

彭飞,李晓莉,赵滨,等,2022. CMA 全球数值预报系统东亚地区中期大尺度预报误差溯源初步探究:个例分析[J]. 气象,48(6):665-676. Peng F, Li X L, Zhao B, et al, 2022. Preliminary exploration on the origin of large-scale medium-range forecast errors over East Asia in the CMA global numerical prediction system: a case study[J]. Meteor Mon, 48(6):665-676(in Chinese).

CMA 全球数值预报系统东亚地区中期大尺度 预报误差溯源初步探究:个例分析^{*}

彭 飞^{1,2,3} 李晓莉^{1,2,3} 赵 滨^{1,2,3} 陈 静^{1,2,3}

1 中国气象局地球系统数值预报中心,北京 100081

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

3 国家气象中心,北京 100081

提 要: 全球业务数值模式存在偶发的中期预报时效误差极端大的问题,对其溯源可为模式和同化系统改进提供重要参考。分析 2020 年 1—2 月中国气象局高分辨率全球同化预报系统(CMA-GFS)和较低分辨率全球集合预报系统(CMA-GEPS)业务预报在中期时效(6 d)的预报误差,利用集合敏感性分析方法,对东亚地区具有极端中期预报误差的一个个例(2020 年 2 月 8 日 12 UTC 起报)进行了预报误差溯源研究。由 CMA-GFS 预报误差的时空演变特征及基于 CMA-GEPS 系统的集合敏感性分析结果得到了一个关于预报误差关键源区的初步推断,即为位于东亚上游地区的大西洋及欧洲西部地区(20°~90°N, 90°W~60°E)。进而,将 CMA-GEPS 系统控制预报位于上述误差关键源区的初值替换为最优集合成员初值后,预报结果显示东亚地区 500 hPa 位势高度中期预报误差显著减小,不到原预报误差的 50%,这进一步验证了识别出的关键误差源区的有效性。

关键词: 中期预报,误差溯源,集合预报,集合敏感性

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.090601

Preliminary Exploration on the Origin of Large-Scale Medium-Range Forecast Errors over East Asia in the CMA Global Numerical Prediction System: A Case Study

PENG Fei^{1,2,3} LI Xiaoli^{1,2,3} ZHAO Bin^{1,2,3} CHEN Jing^{1,2,3}

1 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Global operational numerical models have the problem of occasional occurrences of extreme large medium-range forecast errors, and tracing these error sources could provide important references for improving the model itself and data assimilation system. In this study, errors of the operational forecasts in medium range (6 days) from the China Meteorological Administration high-resolution global assimilation and forecast system (CMA-GFS) and global ensemble prediction system (CMA-GEPS) with a lower resolution are analyzed during the period spanning from January to February 2020. The error origin for a particular case (initialized on 12 UTC 8 February 2020) with extreme large medium-range forecast errors over East Asia is investigated by employing the method of ensemble sensitivity analysis. From the spatial-

^{*} 国家自然科学基金项目(41905090,41875181)、国家重点研发计划(2017YFA0604502)共同资助

2021 年 3 月 31 日收稿; 2022 年 2 月 7 日收修定稿

第一作者:彭飞,主要从事数值天气预报和集合预报研究. E-mail: pengf@cma.cn

temporal evolution characteristics of forecast errors in CMA-GFS and results from ensemble sensitivity analysis based on CMA-GEPS, a preliminary deduction was acquired about the key forecast error source region, i. e., an up-stream region of East Asia located in the Atlantic Ocean and western Europe (20° — 90° N, 90° W— 60° E). When the initial conditions of the control forecast of CMA-GEPS are replaced with that of the best ensemble member but confined to the above-mentioned key error source region, the medium-range forecast error of 500 hPa potential height was reduced greatly over East Asia, less than 50% of the original control forecast error. This further confirms the effectiveness of the identified key error source region.

Key words: medium-range forecast, the origin of forecast error, ensemble forecast, ensemble sensitivity analysis

引言

近年来,由于资料同化和数值模式本身的不断进步,中期天气预报技巧不断提高(Bauer et al, 2015)。但是,仍旧存在个别个例预报误差很大的情况。这些个例不仅对预报系统的平均预报技巧造成不利影响,而且还会给预报员带来困扰。所以有必要对这些个例进行研究,弄清预报误差的关键源区和演变机制,进而为资料同化或者模式本身改进提供参考(Rodwell et al, 2013)。

已有一些研究对欧洲地区具有极端中期预报误差的个例进行诊断分析。例如, Rodwell et al(2013)使用欧洲地区(35° ~ 75° N, 12.5° W~ 42.5° E) 500 hPa 位势高度场(z_{500}) 6 d 预报距平相关系数(anomaly correlation coefficient, ACC)及均方根误差(root-mean-square error, RMSE)作为中期预报能力指标,把欧洲地区中期预报误差较大的个例(即 z_{500} 的 6 d 预报 $ACC < 0.4$ 且 $RMSE > 60$ m)定义为“forecast busts”或者“drop-outs”,即预报失误,利用 1989—2010 年欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)确定性预报筛选出的 584 个欧洲地区中期预报失误个例,对其进行合成分析。结果表明,这些预报失误通常与欧洲阻塞爆发密切相关,而落基山山脉附近初值准确性及北美地区中尺度对流系统的观测同化与预报对欧洲地区预报失误也具有重要影响。针对 Rodwell et al(2013)识别出的中期预报失误个例, Lillo and Parsons(2017)利用经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)分析对其进行聚类研究。结果表明,这些中期预报失误的出现与引起大尺度环流系统发生转换的 Rossby 波活动

触发和加强有关。

随着集合预报的发展,集合敏感性分析在典型天气系统、高影响天气事件等的预报误差来源和演变分析研究中得到广泛应用(Lamberson et al, 2016; Quandt et al, 2019; 陈涛等, 2019; 代刊等, 2018; 何斌等, 2020; 王毅等, 2018; 2020)。用于度量集合敏感性的方法有多种。例如,可利用集合成员的预报量(如某一地区平均预报误差、EOF 分析主模态的主成分等)与状态量(如风场、位势高度场等)之间的相关系数(或者协方差)进行定义(Zheng et al, 2013; 王毅等, 2018; 2020);也可根据预报能力对所有集合成员进行排序分组,利用不同组之间集合平均的预报差异进行度量(代刊等, 2018; Torn et al, 2015)。该方法具有简单、有效、计算成本低等优点(Torn and Hakim, 2008; Li et al, 2014),能够用于识别预报量关于不同预报时效上状态量的敏感程度和敏感区域,进而有助于找到对预报量具有重要影响的关键天气系统和敏感区域。例如,就造成 2016 年 7 月中下旬华北地区极端降水的黄淮气旋预报来说,代刊等(2018)采用集合敏感性分析揭示了对该气旋中期预报误差具有重要影响的敏感天气系统和区域。陈涛等(2019)通过集合敏感性分析指出江南地区高压、南海高压、华南低槽等关键天气系统的相对强度和位置对广州“5·7”局地特大暴雨过程降水预报具有重要影响。Zheng et al(2013)和 Lamberson et al(2016)分别利用集合敏感性诊断分析影响温带气旋中期预报误差和预报不确定性的关键系统。基于 ECMWF 高分辨率确定性预报和较低分辨率集合预报数据, Magnusson(2017)使用集合敏感性分析对 2014—2016 年出现在欧洲地区的 3 个中期预报失误个例进行误差溯源研究。此外, Magnusson(2017)还根据不同预报时效上的预报误

差(即预报场与分析场之间的差异)空间分布特征从时间上向后对预报误差进行人工追踪溯源。根据人工追踪误差演变和集合敏感性分析结果, Magnusson(2017)得到不同预报失误个例关键误差源区的初步推断, 并利用松弛(nudging)技术(在模式积分过程中把某一关键区域的预报场向其真值逼近, 进而评估该区域对其下游地区预报结果的影响)对识别出的可能关键误差源区进行验证, 从而揭示了结合使用集合敏感性分析和人工追踪误差演变特征这两种方法在识别关键误差源区方面的有效性。

对中国气象局全球同化预报系统(CMA-GFS, 原 GRAPES_GFS; Shen et al, 2020)预报能力的跟踪分析发现, CMA-GFS 同样存在偶发的中期预报误差极端大的问题, 有必要进行误差溯源研究。作为同一个模式体系的中国气象局全球集合预报系统(CMA-GEPS, 原 GRAPES_GEPS; 陈静和李晓莉, 2020; Shen et al, 2020)为使用集合敏感性分析方法进行 CMA-GFS 中期预报误差溯源研究提供了数据和技术基础。本文以东亚地区($15^{\circ} \sim 55^{\circ} \text{N}$, $70^{\circ} \sim 140^{\circ} \text{E}$)中期大尺度环流形势预报误差为关注点, 首先分析了 2020 年 1—2 月 CMA 全球数值预报业务系统的预报误差特征, 随后对在此期间出现的一个具有极端中期预报误差的典型个例, 以东亚地区 500 hPa(z_{500})的 6 d 预报误差为研究对象开展集合敏感性分析, 进行细致的误差演变和溯源诊断分析, 以期得到此次预报极端误差与 CMA-GFS 对具体的大尺度高影响天气系统的预报能力之间的联系, 从而为模式系统及同化初值改进提供客观参考方向。

1 方法和数据

1.1 集合敏感性分析方法

集合敏感性分析方法首先由 Hakim and Torn (2008)提出。对于一个包含 N 个成员的集合而言, 预报量 J 对某一预报时刻状态量 $F_{i,j}$ 的集合敏感性 $S_{i,j}$ 定义如下:

$$S_{i,j} = \frac{\partial J}{\partial F_{i,j}} = \frac{\text{cov}(\mathbf{J}^N, \mathbf{F}_{i,j}^N)}{\text{var}(\mathbf{F}_{i,j}^N)} \quad (1)$$

式中: i, j 分别表示经向和纬向格点坐标, 代表某一空间点; $\mathbf{J}^N$ 和 $\mathbf{F}_{i,j}^N$ 分别表示由所有集合成员的预报量 J 和状态量 $F_{i,j}$ 构成的一维向量, 维数为 N ; cov

表示协方差算子; var 表示方差算子。由定义式可知, 集合敏感性分析方法假设预报量与状态量之间存在线性关系。

对式(1)进行标准化处理, 预报量 J 对某一预报时刻状态量 $F_{i,j}$ 的集合敏感性还可表示为 $R_{i,j}$ (Garcies and Homar, 2009):

$$R_{i,j} = S_{i,j} \times \sigma(\mathbf{F}_{i,j}^N) = \frac{\text{cov}(\mathbf{J}^N, \mathbf{F}_{i,j}^N)}{\sigma(\mathbf{F}_{i,j}^N)} \quad (2)$$

式中: σ 表示标准差算子。标准化后, 敏感性度量 $R_{i,j}$ 与预报量 J 具有相同的量纲, 便于对比预报量对不同状态量的敏感性。

对于给定的预报量, 标准差 $\sigma(\mathbf{J}^N)$ 是不变的。因此, 还可将式(2)所示的集合敏感性等价转化为式(3)所示的相关系数 $C_{i,j}$ (Chang et al, 2013):

$$C_{i,j} = \frac{\text{cov}(\mathbf{J}^N, \mathbf{F}_{i,j}^N)}{\sigma(\mathbf{J}^N)\sigma(\mathbf{F}_{i,j}^N)} \quad (3)$$

本研究利用式(3)所示的相关系数 $C_{i,j}$ 作为集合敏感性分析的关键参数, 从而量化分析预报量对不同预报时效上状态量的敏感性。式(3)所示的相关系数 $C_{i,j}$ 数值越大, 预报量对所考察状态量越敏感; 而相关系数 $C_{i,j}$ 数值大的区域即为预报量关于所考察状态量的敏感区域。

1.2 数据

使用 CMA-GFS 和 CMA-GEPS 业务预报数据开展 CMA-GFS 模式中后期预报误差溯源研究。CMA-GFS 和 CMA-GEPS 预报模式的水平分辨率分别是 0.25° 和 0.5° , 预报时长分别是 10 d 和 15 d。CMA-GEPS 系统包括 31 个集合成员(1 个控制预报和 30 个扰动预报), 采用奇异向量方法表征模式初值不确定性(李晓莉等, 2019; 霍振华等, 2020), 使用随机物理倾向扰动(SPPT)方案和随机动能补偿(SKEB)方案体现模式本身的不确定性(李晓莉等, 2019; 彭飞等, 2019; 2020), 关于该系统其他参数的配置情况可参阅陈静和李晓莉(2020), 这里不再赘述。与 CMA-GEPS 相比, CMA-GFS 提供的是全球高分辨率单一确定性预报结果(HRES)。

本文中预报量 J 选取为 CMA-GEPS 系统每个成员东亚地区平均 z_{500} 的 6 d 预报误差 RMSE, $F_{i,j}$ 选取为不同预报时效上 z_{500} 或者 250 hPa 位势高度场(z_{250}), 并通过式(3)计算集合敏感性, 进而诊断分析 CMA-GFS 模式东亚地区 z_{500} 中期预报误差源。

2 个例选取及其预报误差溯源分析

2.1 2020年2月8日12 UTC起报个例选取

分析了2020年1—2月CMA-GFS对东亚地区 z_{500} 的中期(6 d)预报能力,如图1所示,给出的是HRES东亚地区 z_{500} 的6 d预报均方根误差(RMSE, 蓝实线)以及CMA-GEPS控制预报(CTL)、各成员及集合平均(ENSMEAN)的东亚地区 z_{500} 6 d预报误差RMSE及集合离散度(SPD)。可以看到,不管是高分辨率确定性预报HRES还是低分辨率CMA-GEPS CTL预报,2020年2月8日12 UTC起报的 z_{500} 6 d预报(对应实况时间亦即验证时间为2020年2月14日12 UTC)误差RMSE很大,是整个考察时期内RMSE最大值,为90 m左右,虽然集合平均RMSE略低,但仍高达75 m左右。此外,与该起报时间相应的CMA-GEPS系统 z_{500} SPD也很大,这表明在提前6 d的中期时效上,2月14日 z_{500} 存在较大的预报不确定性。

由图2所示的东亚地区 z_{500} ACC可以看到,起报时间为2020年2月8日12 UTC,HRES、CMA-GEPS CTL及集合平均 z_{500} 6 d预报均已失去技巧(ACC均小于0.6),其中HRES及CTL的ACC较小,约为0.4。

从该个例(起报时间:2020年2月8日12 UTC)6 d预报所对应的2020年2月14日前后的天气实况来看,2月13—16日,有寒潮过程自北向南影响中国中东部地区,造成大范围雨雪和降温,此次寒潮过程与亚洲地区大尺度环流形势密切相关(曹爽等,2020)。14日,中国北部地区($35^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$)平均2 m温度观测值为 -9.8°C ,图3给出了不同起报时间HRES、CMA-GEPS CTL和集合成员对14日中国北部地区平均2 m温度的预报结果以及基于ERA-Interim数据(Dee et al, 2011)得到的该区域2 m温度气候态分布。可以看到,对于提前6 d及以上的预报而言,大部分集合成员及HRES 2 m温度预报高于气候平均态,呈现出中性偏暖的结果,没能捕捉到实际出现的低温天气。而CMA-GEPS系统在8日的预报分布与气候态分布类似,基本没有预报技巧。8日以后预报结果出现转折,CMA-GEPS系统大部分成员和HRES 2 m温度预报低于气候平均态,呈现出冷异常;且距离验

证日期越近,温度预报越低,与观测值更为接近。

综上所述,HRES及CMA-GEPS CTL于2020年2月8日12 UTC起报的 z_{500} 6 d预报在东亚地区存在突出的中期预报误差:HRES及CMA-GEPS CTL z_{500} 6 d预报误差RMSE接近90 m,是整个考察时期内RMSE最大值,而ACC仅约为0.4。上述的大尺度环流形势预报误差是导致在中期时效上HRES及CMA-GEPS CTL对中国北部地区低温天气预报失误的重要原因。此个例符合Rodwell et al (2013)讨论的预报失误的标准,可以作为一个典型的存在极端中期预报误差的事件进行预报误差溯源研究。基于此个例,下文将对CMA-GFS模式东亚地区中期预报误差关键源区进行诊断分析。

2.2 CMA-GFS全球中期预报误差溯源

2.2.1 预报误差时、空演变特征

图4是2020年2月8日12 UTC起报的不同预报时效上HRES z_{500} 预报场、检验分析场及预报误差(预报场减去分析场),该图可用来进行人工追踪误差溯源。从第六天的预报结果来看,亚洲北部地区存在阻塞高压,该阻塞高压前部存在横槽;与检验分析场相比,亚洲北部地区高压预报偏西北且偏强,高压前部横槽预报偏西北,并且没有预报出切断低压(图4f)。这种伴随阻塞环流形势的误差结构可追溯至HRES第二天的预报结果:位于欧洲西部的高压系统预报偏西北且偏强,高压前部低压槽预报略偏西(图4b~4e)。HRES第一天预报结果也存在类似的误差信号,不过不太明显(图4a)。

此外,对CMA-GEPS系统所有成员东亚地区 z_{500} 的6 d预报误差进行了经验正交函数 EOF)分解,以考察集合成员的差异性。图5给出了EOF分解中的第一、第二及第三主模态(解释方差总计为69.7%),可以看出,在6 d预报时效上CMA-GEPS不同集合成员之间的差异主要体现在亚洲北部地区高、低压系统的位置和强度上,即主要与14日位于亚洲北部地区的阻塞环流形势有关(图4f)。

从图1可知,对本文所选个例(与五角星对应)而言,CMA-GEPS系统所有集合成员中,东亚地区 z_{500} 的6 d预报误差RMSE最小为47 m,约是控制预报误差RMSE的一半。根据 z_{500} 的6 d预报误差RMSE对所有成员进行排序,将 z_{500} RMSE最小的成员认定为此次预报的最优集合成员,该成员能够较好地抓住14日出现在亚洲北部地区的阻塞环流

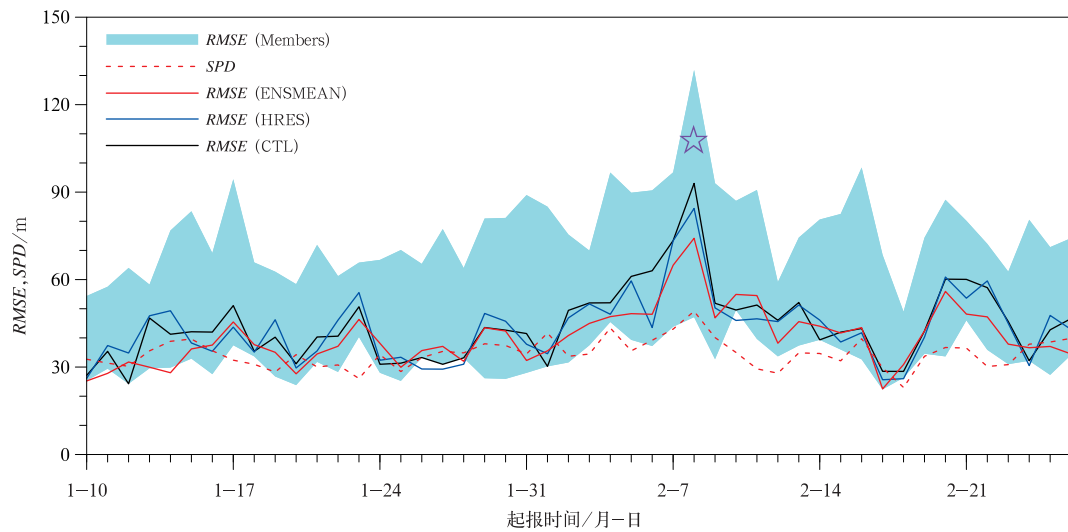


图 1 2020 年 1 月 10 日至 2 月 26 日 12 UTC 起报的东亚地区 ($15^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)

平均 z_{500} 6 d 预报 RMSE 及 SPD 时间序列

(蓝实线: 高分辨率确定性预报 HRES 的 RMSE, 红实线: CMA-GEPS 集合平均的 RMSE, 黑实线: CMA-GEPS 控制预报的 RMSE, 蓝色阴影: CMA-GEPS 所有集合成员的 RMSE, 红虚线: SPD, 五角星: 突显本文研究个例预报结果; 下同)

Fig. 1 Time series of RMSE and SPD of 6 d forecasts for 500 hPa geopotential height (z_{500}) averaged over East Asia ($15^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)

(initialized time: 12 UTC 10 January to 26 February 2020; blue solid line: RMSE for the high-resolution deterministic forecast HRES, red solid line: RMSE for the ensemble mean of the CMA-GEPS, black solid line: RMSE for the control forecast of the CMA-GEPS, blue shaded: RMSE for all ensemble members of the CMA-GEPS, red dashed line: SPD, purple star: highlighting forecast result of the case investigated in this study, the same below)

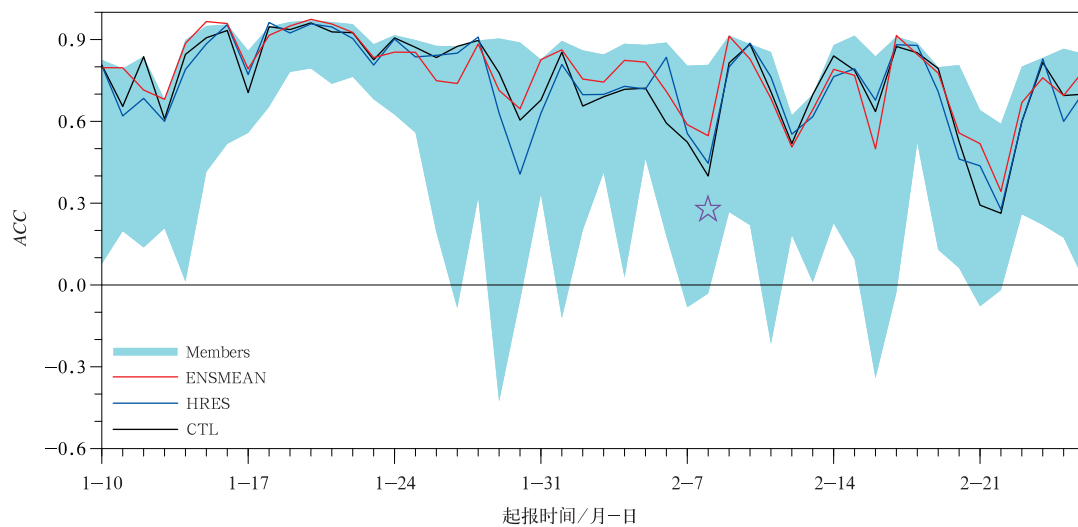


图 2 2020 年 1 月 10 日至 2 月 26 日 12 UTC 起报的东亚地区 ($15^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)

z_{500} 6 d 预报 ACC 时间序列

Fig. 2 Time series of ACC of 6 d forecasts for 500 hPa geopotential height (z_{500}) over East Asia ($15^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)

(initialized time: 12 UTC 10 January to 26 February 2020)

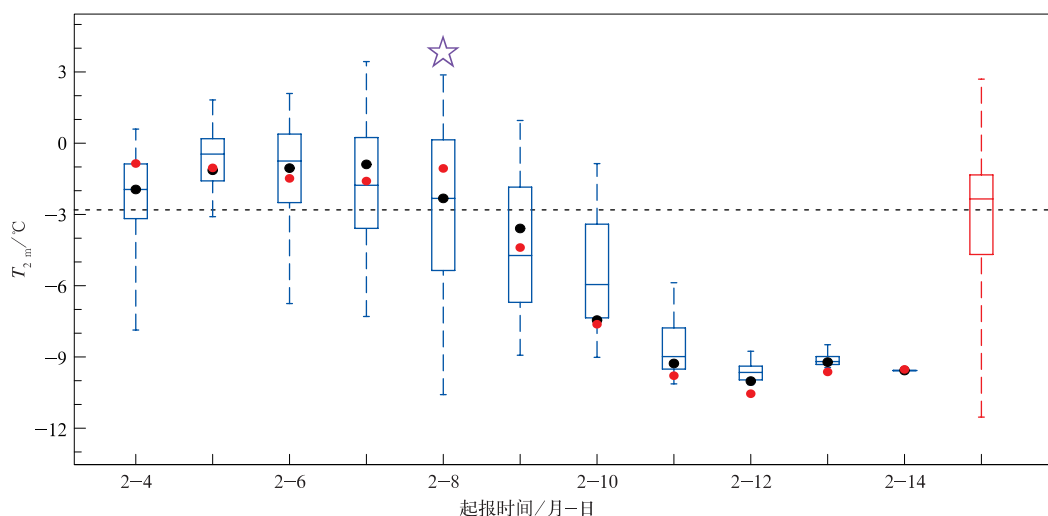


图 3 2020 年 2 月 14 日中国北部地区(35°~42°N, 100°~110°E)平均 2 m 温度预报结果

(红点:高分辨率确定性预报 HRES,黑点:CMA-GEPS 控制预报,蓝色箱线图:

CMA-GEPS 集成员预报分布,红色箱线图:14 日中国北部地区平均 2 m 温度的

气候态分布,黑虚线:气候平均态,该气候态数据来自 1989—2018 年 ERA-Interim 2 m 温度)

Fig. 3 2 m temperature forecasts (T_{2m}) valid on 14 February 2020

averaged over northern China (35°—42°N, 100°—110°E)

(red dot: high-resolution deterministic forecast HRES, black dot: control forecast of the CMA-GEPS, blue box-and-whisker: probability distribution of T_{2m}

for the CMA-GEPS, red box-and-whisker: climatological distribution of T_{2m} in

northern China on 14 February, black dashed line: climatic mean, the climatology of

T_{2m} derived from the ERA-Interim dataset for 1989—2018)

形势,与检验分析场比较接近(图略)。

作为一个能够综合体现大气动力与热力性质的重要物理量,位涡(potential vorticity, PV)已广泛应用于天气系统诊断分析中(王天驹等,2019;张晓红等,2016;Grams et al, 2018; Sánchez et al, 2020)。本文将通过等熵位涡分析,即在等位温面(等熵面)上分析等位涡线,进一步阐明最优集成员在预报关键天气系统方面的优势。等熵坐标中位涡的计算公式为(周小刚等,2014;寿绍文,2010):

$$PV = -g(f + \zeta) \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad (4)$$

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{\frac{R_d}{c_p}} \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度, f 为地转参数, ζ 为相对涡度, θ 为位温, p 为气压, T 为温度, R_d 为干空气比气体常数, c_p 为干空气比定压热容。 $PV=2$ PVU 的等位涡面通常用来表征动力对流层顶,它与 315 K 等熵面的交线(即 2 PVU 等值线)在冬季可用来确定中纬度波导和急流(寿绍文,2010;Grams et al, 2018)。

本文选取 315 K 等熵面上 2 PVU 等位涡线进行诊断分析。图 6 给出了所选个例第一至六天预报的 315 K 等熵面上 PV 集合离散度与最优集成员、集合平均及分析场的 2 PVU 等值线(1 PVU = $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)。可以看到,沿 2 PVU 等值线附近,位涡集合离散度较大,这表明中纬度波导(或急流)预报存在较大不确定性。在第一至六天的预报时效上,与集合平均相比,最优集成员 2 PVU 等值线与检验分析场更为一致(图 6)。这也可能是最优集成员能够在中期预报时效上较好抓住亚洲北部阻塞环流形势的重要原因之一。

2.2.2 集合敏感性分析结果

使用式(3)定义的相关系数进行集合敏感性分析,结果如图 7 所示,为 CMA-GEPS 东亚地区平均 z_{500} 6 d 预报误差 RMSE(预报量 J)与不同预报时效上(第一至六天) z_{500} (状态量 $F_{i,j}$)之间的相关系数,相关系数数值越大,集合敏感性越强,对东亚地区中期预报误差的影响越大,相关系数数值大的区域即为对东亚地区中期预报误差具有重要影响的敏感区域。可以看到,第六天的集合敏感性分析结果

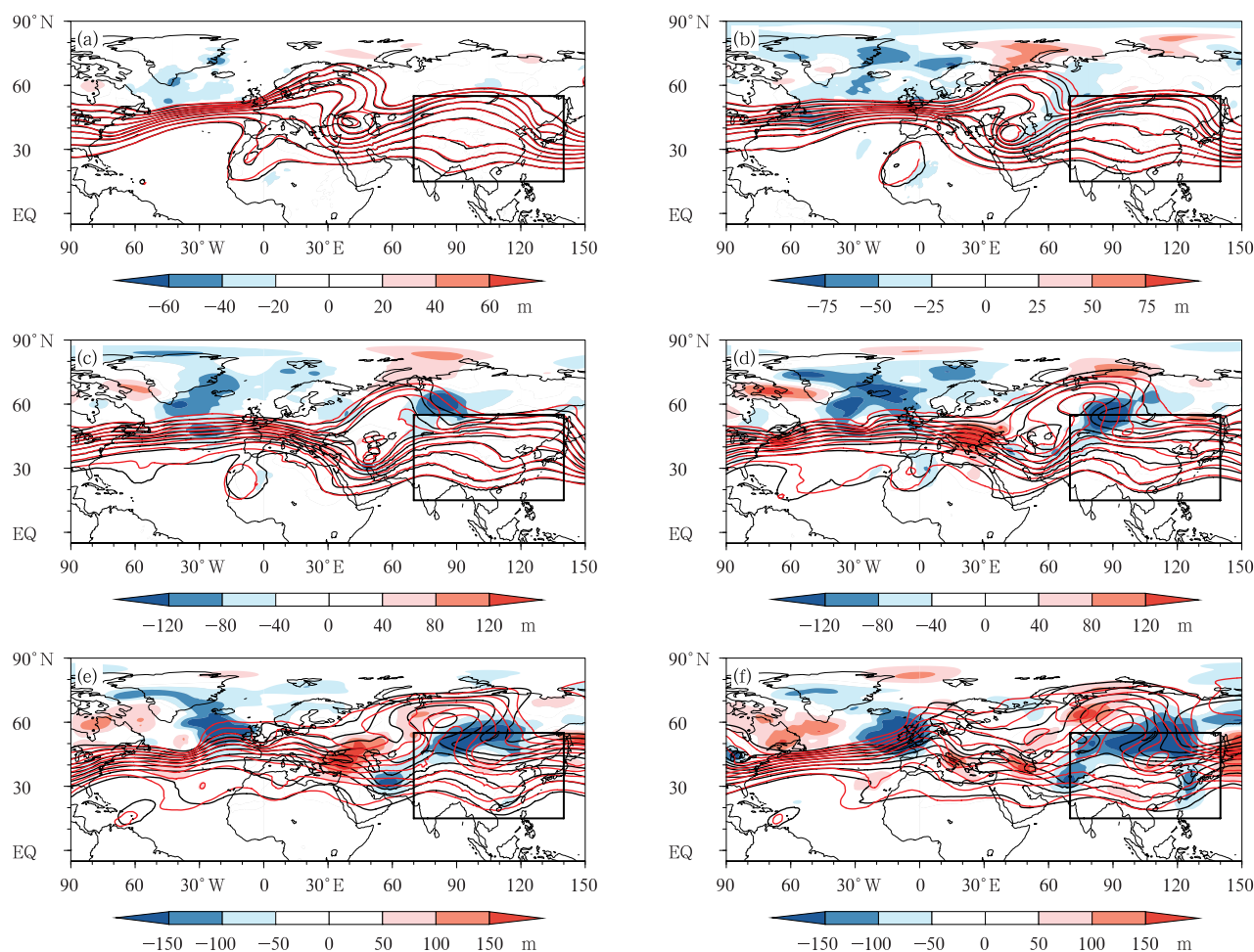


图4 2020年2月8日12 UTC起报的HRES第24 h(a)、48 h(b)、72 h(c)、96 h(d)、120 h(e)和144 h(f) z_{500} 预报场(黑线)及其检验分析场(红线)与预报误差(填色, 预报场减去分析场)
(方框: $15^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 的东亚地区)

Fig. 4 z_{500} forecasts for the HRES (black line), verifying analysis (red line) and forecast errors (colored, forecast field minus analysis field) at different forecast lead times of 24 h (a), 48 h (b), 72 h (c), 96 h (d), 120 h (e), and 144 h (f) (initialized time: 12 UTC 8 February 2020; black box: the region of East Asia)

与HRES第六天 z_{500} 预报误差空间分布很相似, 亚洲北部阻塞环流形势所处位置存在强集合敏感性信号(图4f, 图7f)。而且, 伴随阻塞环流形势的集合敏感性信号可向后追溯至预报的第一天, 位于欧洲西部地区(图7a)。尤其是自预报的第二天起, 位于西风带的高压脊及其附近地区存在明显的强集合敏感性信号(图7b~7f), 此敏感性信号在预报的第二天位于欧洲西部地区, 随着预报时效延长不断向下游传播, 于预报的第六天传播至东亚地区。由上可知, 欧洲西部地区与东亚地区 z_{500} 中期预报误差源区之间存在重要关联。此外, 在1 d的预报时效上,

大西洋地区也存在着较强的敏感性信号。还考察了东亚地区平均 z_{500} 6 d 预报 RMSE 对 z_{250} 的敏感性(图略), 与 z_{500} 的敏感性分析结果一致。

为了进一步诊断分析高纬度环流对东亚地区 z_{500} 中期预报误差的影响, 还使用极射赤面投影方式对基于CMA-GEPS的集合敏感性分析结果进行展示(图略), 发现在第一至第五天的预报时效上, 极涡所处位置(即格陵兰岛附近)均存在较为明显的集合敏感性信号, 此敏感性信号在图7a~7e中也得到了体现, 这说明极涡会对东亚地区 z_{500} 中期预报误差产生影响, 而极涡所在位置也就是格陵兰岛附近区

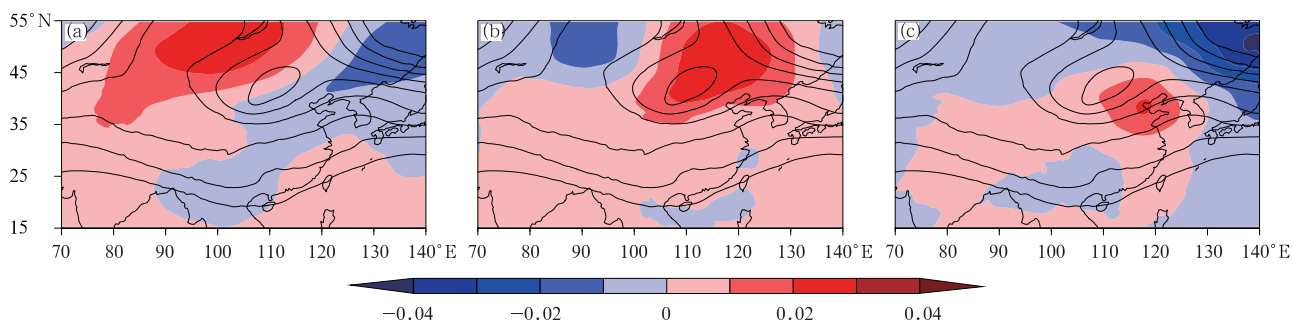


图 5 2020 年 2 月 8 日 12 UTC 起报的 CMA-GEPS 所有集合成员东亚地区(15°~55°N、70°~140°E)
 z_{500} 6 d 预报误差经验正交函数分解的第一模态 EOF 1(a)、第二模态 EOF 2(b)
 和第三模态 EOF 3(c)及 z_{500} 检验分析场(等值线)
 (填色: EOF)

Fig. 5 The leading the first EOF mode (a), the second EOF mode (b), and the third EOF mode (c)
 of the 6 d forecast errors for z_{500} from all members of the CMA-GEPS and verifying analysis (contour)
 (initialized time: 12 UTC 8 February 2020, colored: EOF)

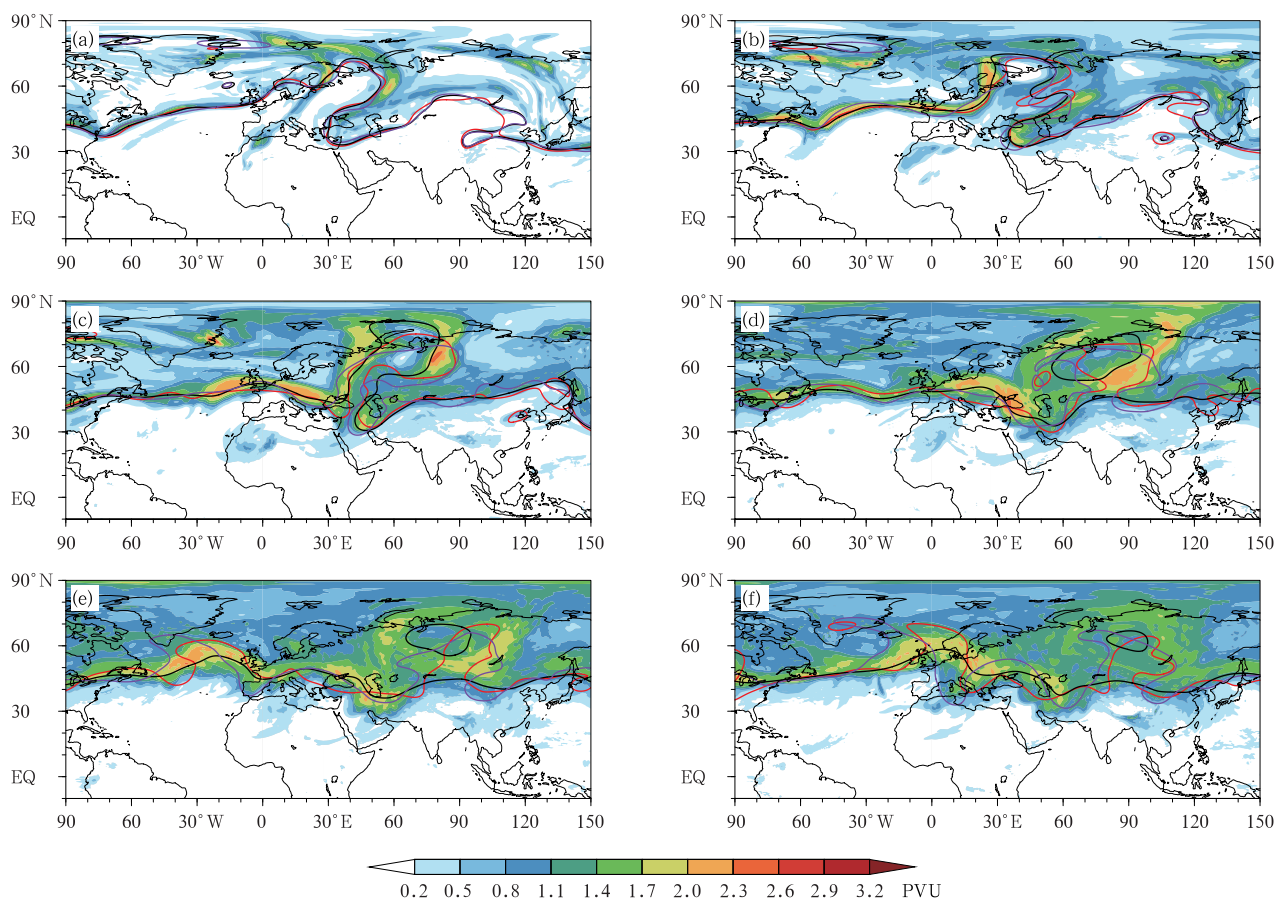


图 6 2020 年 2 月 8 日 12 UTC 起报的 CMA-GEPS 第 24 h(a)、48 h(b)、72 h(c)、96 h(d)、120 h(e)和
 144 h(f)315 K 等熵面上位涡的集合离散度(填色)及 2 PVU 等值线
 (1 PVU= $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, 红线: 分析场, 黑线: 集合平均, 紫线: 最优集合成员)

Fig. 6 Ensemble spread (colored) of potential vorticity for the CMA-GEPS at the 315 K isentropic surface
 and the 2 PVU (1 PVU= $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) contour for the analysis (red line),
 ensemble mean (black line), and best ensemble member (purple line) at different forecast lead
 times of 24 h (a), 48 h (b), 72 h (c), 96 h (d), 120 h (e), and 144 h (f)
 (initialized time: 12 UTC 8 February 2020)

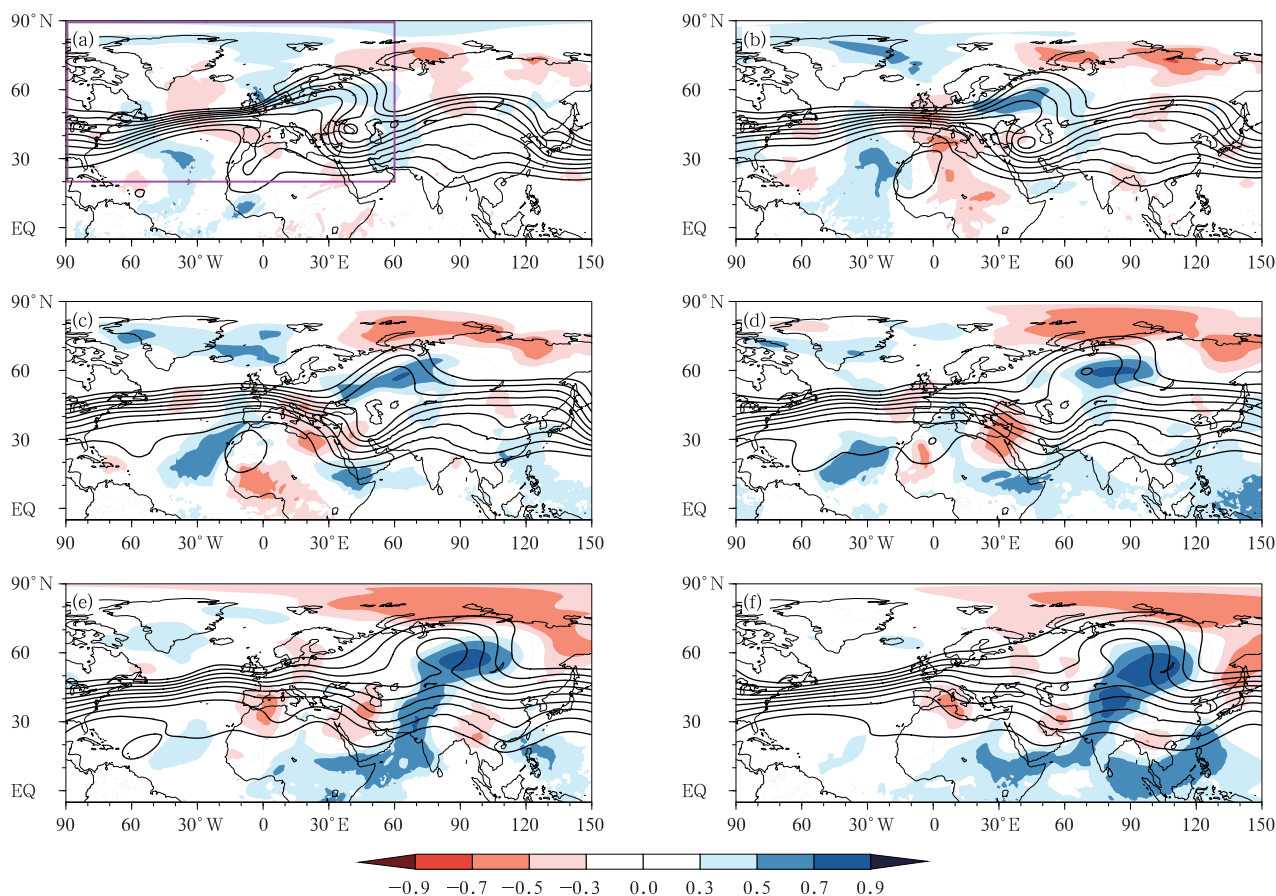


图7 2020年2月8日12 UTC起报的CMA-GEPS东亚地区平均 z_{500} 6 d预报RMSE与不同预报时效上 z_{500} 之间的相关系数(填色)以及 z_{500} 集合平均(等值线,单位:m)
(a)24 h, (b)48 h, (c)72 h, (d)96 h, (e)120 h, (f)144 h
(图7a中,方框:欧洲西部)

Fig. 7 Correlation coefficients between 6 d forecast RMSE of z_{500} over East Asia and z_{500} from the CMA-GEPS (colored) as well as the ensemble mean of z_{500} (black contour, unit: m) at different forecast lead times of 24 h (a), 48 h (b), 72 h (c), 96 h (d), 120h (e), and 144 h (f) (initialized time: 12 UTC 8 February 2020, box in Fig. 7a; western Europe)

域与东亚地区 z_{500} 中期预报误差源区之间存在重要联系。

由HRES z_{500} 预报误差的时空演变特征和基于CMA-GEPS系统的集合敏感性分析结果可初步推断,本文研究个例在中期时效上(6 d)东亚地区 z_{500} 存在的极端预报误差主要与2020年2月14日出现在亚洲北部地区的阻塞环流形势预报不足有关,是由东亚上游地区误差随预报时效延长不断发展并向下游地区传播而引起,误差关键源区可能位于大西洋及欧洲西部地区($20^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ}\text{W}\sim 60^{\circ}\text{E}$;图7a中方框标注区域)。

2.3 替换误差关键源区初值条件的敏感性试验

初步确定本研究关注个例的中期预报误差关键

源区后,进行了替换关键误差源区内初值条件的敏感性试验,以进一步说明识别出的误差关键源区的有效性。具体是在大西洋及欧洲西部地区(图7a中方框标注区域)将CMA-GEPS中控制预报的初值替换为最优集合成员的初值,其他地区控制预报初值保持不变,形成新的控制预报初值,在该初值条件下,重新进行一次2020年2月8日12 UTC起报的控制预报试验。

图8c给出了替换误差关键源区初值条件的CMA-GEPS控制预报中 z_{500} 的6 d预报结果,可以看到这次预报能较好地预报出2月14日出现在亚洲北部地区的阻塞环流形势,东亚地区平均 z_{500} 的6 d预报误差RMSE减小至39 m,不足原控制预报CTL及HRES误差的RMSE的50%(图8a,8b;

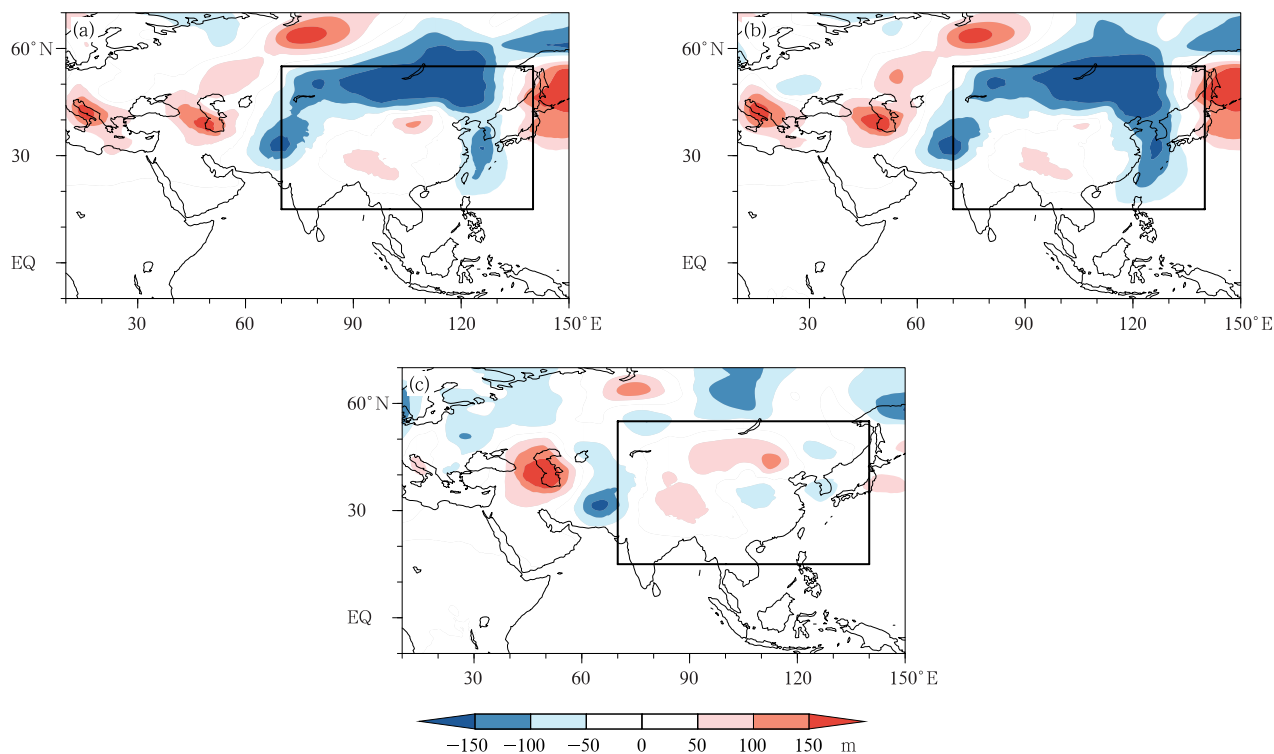


图 8 2020 年 2 月 8 日 12 UTC 起报的高分辨率确定性预报 HRES(a), CMA-GEPS 控制预报(b), 以及仅将控制预报位于误差关键源区的初值替换为最优集合成员初值的新试验方案(c)下 z_{500} 的 6 d 预报误差(填色, 预报场减去分析场)(方框标注区域代表 $15^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 的东亚地区)

Fig. 8 6 d Forecast errors of z_{500} (colored, forecast field minus analysis field) for (a) the high-resolution deterministic forecast HRES, (b) the control forecast of CMA-GEPS, and (c) the new control forecast of CMA-GEPS with initial conditions replaced with that of the best ensemble member but confined to the key error source region [initialized time: 12 UTC 8 February 2020, black box: the East Asia ($15^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)]

图 1)。此外,还开展了改变初值替换范围的试验,将上述推断的关键误差源区沿经度向东平移 60° ,重新进行一次替换控制预报位于误差关键源区初值的敏感性试验,此试验方案下东亚地区平均 z_{500} 6 d 预报误差与原控制预报基本一致,并没有得到改善。

综上所述,就本文选取的预报失误个例而言,位于东亚上游地区的大西洋及欧洲西部地区($20^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ}\text{W}\sim 60^{\circ}\text{E}$)是极为关键的误差源区,并且该区域内初值条件的质量对东亚地区中期预报误差具有重要影响。

3 结论与讨论

本文根据 Rodwell et al(2013)确定的中期大尺度天气预报失误的标准,通过分析 CMA 全球数值预报业务系统(原 GRAPES)2020 年 1—2 月东亚地区 z_{500} 中期(6 d)预报能力,选取了一个东亚地区中

期预报失误个例(2020 年 2 月 8 日 12 UTC 起报个例)。以此个例为研究对象,通过 HRES(即 CMA-GFS)预报误差时空演变特征和基于 CMA-GEPS 系统的集合敏感性分析等,进行所选个例的预报误差溯源诊断及预报研究,得到的主要结果如下:

(1)基于 CMA-GEPS 预报结果的集合敏感性分析可以作为一个有效的诊断技术,用于对 CMA 全球模式中期预报时效上出现的极端误差(预报失误)事件进行误差溯源研究。采用此诊断技术,并结合 z_{500} 预报误差时空演变特征,本文识别出大西洋及欧洲西部地区($20^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ}\text{W}\sim 60^{\circ}\text{E}$)是 2020 年 2 月 8 日 12 UTC 起报的东亚地区 z_{500} 6 d 预报极端误差的关键源区,而且该关键源区内的初值条件质量对东亚地区中期预报效果影响显著。此外,对 CMA-GEPS 的预报结果分析表明,部分集合成员(如最优集合成员)能够在中期时效上较好地预报出导致所选个例极端预报误差的关键天气系统-亚

洲北部阻塞环流形势。

(2) 本文研究个例的东亚地区 $\approx_{500}$ 中期预报误差主要与出现在亚洲北部地区的阻塞环流形势预报不足有关, 这与 Rodwell et al(2013) 研究中指出的欧洲地区中期预报失误个例多与出现在欧洲一大西洋地区的阻塞相关联较为一致。因而, 今后有必要多加关注 CMA-GFS 模式对亚洲地区阻塞形势的中期预报能力。

在未来工作中, 将持续关注 CMA 全球数值预报业务系统东亚地区大尺度环流形势中期预报能力, 选取更多中期预报失误个例, 通过合成分析、聚类分析等方法对 CMA-GFS 模式系统预报性能进行更加深入的诊断分析, 从而为模式系统改进方向提供有用参考。

参考文献

- 曹爽, 何立富, 沈晓琳, 等, 2020. 2020 年 2 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 46(5): 725-732. Cao S, He L F, Shen X L, et al, 2020. Analysis of the February 2020 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 46(5): 725-732(in Chinese).
- 陈静, 李晓莉, 2020. GRAPES 全球/区域集合预报系统 10 年发展回顾及展望[J]. 气象科技进展, 10(2): 9-18, 29. Chen J, Li X L, 2020. The review of 10 years development of the GRAPES global/regional ensemble prediction[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(2): 9-18, 29(in Chinese).
- 陈涛, 孙军, 湛芸, 等, 2019. 广州“5·7”局地突发特大暴雨过程的数值可预报性分析[J]. 气象, 45(9): 1199-1212. Chen T, Sun J, Chen Y, et al, 2019. Study on the numerical predictivity of localized severe mesoscale rainstorm in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 45(9): 1199-1212(in Chinese).
- 代刊, 毕宝贵, 朱跃建, 2018. 2016 年 7 月华北极端降水的中期预报误差分析[J]. 科学通报, 63(3): 340-355. Dai K, Bi B G, Zhu Y J, 2018. Investigation of the medium-range forecast errors for the extreme rainfall event in North China during July 19—20, 2016[J]. Chin Sci Bull, 63(3): 340-355(in Chinese).
- 何斌, 楼茂园, 李海军, 等, 2020. 集合预报对台风天鹅(2015)远距离暴雨的不确定性研究[J]. 气象, 46(1): 15-28. He B, Lou M Y, Li H J, et al, 2020. Research on uncertainty of ensemble forecasts of the far distance torrential rainfall by Typhoon Goni (2015)[J]. Meteor Mon, 46(1): 15-28(in Chinese).
- 霍振华, 刘永柱, 陈静, 等, 2020. 热带气旋奇异向量在 GRAPES 全球集合预报中的初步应用[J]. 气象学报, 78(1): 48-59. Huo Z H, Liu Y Z, Chen J, et al, 2020. The preliminary application of tropical cyclone targeted singular vectors in the GRAPES global ensemble forecasts[J]. Acta Meteor Sin, 78(1): 48-59(in Chinese).
- 李晓莉, 陈静, 刘永柱, 等, 2019. GRAPES 全球集合预报初始条件及模式物理过程不确定性方法研究[J]. 大气科学学报, 42(3): 348-359. Li X L, Chen J, Liu Y Z, et al, 2019. Representations of initial uncertainty and model uncertainty of GRAPES global ensemble forecasting[J]. Trans Atmos Sci, 42(3): 348-359(in Chinese).
- 彭飞, 李晓莉, 陈静, 2020. GRAPES 全球集合预报系统不同随机物理扰动方案影响分析[J]. 气象学报, 78(6): 972-987. Peng F, Li X L, Chen J, 2020. Impacts of different stochastic physics perturbation schemes on the GRAPES global ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 78(6): 972-987(in Chinese).
- 彭飞, 李晓莉, 陈静, 等, 2019. GRAPES 全球集合预报系统模式扰动随机动能补偿方案初步探究[J]. 气象学报, 77(2): 180-195. Peng F, Li X L, Chen J, et al, 2019. A stochastic kinetic energy backscatter scheme for model perturbations in the GRAPES global ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 77(2): 180-195(in Chinese).
- 寿绍文, 2010. 位涡理论及其应用[J]. 气象, 36(3): 9-18. Shou S W, 2010. Theory and application of potential vorticity[J]. Meteor Mon, 36(3): 9-18(in Chinese).
- 王天驹, 钟中, 王举, 等, 2019. 位涡倾向分布与台风 Megi(2010)移动的关系及其影响因子[J]. 气象, 45(6): 791-798. Wang T J, Zhong Z, Wang J, et al, 2019. Correlation between PVT distribution and movement of Typhoon Megi (2010) and the impact factors[J]. Meteor Mon, 45(6): 791-798(in Chinese).
- 王毅, 代刊, 张晓美, 等, 2020. 集合敏感性在预报误差及可预报性研究中的应用进展综述[J]. 气象科技进展, 10(2): 58-64, 74. Wang Y, Dai K, Zhang X M, et al, 2020. Research progress in study of forecast errors and predictability based on ensemble sensitivity[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(2): 58-64, 74(in Chinese).
- 王毅, 马杰, 代刊, 2018. “7·20”华北强暴雨集合预报的中期预报转折和不确定性分析[J]. 气象, 44(1): 53-64. Wang Y, Ma J, Dai K, 2018. Ensemble-based analysis of medium-range forecast change and uncertainty for the 20 July 2016 severe heavy rainfall over North China[J]. Meteor Mon, 44(1): 53-64(in Chinese).
- 张晓红, 罗静, 陈兴, 等, 2016. 一次春季江淮气旋形成发展特征及暴雨诊断分析[J]. 气象, 42(6): 716-723. Zhang X H, Luo J, Chen X, et al, 2016. Formation and development mechanism of one cyclone over Changjiang Huaihe River Basin and diagnostic analysis of rainstorm[J]. Meteor Mon, 42(6): 716-723(in Chinese).
- 周小刚, 王秀明, 陶祖钰, 2014. “等熵思维”到“等熵位涡思维”回顾与讨论[J]. 气象, 40(5): 521-529. Zhou X G, Wang X M, Tao Z Y, 2014. Review and discussion of isentropic thinking and isentropic potential vorticity thinking[J]. Meteor Mon, 40(5): 521-529(in Chinese).
- Bauer P, Thorpe A, Brunet G, 2015. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. Nature, 525(7567): 47-55.
- Chang E K M, Zheng M H, Raeder K, 2013. Medium-range ensemble sensitivity analysis of two extreme Pacific extratropical cyclones[J]. Mon Wea Rev, 141(1): 211-231.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al, 2011. The ERA-Interim

- reanalysis; configuration and performance of the data assimilation system[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137(656):553-597.
- Garcies L, Homar V, 2009. Ensemble sensitivities of the real atmosphere; application to Mediterranean intense cyclones[J]. *Tellus A: Dyn Meteor Oceanogr*, 61(3):394-406.
- Grams C M, Magnusson L, Madonna E, 2018. An atmospheric dynamics perspective on the amplification and propagation of forecast error in numerical weather prediction models; a case study [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 144(717):2577-2591.
- Hakim G J, Torn R D, 2008. Ensemble synoptic analysis[M]//Bosart L F, Bluestein H B. *Synoptic-Dynamic Meteorology and Weather Analysis and Forecasting; A Tribute to Fred Sanders*. Boston: American Meteorological Society:147-161.
- Lamberson W S, Torn R D, Bosart L F, et al, 2016. Diagnosis of the source and evolution of medium-range forecast errors for extratropical cyclone Joachim[J]. *Wea Forecasting*, 31(4):1197-1214.
- Li J, Du J, Zhang D L, et al, 2014. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over Southwest China [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 140(680):766-782.
- Lillo S P, Parsons D B, 2017. Investigating the dynamics of error growth in ECMWF medium-range forecast busts[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 143(704):1211-1226.
- Magnusson L, 2017. Diagnostic methods for understanding the origin of forecast errors[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 143(706):2129-2142.
- Quandt L A, Keller J H, Martius O, et al, 2019. Ensemble sensitivity analysis of the blocking system over Russia in summer 2010[J]. *Mon Wea Rev*, 147(2):657-675.
- Rodwell M J, Magnusson L, Bauer P, et al, 2013. Characteristics of occasional poor medium-range weather forecasts for Europe[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 94(9):1393-1405.
- Sánchez C, Methven J, Gray S, et al, 2020. Linking rapid forecast error growth to diabatic processes[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 146(732):3548-3569.
- Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al, 2020. Research and operational development of numerical weather prediction in China[J]. *J Meteor Res*, 34(4):675-698.
- Torn R D, Hakim G J, 2008. Ensemble-based sensitivity analysis[J]. *Mon Wea Rev*, 136(2):663-677.
- Torn R D, Whitaker J S, Pegion P, et al, 2015. Diagnosis of the source of GFS medium-range track errors in Hurricane Sandy (2012)[J]. *Mon Wea Rev*, 143(1):132-152.
- Zheng M H, Chang E K M, Colle B A, 2013. Ensemble sensitivity tools for assessing extratropical cyclone intensity and track predictability[J]. *Wea Forecasting*, 28(5):1133-1156.

(本文责编:何晓欢)