强度降水在山地丘陵组中的预报效果均优于平原组。

(4)以EC和CMA-MESO为全球模式和区域模式的代表，综合分析两者预报技巧时钟环形图以及2024年个例对比发现，EC中午前后弱降水预报频次偏高是导致该时段预报站次偏多明显的重要原因，EC全天的强降水预报出现站次偏低，在部分时次几乎无法预报出平原组中强降水的出现，预报偏差主要受漏报影响；CMA-MESO强降水预报能力优于EC，对傍晚峰值有预报能力且能够预报出强降水的出现站次，预报偏差主要源于强降水位置偏差。

参考文献

[1] 孙力，安刚，廉毅，等. 夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征的分析[J]. 气象学报，2000，58(6)：704-714. Sun L，An G，Lian Y，et al. A study of the persistent activity of northeast cold vortex in summer and its genral circulation anomaly charecteristics [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)，2000，58(6)：704-714.

[2] 黄丽君，崔晓鹏. 2000—2019年东北冷涡统计特征及其影响期间的降水分布[J]. 大气科学，2023，47(6)：1925-1938. Huang L J，Cui X P. Statistical characteristics of the Northeast China cold vortex and its impact on precipitation distribution from 2000 to 2019 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)，2023，47(6)：1925-1938.

[3] Zhang C，Zhang Q，Wang Y，et al. Climatology of warm season cold vortices in East Asia：1979－2005 [J]. Meteorology and Atmospheric Physics，2008，100(1)：291-301.

[4] 孟庆涛，孙建华，乔枫雪. 20世纪90年代以来东北暴雨过程特征分析[J]. 气候与环境研究，2009，14(6)：596-612. Meng Q T，Sun J H，Qiao F X. Characteristics of heavy rainfall in Northeast China since the 1990s [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese)，2009，14(6)：596-612.

[5] 陈相甫，赵宇. 冷涡背景下东北地区短时强降水统计特征[J]. 高原气象，2021，40(3)：510-524. Chen X F，Zhao Y. Statistical analysis on hourly heavy rainfall in Northeast China induced by cold vortices [J]. Plateau Meteorology (in Chinese)，2021，40(3)：510-524.

[6] 李冬楠，刘星光，高倩楠，等. 一次东北冷涡过程的宏微观物理特征分析[J]. 气象科技，2021，49(2)：227-234. Li D N，Liu X G，Gao Q N，et al. Cloud microphysical characteristic analysis of a northeast cold vortex process [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese)，2021，49(2)：227-234.

[7] 斯琴，荀学义，王佳津. 一次东北冷涡暴雨过程成因分析[J]. 气象科技，2016，44(6)：1016-1023. Si Q，Xun X Y，Wang J J. Formation mechanism of a northeastern vortex rainstorm [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese)，2016，44(6)：1016-1023.

[8] 祁春娟，潘留杰. CMA-GFS模式对东北半球环流形势预报能

力的检验评估[J]. 高原气象，2023，42(2)：483-494. Qi C J，Pan L J. Forecast assessment of CMA-GFS on the meteorological elements in the northeast hemisphere [J]. Plateau Meteorology (in Chinese)，2023，42(2)：483-494.

[9] 曲巧娜，盛春岩，范苏丹，等. 基于 ECMWF 和华东区域中尺度模式的暴雨预报特征研究[J]. 气象科学，2023，43(2)：196-206. Qu Q N，Sheng C Y，Fan S D，et al. Study on characteristics of rainstorm prediction by ECMWF and CMA-SH9 [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)，2023，43(2)：196-206.

[10] 刘帅，王建捷，陈起英，等. GRAPES_GFS 模式全球降水预报的主要偏差特征[J]. 气象学报，2021，79(2)：255-281. Liu S，Wang J J，Chen Q Y，et al. The main characteristics of forecast deviation in global precipitation by GRAPES_GFS [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)，2021，79(2)：255-281.

[11] 漆梁波，徐珺. 豫北"7·9"特大暴雨的短期预报分析和反思[J]. 气象，2018，44(1)：1-14. Qi L B，Xu J. Rethink on short-range forecast of the 9 July severe rainstorm in northern Henan [J]. Meteorological Monthly (in Chinese)，2018，44(1)：1-14.

[12] 张旭，孙宝利，白佳宁，等. 阜新地区东北冷涡多模式降水预报检验[J]. 气象与环境学报，2021，37(3)：19-24. Zhang X，Sun B L，Bai J N，et al. Evaluation of multi-model precipitation forecast of northeast cold vortex in Fuxin [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)，2021，37(3)：19-24.

[13] 于跃，毕明林，阎琦，等. 辽宁区域性大暴雨成因分析及多模式数值预报空间检验[J]. 气象与环境学报，2022，38(4)：11-18. Yu Y，Bi M L，Yan Q，et al. Cause analysis and spatial test of multi-mode numerical prediction on regional rainstorms in Liaoning province [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)，2022，38(4)：11-18.

[14] 王卓宁，陈长胜，王铁岩，等. 东北冷涡背景下 EC-HR 数值预报产品对吉林省降水预报的检验分析[J]. 气象灾害防御，2021，28(1)：15-20. Wang Z N，Chen C S，Wang T Y，et al. Inspection and analysis of EC-HR numerical forecast products on precipitation forecast in Jilin Province under the background of northeast cold vortex [J]. Meteorological Disaster Prevention (in Chinese)，2021，28(1)：15-20.

[15] 姚凯，朱晓彤，杨旭，等. 2022 年夏季 CMA 区域模式东北冷涡降水预报检验评估[J]. 气象灾害防御，2023，30(3)：25-29. Yao K，Zhu X T，Yang X，et al. Inspection and evaluation of northeast cold vortex precipitation forecast in CMA regional model in summer of 2022 [J]. Meteorological Disaster Prevention (in Chinese)，2023，30(3)：25-29.

[16] 朱黎明，张智欣，魏庆伟. 基于 K 均值聚类的中国夏季降水日变化空间分布模式[J]. 气象科技，2021，49(4)：552-560. Zhu L M，Zhang Z X，Wei Q W. Spatial distribution of diurnal rainfall variation in summer over China using K-means algorithm [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese)，2021，49(4)：552-560.

[17] 朱岩，翟丹华，邓承之，等. 綦江流域一次致洪暴雨的夜间突发机制[J]. 气象科技，2025，53(3)：391-404. Zhu Y，Zhai D H，Deng C Z，et al. Analysis of nocturnal enhancement mechanism of a flood-triggering rainstorm in Qijiang basin [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese)，2025，53(3)：391-404.

[18] 沈晓玲，黄海迅，章丽娜. 2010—2019 年浙江暖季短时强降水特征分析[J]. 气象科技，2022，50(1)：103-113. Shen X L，Huang H X，Zhang L N. Characteristics of short-term heavy precipitation in warm season of Zhejiang Province from 2010 to 2019 [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese)，2022，50(1)：103-113.

[19] 陈昊明，李普曦，赵妍. 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，2021，11(3)：155-164. Chen H M，Li P X，Zhao Y. A review and outlook of verification and evaluation of precipitation forecast at convection-permitting resolution [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)，2021，11(3)：155-164.

[20] 钟琦，孙卓，陈昊明，等. 京津冀强降水日变化的多模式预报偏差及成因分析[J]. 中国科学：地球科学，2022，52(9)：1831-1848. Zhong Q，Sun Z，Chen H M，et al. Multi-model forecast biases of the diurnal variations of intense rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Scientia Sinica (Terrae) (in Chinese)，2022，52(9)：1831-1848.

[21] 甘玉婷，陈昊明，李建. 千米尺度数值预报模式对泰山地区暖季降水预报性能的评估[J]. 气象学报，2021，79(5)：750-768. Gan Y T，Chen H M，Li J. Evaluation of the performance of kilometer scale numerical operation forecast model for warm season precipitation forecasting in Taishan region [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)，2021，79(5)：750-768.

[22] 叶茂，吴钲，游婷，等. CMA-SH9 在川渝地区的降水日变化预报效果评估[J]. 高原山地气象研究，2022，42(2)：56-62. Ye M，Wu Z，You T，et al. Evaluation of diurnal precipitation variation forecasts with CMA - SH9 over Sichuan-Chongqing Region [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese)，2022，42(2)：56-62.

[23] 宇如聪，李建，陈昊明，等. 中国大陆降水日变化研究进展[J]. 气象学报，2014，72(5)：948-968. Yu R C，Li J，Chen H M，et al. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)，2014，72(5)：948-968.

[24] 钟水新. 东北冷涡结构特征及其强降水形成机理研究 [D]. 北京：中国气象科学研究院，2011. Zhong S X. Structural features of cold vortex and its formation mechanism of heavy rainfall over Northeast China (in Chinese) [D]. Beijing：Chinese Academy of Meteorological Sciences，2011.

[25] 秦元明. 吉林省天气预报技术手册[M]. 北京：气象出版社，

2014. Qin Y M. Technical manual of weather forecast in Jilin Province (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014.

[26] 孙力，郑秀雅，王琪. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系[J]. 应用气象学报，1994，5(3)：297-303. Sun L, Zheng X Y, Wang Q. The climatological characteristics of northeast cold vortex in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 1994, 5(3): 297-303.

[27] 涂钢，杨旭，李尚锋. 东北冷涡人工分析识别操作手册及活动日历[M]. 长春：吉林大学出版社，2023. Tu G, Yang X, Li S F. Manual for manual analysis and identification of northeast cold vortex and activity calendar (in Chinese) [M]. Changchun: Jilin University Press, 2023.

[28] 任芝花，赵平，张强，等. 适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法[J]. 气象，2010，36(7)：123-132. Ren Z H, Zhao P, Zhang Q, et al. Quality control procedures for hourly precipitation data from automatic weather stations in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 2010, 36(7): 123-132.

[29] 宇如聪，李建. 中国大陆日降水峰值时间位相的区域特征分析[J]. 气象学报，2016，74(1)：18-30. Yu R C, Li J. Regional characteristics of diurnal peak phases of precipitation over contiguous China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2016, 74(1): 18-30.

[30] Hilliker J L. The sensitivity of the number of correctly forecasted events to the threat score: a practical application [J]. Weather and Forecasting, 2004, 19(3): 646-650.

[31] 朱晓彤，姚凯，曲美慧，等. 基于ERA5资料的吉林省东部山区分类强对流预报阈值分析[J]. 气象灾害防御，2021，28(4)：34-39. Zhu X T, Yao K, Qu M H, et al. Threshold analysis of classified strong convection forecast in eastern mountainous areas of Jilin Province based on ERA5 data [J]. Meteorological Disaster Prevention (in Chinese), 2021, 28(4): 34-39.

[32] 朱晓彤，姚凯，涂钢，等. 东北暖季冷涡降水日变化的聚类分析[J]. 气候与环境研究，2024，29(2)：136-144. Zhu X T, Yao K, Tu G, et al. Clustering analyses of diurnal precipitation variations associated with the northeast cold vortex in warm season [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2024, 29(2): 136-144.

[33] 谭政华，陆忠艳，林海峰，等. 2020年辽宁省汛期多模式降水预报评估[J]. 气象与环境学报，2023，39(1)：10-16. Tan Z H, Lu Z Y, Lin H F, et al. Verification for precipitation forecasted by NWP models in Liaoning province during the summer of 2020 [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 2023, 39(1): 10-16.

Analysis of Precipitation Forecast Deviation of Numerical Models over Jilin Province in Warm Seasons under Background of Northeast Cold Vortex

YAO Kai[1] ZHU Xiaotong[2] TU Gang[2] CHEN Changsheng[1] QIN Yulin[1]

(1 Jilin Meteorological Observatory, Changchun 130062; 2 Institute of Jilin Province Meteorological Science, Changchun 130062)

Abstract: Numerical models serve as critical reference bases for weather forecasting. Effective application of numerical models for forecasting first requires understanding the models' forecasting performance, which is derived from verification. This study researches the forecasting capabilities of different numerical models in terms of precipitation associated with the Northeast Cold Vortex in Jilin Province. Utilising hourly precipitation observation data from 1436 stations in Jilin Province during the Northeast Cold Vortex period from May to September 2021—2023, a comparison analysis is conducted between the precipitation forecasting products of six numerical models, namely, EC, CMA-MESO, CMA-GFS, CMA-TYM, CMA-SH9, and CMA-BJ. The aim is to reveal the characteristic differences in forecasting capability and deviation contributions between three-hour-interval precipitation forecasts in plain and hilly areas using quantitative assessment, graded assessment, and diurnal variation forecast comparison. The results indicate that: (1) The observed precipitation associated with the Northeast Cold Vortex and the precipitation forecasting capability of numerical models are closely related to topographic distribution. In the plain group, both the precipitation amount and the number of observation stations are smaller, while the precipitation intensity is stronger, and the mean relative error (MRE) and mean absolute error (MAE) of the stations are larger. In contrast, the hill group shows opposite trends: larger precipitation amount, more station numbers, weaker intensity, and smaller MRE and MAE. (2) EC demonstrates the best performance in forecasting diurnal variations of precipitation in both plain and hilly groups; however, it lacks the ability to predict the peak of precipitation intensities, with a notable overestimation of precipitation frequency occurring around midday. In contrast, CMA-MESO and CMA-SH9 are more effective in capturing the diurnal peak or trend characteristics of precipitation frequency and intensities. (3) The weak precipitation forecasts under various models are overly frequent, while the forecasting capabilities for moderate and heavy precipitation are influenced by topographical differences, where the performance in hilly areas surpasses that in plain areas. Additionally, CMA-MESO and CMA-TYM outperform global models, with global models exhibiting significant dry deviations. (4) The forecasting skill clock plots indicate that the excessive forecast of frequency by EC around midday is mainly due to overforecasting weak precipitation, while the significant underforecast of strong precipitation throughout the day results from missed occurrences. Furthermore, CMA-MESO exhibits stronger forecasting capabilities for heavy precipitation compared to EC, successfully predicting evening peak values and the occurrence of heavy precipitation stations. Its errors arise from location deviation in the forecasts.

Keywords: Northeast Cold Vortex; numerical model; forecast deviation; topography

Received: 2024-10-30　Accepted: 2025-9-28

© Editorial Office of *Meteorological Science and Technology* (CC BY-NC-ND 4.0)