氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

GRAPES_GEPS模式对2018年冬季欧亚地区500 hPa高压脊形势的预报效果评估

张博 王慧 蔡其发 郑飞

Forecast Assessment of GRAPES_GEPS Model on the 500-hPa High Pressure Ridge in Eurasia in Winter 2018

ZHANG Bo WANG Hui CAI Qifa ZHENG Fei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20109

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

ECMWF集合预报系统对秦岭周边地区降水确定性预报的性能分析

Performance Analysis on Deterministic Precipitation Forecasting in Surrounding Areas of Qinling Mountains by ECMWF Ensemble Prediction System

气候与环境研究. 2017, 22(5): 551 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16150

北京市城六区2018年空气质量数值预报效果评估

Assessment of the Air Quality Numerical Forecast in the Main District of Beijing (2018)

气候与环境研究. 2020, 25(6): 616 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19158

京津冀及其周边地区“2+26”城市PM2.5的蒙特卡罗集合预报试验

Monte Carlo Ensemble Forecast Experiment of PM2.5 in "2+26" Cities in BeijingTianjinHebei

气候与环境研究. 2021, 26(2): 181 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20070

数值天气预报和气候预测的集合预报方法：思考与展望

Ensemble Forecast Methods for Numerical Weather Forecast and Climate Prediction: Thinking and Prospect

气候与环境研究. 2019, 24(3): 396 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18133

基于机器学习的华北气温多模式集合预报的订正方法

A Temperature Correction Method for Multi-model Ensemble Forecast in North China Based on Machine Learning

气候与环境研究. 2019, 24(1): 116 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18049

年一次温带气旋入海爆发性增强时期的集合预报对比分析

Comparative Investigation of Ensemble Forecast of Explosive Cyclone Entering Southern Yellow Sea in Spring 2018

气候与环境研究. 2019, 24(6): 741 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19085

关注微信公众号，获得更多资讯信息

张博, 王慧, 蔡其发, 等. 2021. GRAPES_GEPS 模式对 2018 年冬季欧亚地区 500 hPa 高压脊形势的预报效果评估 [J]. 气候与环境研究, 26(4): 425−437. ZHANG Bo, WANG Hui, CAI Qifa, et al. 2021. Forecast Assessment of GRAPES_GEPS Model on the 500-hPa High Pressure Ridge in Eurasia in Winter 2018 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (4): 425−437. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20109

GRAPES_GEPS 模式对 2018 年冬季欧亚地区 500 hPa 高压脊形势的预报效果评估

张博[1] 王慧[1] 蔡其发[2] 郑飞[3]

1 国家气象中心，北京 100081
2 中国人民解放军 61741 部队，北京 100094
3 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心，北京 100029

摘 要 基于 1979～2017 年（共 39 年）NCEP/NCAR 第一套再分析数据首先对欧亚大陆 500 hPa 持续性高值 [Persistent open ridges and blocking high (maxima) of 500 hPa geopotential height, PMZ] 事件的气候分布特征进行了统计分析，发现欧亚地区冬季 PMZ 事件主要发生在乌拉尔山地区，该地区的 PMZ 事件生命史以 2～3 d 为主，移动距离小于 1000 km。通过对 2018 年冬季发生在鄂霍茨克海地区的阻塞形势检验得出，GRAPES（Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System）和 ECMWF（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）确定性模式在中短期时效对偏强阻塞形势有较好的预报能力，且 ECMWF 模式预报性能优于 GRAPES 模式，而对弱阻塞形势预报两家模式均不理想。随后针对 GRAPES 全球集合预报系统 (GRAPES-GEPS) 和 ECMWF 集合预报对 2018 年冬季欧亚地区 PMZ 事件的预报能力开展细致评估，结果表明 GRAPES-GEPS 控制预报在中期时效预报效果相对短期时效明显偏差，集合预报伴随预报时效临近更多的集合成员可预报出与零场接近的 PMZ 事件。ECMWF 在短期时效预报效果明显由于 GRAPES-GEPS，但随着预报时效延长，预报效果显著降低。对于 2018 年 12 月 25～31 日的 PMZ 事件，GRAPES_GEPS 各集合成员在延伸期时效给出预报信息，随预报时效临近，集合成员预报成功率明显增加，但与零场相比 PMZ 事件维持时间较零场偏短、高压脊强度较零场偏弱。本文给出了中期延伸期时效 GRAPES_GEPS 对 PMZ 事件的冬季预报能力，以期未来能为中期延伸期阻塞形势预报提供参考。

关键词 阻塞 GRAPES_GEPS 模式 ECMWF 模式 确定性模式 集合预报 中期延伸期 评估
文章编号 1006-9585(2021)04-0425-13 **中图分类号** P456.2 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20109

Forecast Assessment of GRAPES_GEPS Model on the 500-hPa High Pressure Ridge in Eurasia in Winter 2018

ZHANG Bo[1], WANG Hui[1], CAI Qifa[2], and ZHENG Fei[3]

1 *National Meteorological Center*, *Beijing* 100081
2 61741 *Troops*, *People's Liberation Army of China*, *Beijing* 100094
3 *International Center for Climate and Environment Sciences*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

收稿日期 2020-08-25；**网络预出版日期** 2021-03-15
作者简介 张博，女，1981 年出生，博士，主要从事中期天气预报及诊断评估工作。E-mail: zhangb81@yeah.net
通讯作者 王慧，E-mail: wangh1@cma.gov.cn
资助项目 国家自然科学基金青年基金项目 41905091，国家气象中心预报员专项课题 Y201904，国家重点研发计划重点专项 2018YFC1506904
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41905091), Special Project of National Meteorological Center (Grant Y201904), National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC1506904)

Abstract The presence of a 500-hPa geopotential height region represents a high-pressure ridge or anticyclone that will cause a rise in ground pressure, which then leads to extreme disaster weathers such as a cold wave or high-temperature heat wave. Most of the existing methods in identifying the blocking system are to study the closed blocking high, but some studies have shown that the existence of the open high-pressure ridge can also lead to the emergence of heat waves and cold events. Based on a recently developed approach that can effectively recognize both persistent blocking and ridge events, the characteristics of persistent open ridges and blocking high (maxima) of 500-hPa geopotential height (PMZ) events in Eurasia are investigated. The climatological distribution characteristics of PMZ events reveal that the winter PMZ in Eurasia mainly occurred in the Ural Mountains area. The life history of PMZ events in this area is mainly 2–3 days with a moving distance of less than 1000 km, which has the characteristic of stability. The blocking test mainly focused on the prediction techniques of blocking high. By examining the blocking situation in the Okhotsk Sea in the winter of 2018, it is concluded that the strong blocking situation can be predicted by GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System) and ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), with the ECMWF performing better than the GRAPES. However, there are obvious errors as far as the weak blocking situation is concerned. This paper focuses on the diagnosis and analysis of the maintenance time and the moving path of PMZ events. The prediction ability of GRAPES_GEPS control and the ensemble forecast for the PMZ events in the Northern Hemisphere from 19 Dec 2018 to 28 Feb 2019 are then verified. Most PMZ events in winter 2018 occurred in Eurasia in the west of Lake Baikal between 40°N and 60°N. PMZ events occurred most frequently in Jan 2019 in Eurasia compared to the months of Dec and Feb, with a total of nine events. As far as the PMZ events are concerned, the medium-term control forecast provides better results than the short-term control forecast. Moreover, the ensemble forecast is better than the control forecast, wherein more ensemble members are able to predict PMZ events close to the zero field with the forecast time effect approaching. However, the prediction ability of the control prediction model for PMZ events in winter is not very good. For the PMZ event on 25–31 Dec 2018, the GRAPES_GEPS ensemble model provides the forecast signal in the extension period. As the forecast period approaches, most members give an effective forecast. However, the maintenance time forecast is shorter and the intensity of the high-pressure ridge is weaker than those of the actual situation. At present, the numerical assessment of the medium and extended range forecast on the general circulation system is mostly on the traditional test scores, and the main weather systems that affect the weather and climate anomalies in China lack a tracking and testing technology. In this paper, the PMZ prediction ability of GRAPES_GEPS for the extended range in winter is given, which can provide a reference for the extended range forecast blocking situation in the future.

Keywords Blocking situation, GRAPES_GEPS model, ECMWF model, Deterministic model, Ensemble forecast, Middle and extended range, Assessment

1 引言

阻塞高压（叶笃正等, 1962）是中高纬度地区最重要的大气环流持续性异常现象之一，其生成、维持和崩溃与大气环流的剧烈变化相联系。伴随研究的深入，学者发现阻高系统在冬春季节可造成大范围的寒潮天气（Cattiaux et al., 2010; Buehler et al., 2011; Pfahl and Wernli, 2012; 叶培龙等, 2015; Brunner et al., 2017），而在夏季则可带来持续性高温热浪事件（Matsueda, 2011）。欧亚地区的阻塞形势对中国夏季大范围持续性异常天气有着极其重要的影响，阻塞形势的维持可导致大范围旱涝天气的出现（毕慕莹和丁一汇, 1992; 吴国雄等, 1994; 张庆云和陶诗言, 1998; 陆日宇和黄荣辉, 1999; 顾伟宗等, 2016; 于淑秋和林学椿, 2006）。目前国际上定义阻塞高压指数的方法有 500 hPa 位势高度的正距平及位涡负距平方法（Dole, 1978）、LejenÄs and Økland（1983）提出又经 Tibaldi and Molteni（1990）改进的高度场方法、Pelly and Hoskins（2003）提出用位涡面上的位温经向差来构造阻高指数及 Rex（1950）提出的环流型方法。利用不同的阻高定义方式，北半球阻塞系统分布的气候学特征被广泛研究（Barriopedro et al., 2006; Diao et al., 2006; Tyrlis and Hoskins, 2008; Small et al., 2014; Shi et al., 2016）。在闭合性阻塞系统对天气气候产生影响的同时，研究也发现在一定条件下 500 hPa 开放性高压脊同样也可引发例如欧洲 2003 年 8 月初的极端高温热浪事件（Black et al., 2004）和东亚地区的冷

事件（Bueh and Xie, 2015）。为了了解当持续性高压脊和闭合性阻塞高压在时间和空间上均为相邻状态，而作为同一事件被识别和追踪时，二者之间存在的统计特征有何不同？Liu et al.（2018）开发了追踪 500 hPa 持续性高值事件算法，该算法既包含传统的阻塞高压又囊括了持续性开放式高压脊的信号，并分析了北半球 500 hPa 持续性高值系统的统计特征，与发生在北美及欧洲的灾害性事件进行对比分析。

以往的阻塞检验主要是针对阻塞高压的预报技巧（王毅等, 2014; 周宁芳和贾小龙, 2018），而本文则结合定量化阻塞高压指数和持续性高值事件的维持时间及移动路径开展数值模式性能的检验分析。文章首先基于 Liu et al.（2018）开发的 500 hPa 持续性高值事件追踪方法，利用 1979～2017 共 39 年 NCEP/NCAR 第一套再分析数据分析欧亚地区持续性高值事件的气候学分布特征。随后借助阻塞高压指数评估了 GRAPES 和 ECMWF 确定性模式对 2018 年阻塞形势的预报能力，检验 GRAPES 全球集合预报系统（GRAPES-GEPS）和 ECMWF 集合预报对 2018 年冬季持续性高值事件的预报性能，并对 2018 年 12 月底发生在我国寒潮过程的中期延伸期预报效果开展评估，以获取 GRAPES_GEPS 和 ECMWF 集合预报对冬季持续性高值事件的综合预报能力。

2 资料和方法

2.1 资料

本文所用的资料包括：1）1979～2017 年 NCEP/NCAR 第一套逐日再分析资料（Kalnay et al., 1996）中 500 hPa 高度场资料，水平分辨率为 2.5°（纬度）×2.5°（经度）；2）GRAPES（沈学顺等, 2017）和 ECMWF 确定性模式 12:00（协调世界时，下同）起报的 500 hPa 高度场资料，水平分辨率为 2.5°（纬度）×2.5°（经度）；3）GRAPES 全球集合预报系统（GRAPES-GEPS）和 ECMWF 集合预报（Molteni et al., 1996）12:00 起报 500 hPa 高度场资料，GRAPES-GEPS 集合成员 30 个（包含控制预报为 31 个）、ECMWF 集合成员 50 个（包含控制预报为 51 个）。由于模式输出产品的限制，文章分析时段为 2018 年 12 月 19 日至 2019 年 2 月 28 日，共计 72 d。

全球集合预报系统（GRAPES-GEPS）由中国气象局数值预报中心于 2010 年启动开发，至 2018 年 12 月正式业务化运行以替代 T639 全球业务集合预报系统，初值扰动（霍振华等, 2018; 李晓莉等, 2019; 李晓莉和刘永柱, 2019）采用奇异向量（Singular vectors, SVs）技术，模式采用随机物理扰动（Stochastically Perturbed Parameterization Tendencies, SPPT）方案及随机动能补偿（Stochastic Kinetic Energy Backscatter, SKEB）方案（彭飞等, 2019）。集合成员 31 个（包含控制预报 1 个，扰动成员 30 个），模式分辨率 50 km，预报时长 15 d。通过 2016 年冬季一个月（11～12 月）的集合预报试验，并与同时段业务 T639_GEPS 的结果进行对比，试验结果表明，GRAPES_GEPS 的集合平均误差和离散度增长关系较好，全面优于 T639_GEPS。

2.2 高度场持续高值系统识别算法

对于 500 hPa 高度场持续高值事件（简称为 PMZ 事件，Persistent open ridges and blocking high (maxima) of 500-hPa geopotential height, PMZ）检验的方法采用的是 Liu et al.（2018）所开发的 500 hPa 持续性高压脊及阻塞高压系统追踪方法。追踪 PMZ 事件的步骤和标准如下：首先，识别 500 hPa 高度场局地扰动异常最大值的中心位置，且要求与之相邻格点的位势高度均大于 100 gpm，与最大值之差小于 20 gpm；对同一个持续性高值事件而言，相邻两个时次涡度距平中心区至少存在一个交叉的网格点，且相邻两天的中心位置移动距离小于 10 个经度；持续性高值事件可维持 4 d 或者更长时间，直至无连续中心，持续天数达到 2 d 也可满足标准。

2.3 高度场持续高值核心区移动路径分类方法

本文对 PMZ 事件核心移动路径进行了简单分类。通过计算事件发生初始日与结束日的相对方位，将移动路径分为 8 个方向（正东方向为 0°，正北方向为 90°）：东东北（0°～45°）、北东北（45°～90°）、北西北（90°～135°）、西西北（135°～180°）、西西南（180°～225°）、南西南（225°～270°）、南东南（270°～315°）、东东南（315°～360°）。

2.4 集合预报命中概率检验方法

文中采用的集合预报命中概率检验方法，即是以模式零场识别的 PMZ 事件某一时刻位置为中心，计算该点周围有效半径（本文有效半径选为 400 km）

内集合成员占总成员的比例即为集合预报命中概率。

此外，文中短期时效在预报业务中是指时效在 3 d 以内的预报；中期时效指未来 3 d 以上到 10 d 以内的预报；延伸期时效是指 11 d 以上到 20 d 以内的预报；中期延伸期在预报业务上指 3 d 以上到 20 d 以内的预报。

2.5 阻塞高压定义

阻塞高压指数的定义采用 Tibaldi and Molteni（1990）的方法，该指数计算较为简便且易于被业务监测部门使用（李威等, 2007; 王前等, 2017）。

对每个经度，南 500 hPa 高度梯度（geopotential height gradients of middle latitudes，GHGS）和北 500 hPa 高度梯度（geopotential height gradients of high latitudes，GHGN）计算如下（Tibaldi and Molteni, 1990; 李威等, 2007）：

$$\mathrm{GHGS} = \frac{Z(\Phi_0) - Z(\Phi_s)}{\Phi_0 - \Phi_s}, \quad (1)$$

$$\mathrm{GHGN} = \frac{Z(\Phi_n) - Z(\Phi_0)}{\Phi_n - \Phi_0}, \quad (2)$$

其中，Z 代表位势高度，Φ_n= 80°N+δ，Φ_0= 60°N+δ，Φ_s= 40°N+δ，计算梯度的纬度插值 δ=−5°, 0°, 5°。

对某时某经度任意一个δ值，如果条件同时满足 1）GHGS>0 和 2）GHGN<−10 m/纬度，则诊断为该时该经度有阻塞，阻塞指数为 GHGS。当有两个以上的δ值同时满足 1）和 2）两个条件时，则取 GHGS 值大者为阻塞指数。

3 PMZ 事件的气候分布特征

图 1 给出 1979～2017 年欧亚地区春、夏、秋和冬季 PMZ 事件发生格点的频率分布，由图可见乌拉尔地区（60°E～90°E）PMZ 事件年均发生频率最高、贝加尔湖其次、鄂霍茨克海地区发生频率最低，这一结果与李艳等（2010）采用 PV-θ 阻塞高压指数计算 3 个关键区阻塞高压发生频率相同。乌拉尔地区 PMZ 事件在春季（图 1a）和冬季（图 1d）发生的频率较夏季（图 1b）和秋季（图 1c）有明显升高，该地区夏季为 PMZ 事件发生频率最低的季节。而对于远东地区而言，夏季该地区 PMZ 事件发生频率超过 4%，且从贝加尔湖向东延伸至 140°E 附近，春季、秋季和冬季远东地区 PMZ 事件罕有发生。冬季乌拉尔山附近 PMZ 事件的维持时间和出现位置与我国寒潮天气过程密切相关，而远东地区夏季 PMZ 事件的发生则与我国长江中下游夏季尤其是 8 月降水异常有很好的相关关系（Zhang et al., 2019）。

为了更好地了解乌拉尔山地区冬季 PMZ 事件的气候特征，从 PMZ 事件的生命史、移动距离、移速及移动方向进行了统计分析。乌拉尔山地区冬季发生的 PMZ 事件生命周期最高频率为 2～3 d，超过 4 d 约占近 30%，最长生命周期可达 10 d

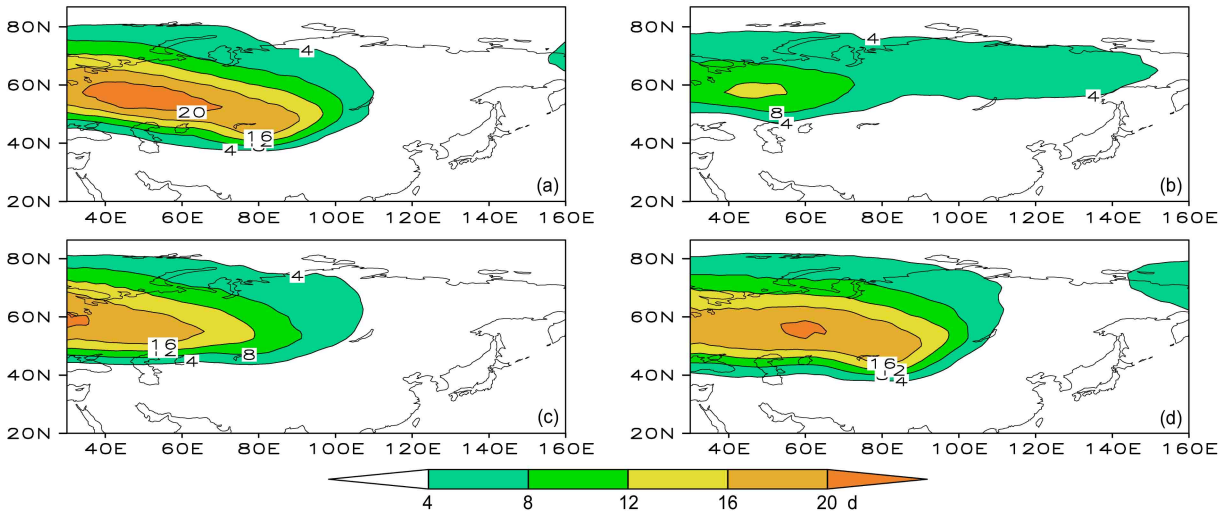

图 1 1979～2017 年春、夏、秋、冬季 500 hPa 持续性高值 [Persistent open ridges and blocking high (maxima) of 500 hPa geopotential height, PMZ] 事件出现频率

Fig. 1 Frequency of persistent open ridges and blocking high (maxima) of 500-hPa geopotential height (PMZ) events in spring, summer, autumn, and winter from 1979 to 2017

（图 2a）。从乌拉尔山地区冬季 PMZ 事件出现至消亡整个生命周期的移动距离可以看出（图 2b），超过 80% 的 PMZ 事件移动距离小于 1000 km，整个事件最长累计移动距离超过 2000 km。该地区冬季 PMZ 事件移动速度（图 2c）低于 400 km/d 的频率已超过 90%，从移动距离和移动速度的频率分布可以看出，乌拉尔山地区冬季的 PMZ 事件具有稳定少动的特点。从移动方向来看（图 2d），以东东北方向发生频率最高（42%），其次为东东南方向（27%），北东北、北西北、西西北三个移动方向频率之和为 10%，表明乌拉尔山地区冬季 PMZ 事件以东传方向为主。

4　GRAPES 和 ECMWF 确定性模式对 2018 年冬季欧亚阻塞高压检验

图 3 给出了 GRAPES 和 ECMWF 确定性模式零场和不同时效预报的（提前 1～10 d）2018 年 12 月 19 日至 2019 年 2 月 28 日鄂霍茨克海（50°N～60°N，120°E～150°E）阻塞高压指数的时间序列，由于贝加尔湖和乌拉尔山地区高度场在该段时间内无明显阻塞事件故不作单独讨论。图 3 中显示，两家确定性模式零场均体现 2018 年冬季鄂霍茨克海地区主要出现 4 次阻塞形势过程，出现的时间依次是 2018 年 12 月下旬、2019 年 1 月下旬、2 月上旬初和 2 月上旬末。其中 2018 年 12 月下旬的阻塞形势持续时间最长、阻塞指数也最强，GRAPES 模式零场阻塞持续 7 d、峰值为 7.4 m/纬度，ECMWF 模式零场阻塞持续 6 d、峰值为 7.8 m/纬度；2019 年 2 月上旬末阻塞强度最弱。

由图 3 可见，GRPAES 确定性模式−10 d 至−1 d 均可对前两次阻塞形势给出预报提示，但进入 6 d 内对两次形势的持续时间和峰值强度预报与零场更为接近，而超过 7 d 预报的阻塞指数强度和峰值出现时间则显得较为分散。ECMWF 确定性模式在 8 d 时效以内对于发生在 2018 年 12 月下旬的阻塞过程预报与零场均较为一致，而对于 2019 年 1 月下旬的过程在 6 d 时效以内预报效果与零场接近；对于发生在 2019 年 2 月上旬初的阻塞过程而言，GRPAES 模式可预报时效为 4 d、ECMWF 模式为 6 d；对于 2 月上旬末的弱阻塞过程，两个模式中短期时效预报效果与零场差别均较大。由以上分析可知，GRAPES 和 ECMWF 确定性模式对 2018 年冬季发生鄂霍茨克海地区的偏强阻塞形势在中短期时效有较好的预报效果，且 ECMWF 模式预报性能优于 GRAPES 模式，而对弱阻塞形势预报两家模式均不理想。

5　GRAPES_GEPS 和 ECMWF 集合预报对 2018 年冬季 PMZ 事件的检验分析

5.1　GRAPES_GEPS 对 2018 年冬季 PMZ 事件的检验分析

在评估 GRAPES_GEPS 对 2018 年冬季 PMZ 事件预报能力之前，首先给出该模式对 2018 年 12

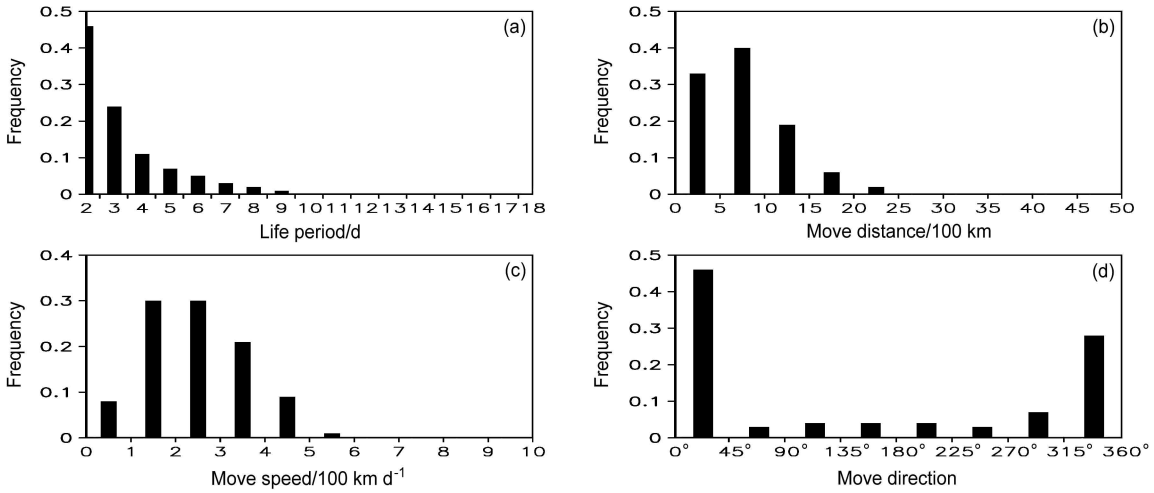

图 2　1979～2017 年乌拉尔山地区冬季 PMZ 事件特征：（a）生命史；（b）移动距离；（c）移动速度；（d）移动方向

Fig. 2　PMZ characteristics in the Ural Mountains area in winter from 1979 to 2017: (a) Life history; (b) moving distance; (c) moving speed; (d) moving direction

月 19 日至 2019 年 2 月 28 日北半球 500 hPa 高度场环流预报情况。图 4 给出了 2018 年 12 月 19 日至 2019 年 2 月 28 日 500 hPa 高度场北半球控制预报（CTL）及集合平均（Mean）距平相关系数（Anomaly Correlation Coefficient, ACC）不同时效分布（图 4a），可以看到，集合平均相对于控制预报随着预报时效 ACC 数值增加，效果改进明显，其中 96 h 预报后改进更为显著，216 h 预报集合平均较控制预报提高 0.113。对均方根误差（RMSE）及离散度（Spread）（图 4b）而言，集合平均 RMSE 相对控制预报优势明显，但模式离散度则相对 RMSE 偏低。

5.1.1 GRAPES_GEPS 控制预报对 2018 年冬季 PMZ 事件检验

通过对 2018 年 12 月 19 日至 2019 年 2 月 28 日 GRAPES_GEPS 控制预报零场的 PMZ 事件分析发现，共有 16 次 PMZ 事件发生，其中生命史为 7 d 的事件有 1 次、6 d 的事件有 1 次、5 d 的有 4 次、4 d 的有 4 次、3 d 的有 6 次（见表 1）。图 5 给出 2018 年 12 月 19 日至 2019 年 2 月 28 日 GRAPES_GEPS 控制预报零场的 PMZ 事件分布，由图可见绝大多数 PMZ 事件均发生在贝加尔湖地区及以西

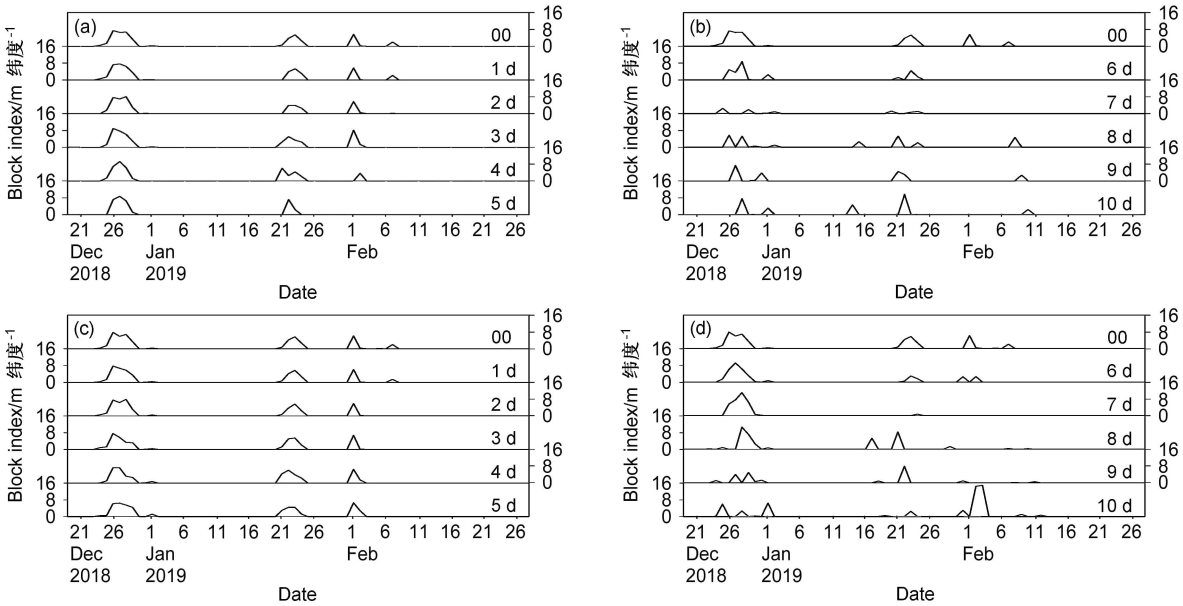

图 3 GRAPES 确定性模式零场及提前（a）1～5 d 和（b）6～10 d 预报鄂海阻塞指数时间序列、ECMWF 确定性模式零场及提前（c）1～5 d 和（d）6～10 d 预报鄂海阻塞指数时间序列

Fig. 3 Block index time series in GRAPES and ECMWF prediction at different lead times from 19 Dec 2018 to 28 Feb 2019 in Okhotsk Sea: (a) GRAPES 1–5 d; (b) GRAPES 6–10 d; (c) ECMWF 1 d–5 d; (d) ECMWF 6–10 d

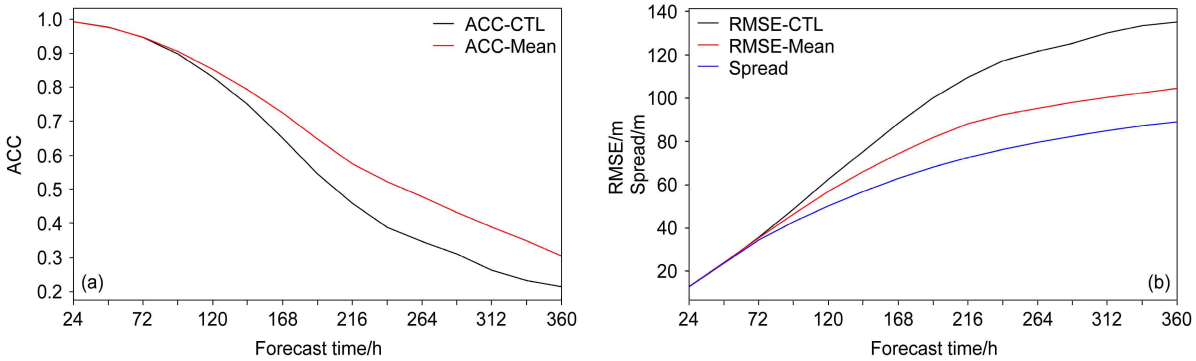

图 4 2018 年 12 月 19 日至 2019 年 2 月 28 日 500 hPa 高度场北半球 GRAPES_GEPS 控制预报及集合平均（a）ACC、（b）RMSE 及离散度不同预报时效分布特征

Fig. 4 Distribution of (a) Anomaly Correlation Coefficient (ACC) and (b) RMSE and spread at 500 hPa in the Northern Hemisphere with GRAPES_GEPS control and ensemble mean with different leading times from 19 Dec 2018 to 28 Feb 2019

表 1　2018 年 12 月 19 日至 2019 年 2 月 28 日 PMZ 事件列表

Table 1　PMZ event list from 19 Dec 2018 to 28 Feb 2019

编号	事件日期	起点	终点	生命史/d	移动距离/km	移速/km d^{-1}	方向
1	2018年12月22～25日	（50.5°N，56.5°E）	（48.5°N，52.5°E）	4	1655	414	西南
2	2018年12月24～26日	（61°N，72°E）	（53.5°N，63°E）	3	1179	393	西南
3	2018年12月25～31日	（60°N，77.5°E）	（62.5°N，107.5°E）	7	2793	399	东北
4	2019年1月13～17日	（55.5°N，79.5°E）	（44.5°N，89.5°E）	5	2890	578	东南
5	2019年1月20～24日	（66°N，170°E）	（65.5°N，147.5°E）	5	1139	228	西南
6	2019年1月22～24日	（48.5°N，88°E）	（51.5°N，96°E）	3	689	230	东北
7	2019年1月22～25日	（49°N，100.5°E）	（37°N，98°E）	4	1522	381	西南
8	2019年1月22～24日	（64.5°N，102.5°E）	（51.5°N，96°E）	3	1660	553	西南
9	2019年1月23～25日	（44°N，101°E）	（37°N，98°E）	3	957	319	西南
10	2019年1月28～30日	（60°N，63°E）	（53.5°N，73°E）	3	950	317	东南
11	2019年1月29日至2月1日	（58.5°N，49.5°E）	（54.5°N，55°E）	3	1246	415	东南
12	2019年1月29～31日	（75°N，45.5°E）	（77.5°N，53.5°E）	4	344	86	东北
13	2019年2月2～6日	（56.5°N，30.5°E）	（51°N，46°E）	5	1458	292	东南
14	2019年2月16～21日	（54°N，97°E）	（56.5°N，104°E）	6	1103	184	东北
15	2019年2月17～20日	（54°N，95.5°E）	（49°N，95°E）	4	1211	303	南
16	2019年2月25～27日	（53°N，104.5°E）	（49°N，95°E）	5	790	158	西南

的欧亚大陆。共有 6 次事件发生在乌拉尔山地区（60°E～90°E），平均生命史为 4.2 d，移动距离为 1670.5 km，移动速度为 383 km/d，与图 2 通过再分析资料计算的冬季乌拉尔山地区 PMZ 事件气候态特征较为一致，由此可见该模式控制预报零场能较好地反映冬季欧亚地区 PMZ 事件。相对于 2018 年 12 月（绿线）和 2019 年 2 月（蓝线）而言，2019 年 1 月（红线）欧亚大陆发生的 PMZ 事件最为频繁，共发生了 9 次。

为了评估 GRAPES_GEPS 控制预报不同时效对 PMZ 事件的预报能力，选取了−2 d 和−5 d 两个

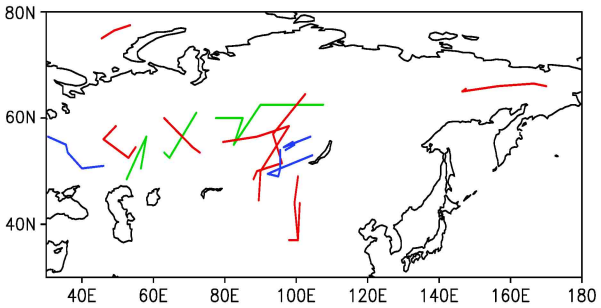

图 5　2018 年 12 月 19 日至 2019 年 2 月 28 日 GRAPES_GEPS 控制预报零场的 PMZ 事件分布（绿线：2018 年 12 月；红线：2019 年 1 月；蓝线：2019 年 2 月）

Fig. 5　PMZ distributions of the zero field predicted by the GRAPES_GEPS control from 19 Dec 2018 to 28 Feb 2019 (green line: Dec 2018; red line: Jan 2019; blue line: Feb 2019)

预报时效进行考察。结果表明，−2 d 时效共预报出 6 次 PMZ 事件，其中发生在 2018 年 12 月有 1 次、2019 年 1 月有 3 次、2019 年 2 月有 2 次。按照预报事件发生的时间和位置，确定了预报与零场 PMZ 事件的匹配情况。−2 d 预报事件的时长与零场相当或者偏少。对于预报的 PMZ 事件中心位置而言，−2 d 预报的 2019 年 2 月 16～21 日过程最为接近零场，事件的起止时间与零场相同，起始位置与零场偏差小于 100 km，终点位置偏差小于 400 km。对于零场 2018 年 12 月 25～31 日（序号 3）的 PMZ 事件而言，−2 d 预报事件（序号 1）维持 3 d，明显少于零场，起点和终点位置与零场偏差都在 500 km 以上，存在较大的预报偏差。该模式−2 d 对 2018 年冬季 PMZ 事件起止位置预报偏差最大可超过 1000 km，平均偏差为 552 km。由−5 d 的 2018 年 12 月 19 日至 2019 年 2 月 28 日 PMZ 事件可见，该时效共预报出 6 次 PMZ 事件，但是只有 3 次事件与零场可匹配。−5 d 预报的事件起止位置与零场平均偏差为 790 km，最大偏差为 1455.8 km，最小为 446.2 km。对于事件维持时长而言，−5 d 预报与零场相比以偏少为主。通过对比−2 d 和−5 d 预报结果可以看出，GRAPES_GEPS 控制预报中期时效预报效果明显差于短期时效，控制预报模式对冬季 PMZ 事件的预报能力表现欠佳。

为了直观对比−2 d 和−5 d GRAPES_GEPS 控

制预报的 PMZ 事件情况，图 6a 和 6b 分别给出 2018 年 12 月 19 日至 2019 年 2 月 28 日该模式在两个时效预报的 PMZ 事件分布。对于 2018 年 12 月而言，−2 d 仅预报出 12 月 28～30 日的 PMZ 事件（图 6a 绿线），维持 3 d，较零场明显偏短；−5 d 同样也预报出 12 月底的 PMZ 事件，但零场中移动路径以纬向为主，而−5 d 预报以经向移动路径为主（图 6b 绿线）。对于 2019 年 1 月，零场共出现 9 次 PMZ 事件，其中 5 次发生在巴尔喀什湖至贝加尔湖之间区域，对比−2 d 和−5 d 预报可以看出，GRAPES_GEPS 控制预报对 2019 年 1 月的 PMZ 事件预报并不理想，事件发生频数较零场明显偏低（−2 d 预报出 3 次，−5 d 预报出 2 次）。对于 2019 年 2 月，零场中出现 4 次 PMZ 事件，其中发生在 2 月上旬的事件主要集中在地中海以北地区，2 月中下旬的事件集中在贝加尔湖一带，−2 d 预报出了分别发生在 2 月上旬和中旬的 PMZ 事件，且位置与零场较为接近，但事件的维持时长较零场偏短。−5 d 未能预报出与 2 月零场相匹配的 PMZ 事件。

通过分析 GRAPES_GEPS 控制预报对 2018 年冬季 PMZ 事件的预报能力可以发现，短期时效预报与零场可对应的 PMZ 事件个数多于中期时效，且短期时效预报的 PMZ 事件起止位置与零场的偏差距离明显低于中期时效。

5.1.2 GRAPES_GEPS 集合预报对 2018 年 12 月冬季 PMZ 事件检验

王毅等（2014）利用 Tibaldi and Molteni（1990）定义的阻高指数检验了 ECMWF 集合预报对 2018 年 1 月欧亚地区阻塞发生频率的预报性能，发现集合预报的优势主要体现在中期预报时段。为了对比 GRAPES_GEPS 集合预报和控制预报对 2018 年冬季 PMZ 事件的预报性能，表 2 给出集合预报不同时效起报的 16 次 PMZ 事件命中概率（方法介绍见 2.4 节）。表中“−1 d”指某一次 PMZ 事件开始日期的前一天、“−2 d”指开始日期的前两天。命中概率大于 50% 的平均预报时长是 1 d，命中概率为 40%～50% 的平均时长是 3.6 d，命中概率为 30%～40% 的平均时长是 3.2 d，命中概率为 20%～30% 的平均时长是 4.1 d，命中概率为 10%～20% 的平均时长是 6.2 d，小于 10% 命中概率的平均预报时长是 7.6 d。可以看出，伴随预报时效逐步临近命中概率数值增加，表明更多的集合成员可预报出与零场接近的 PMZ 事件。

2018 年 12 月 27～30 日我国出现一次寒潮天气过程，全国大部地区日平均气温下降超过 8°C，江南和华南的部分地区降温超过 10°C。通过追踪识别发现 12 月 25～31 日在巴尔喀什湖至贝加尔湖之间出现了维持日数达 7 d 的 PMZ 事件，本文对该次事件进行了检验。图 7a 和 7b 分别给出 2018 年 12 月 25～31 日 GRAPES_GEPS 控制预报和集合平均 500 hPa 位势高度场分布，由图可见控制预报和集合平均的零场及−3 d 预报场均呈现出欧亚大陆中高纬存在两槽一脊的分布形势，对贝加尔湖附近的横槽也给出较好的预报，但二者−3 d 预报贝加尔湖以西地区高压脊强度与零场对比略偏弱。虽然 12 月 25～31 日 500 hPa 高度平均场可以体现贝加尔湖以西地区有高压脊发展，但并不能提供高压脊系统的维持时间、移动路径和强度的变化，因此可以通过 PMZ 事件识别方法来进行高压脊系统的识别和检验，从而可以更好的对 GRAPES_GEPS 集合预报中期延伸期时效对冬季高压脊的预报能力进行评估。

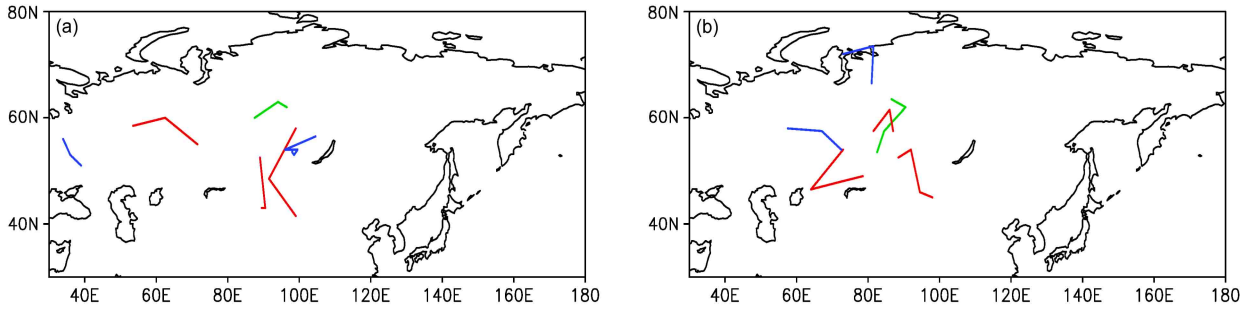

图 6 GRAPES_GEPS 控制预报提前（a）2 d 和（b）5 d 预报 2018 年 12 月 19 日至 2019 年 2 月 28 日的 PMZ 事件分布（绿线：2018 年 1 月；红线：2019 年 1 月；蓝线：2019 年 2 月）

Fig. 6 Distributions of GRAPES_GEPS (a) 2-d and (b) 5-d forecast PMZ event forecast from 19 Dec 2018 to 28 Feb 2019 (green line: Dec; red line: Jan 2019; blue line: Feb 2019)

为更好地评估 GRAPES_GEPS 集合预报中期延伸期时效对 2018 年 12 月 25～31 日 PMZ 事件的预报能力，图 8 给出了该时段 GRAPES_GEPS 集合预报中期延伸期时效 PMZ 事件集合预报命中概率分布情况。由图可见，19 日起报，20%～30% 集合成员给出 PMZ 事件预报，高压脊中心位置和移动路径与零场较为接近；自 20 日起，预报 PMZ 事件的集合成员数增多、模式稳定性提高；22 日，有近半数成员均给出有效预报，且高压脊中心位置、移动路径、高压脊维持时间与零场均较为一致；23～24 日起报，绝大多数成员预报出 12 月下旬末期的 PMZ 事件，但可以发现 GRAPES_GEPS 集合预报对此次 PMZ 事件的维持时间预报较零场偏短、高压脊强度较零场偏弱。

此外，通过对比发现 2018 年 12 月 19 日起报的控制预报并未预报出 12 月下旬末期发生在巴尔喀什湖以北的 PMZ 事件，而部分集合成员给出了一定的预报信息（图略）。由此可见，GRAPES_GEPS 集合预报对于本次 PMZ 事件在中期延伸期时效上可以提供一定的指示性作用。

5.2　ECMWF 集合预报对 2018 年冬季 PMZ 事件的检验分析

当前 ECMWF 确定性预报可用预报时效接近 9 d，集合预报的可用预报时效则远超 10 d。本文

表 2　GRAPES_GEPS 集合预报不同时效起报的 2018 年冬季 16 次 PMZ 事件的命中概率

Table 2　The strike probability of 16 PMZ events in the winter of 2018 reported from different forecast time by GRAPES_GEPS ensemble

事件	PMZ零场日期	不同时效起报的命中概率												
		−13 d	−12 d	−11 d	−10 d	−9 d	−8 d	−7 d	−6 d	−5 d	−4 d	−3 d	−2 d	−1 d
1	2018年12月22～25日											36%	22%	26%
2	2018年12月24～26日									20%	17%	24%	18%	51%
3	2018年12月25～31日								7%	14%	12%	14%	22%	28%
4	2019年1月13～17日											34%	31%	24%
5	2019年1月20～24日				3%	10%	8%	7%	7%	7%	9%	8%	11%	14%
6	2019年1月22～24日		8%	8%	7%	13%	11%	12%	13%	8%	8%	10%	13%	8%
7	2019年1月22～25日			7%	5%	27%	9%	9%	13%	11%	16%	19%	18%	20%
8	2019年1月22～24日		10%	16%	16%	18%	16%	12%	10%	9%	9%	6%	6%	12%
9	2019年1月23～25日			7%	7%	20%	9%	14%	13%	32%	17%	38%	24%	24%
10	2019年1月28～30日	6%	7%	6%	7%	6%	9%	11%	9%	17%	44%	47%	47%	64%
11	2019年1月29日至2月1日		12%	6%	6%	10%	7%	10%	19%	27%	30%	31%	42%	37%
12	2019年1月29～31日	3%	3%	3%	3%	3%	3%	8%	8%	8%	8%	7%	7%	7%
13	2019年2月2～6日				13%	8%	12%	10%	8%	12%	17%	29%	21%	32%
14	2019年2月16～21日								41%	20%	24%	23%	45%	53%
15	2019年2月17～20日							33%	31%	32%	24%	46%	31%	34%
16	2019年2月25～27日	9%	12%	22%	19%	20%	20%	14%	16%	18%	23%	29%	35%	45%

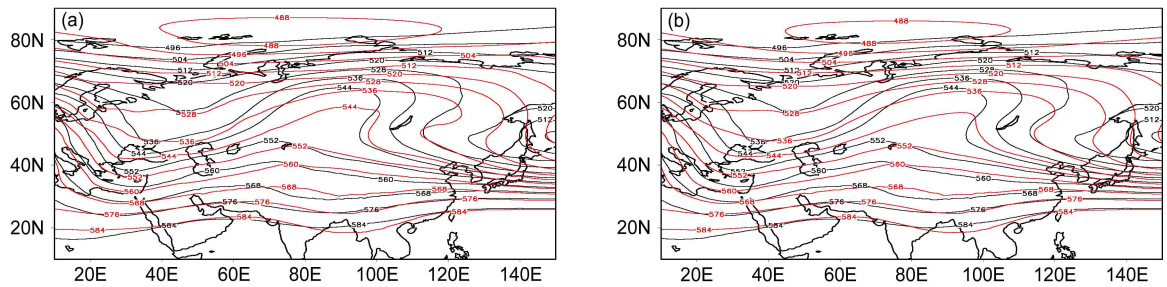

图 7　2018 年 12 月 25～31 日基于（a）GRAPES_GEPS 控制预报和（b）集合平均的 500 hPa 位势高度场（单位：dagpm）（黑线：零场；红线：3 d 预报）

Fig. 7　(a) GRAPES_GEPS control forecast and (b) the ensemble average of the 500-hPa geopotential height field from 25 Dec to 31 Dec 2018 (units: dagpm; black line: Zero field; red line: 3-d forecast)

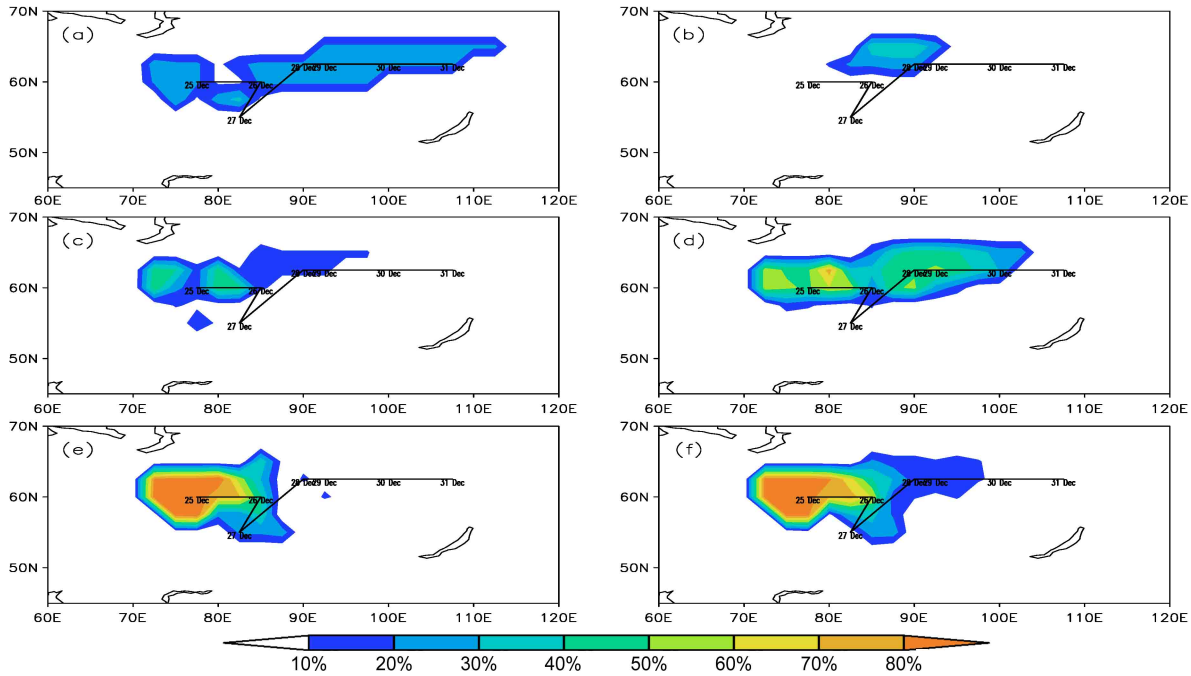

图 8 GRAPES_GEPS 2018 年 12 月（a）19 日、（b）20 日、（c）21 日、（d）22 日、（e）23 日、（f）24 日起报的 2018 年 12 月 25～31 日 PMZ 事件集合预报命中概率分布（黑粗线：零场；阴影：集合成员）

Fig. 8 Strike probability distributions of PMZ during 25−31 Dec 2018 from GRAPES_GEPS ensemble forecast on (a) 19 Dec, (b) 20 Dec, (c) 21 Dec, (d) 22 Dec, (e) 23 Dec, and (f) 24 Dec 2018 (black thick line: Zero field; shadow area: Ensemble member)

对比了 ECMWF 和 GRAPES_GEPS 两个模式集合预报对 PMZ 的预报能力。由于 PMZ 事件是利用模式 500 hPa 零场计算来确定，因此分别由 ECMWF 集合预报和 GRAPES_GEPS 两家模式控制预报零场来确定的 PMZ 事件次数和起止时间势必不一致，这里采用的检验手段是预报场均与自身零场进行比较。2018 年冬季 ECMWF 集合预报控制预报零场共识别出 11 次 PMZ 事件，ECMWF 集合预报命中概率大于 50% 的平均预报时长是 1.8 d，命中概率为 40%～50% 的平均时长是 2.6 d，命中概率为 30%～40% 的平均时长是 3 d，命中概率为 20%～30% 的平均时长是 5.2 d，命中概率为 10%～20% 的平均时长是 6 d，小于 10% 命中概率的平均预报时长是 8.5 d。由两家模式不同时效起报 PMZ 事件集合预报命中概率曲线分布（图 9）可见，ECMWF 在前期预报效果明显占优（1～5 d），但随着预报时效的增加，性能明显衰减，第 8 天性能已与 GRAPES_GEPS 模式基本保持一致，而后期（9～13 d）GRAPES_GEPS 模式甚至显示一定优势。

6 结论和讨论

本文基于 GRAPES_GEPS 和 ECMWF 全球集合预报产品，利用 PMZ 识别方法，以 2018 年冬季在欧亚地区中高纬出现的 500 hPa 持续性高值事件为研究对象，分析了两家集合预报模式对北半球 500 hPa 持续性高值事件的预报效果，并对 12 月底发生在我国的寒潮过程的高压脊形势进行了详细的评估。此外文章还采用 Tibaldi and Molteni（1990）定义的阻高指数对比了 GRAPES 和 ECMWF 确定性模式对 2018 年冬季鄂霍茨克海阻高的预报性能。研究发现：

（1）欧亚地区冬季 PMZ 事件主要发生在乌拉尔山地区，该地区 PMZ 事件生命史以 2～3 d 为主，生命史内移动距离小于 1000 km，具有稳定少动的特点。

（2）GRAPES 和 ECMWF 确定性模式对 2018 年冬季发生鄂霍茨克海地区的偏强阻塞形势在中短期时效有较好的预报效果，且 ECMWF 模式预报性能优于 GRAPES 模式，而对弱阻塞形势预报两家模式均不理想。

（3）GRAPES_GEPS 控制预报中期时效预报效果明显差于短期时效，控制预报模式对冬季 PMZ 事件的预报能力表现欠佳。GRAPES_GEPS 集合预报伴随预报时效临近更多的集合成员可预报出与零场接近的 PMZ 事件。

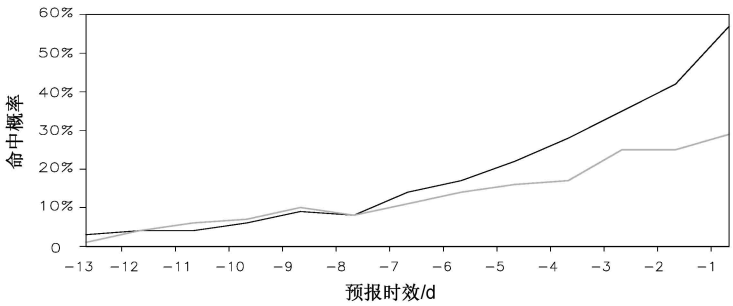

图 9　GRAPES_GEPS（灰线）和 ECMWF（黑线）对不同时效起报 PMZ 事件集合预报命中概率分布

Fig. 9　GRAPES_GEPS (grey line) and ECMWF (black line) ensemble forecast strike probability distribution of PMZ

（4）对于 2018 年 12 月 25～31 日发生在巴尔喀什湖至贝加尔湖一带的 PMZ 事件，GRAPES_GEPS 集合预报在延伸期时效给出预报信息，随预报时效临近，绝大多数成员均给出有效预报，但与零场相比维持时间预报较零场偏短、高压脊强度较零场偏弱。

（5）与 GRAPES_GEPS 模式相比，ECMWF 前期预报效果明显占优，但随着预报时效的增加，效果显著降低，GRAPES_GEPS 在 10 d 后可显示出一定的预报优势。

目前中期延伸期预报对大气环流系统的业务检验还多停留在传统检验评分上，对影响我国天气气候异常的主要天气系统还缺乏追踪和检验技术。本文利用前沿的 PMZ 识别技术，获取集合预报命中概率评分将有效提升中期延伸期时效西风带系统预报能力。未来有望将该方法应用于实际业务中以提高整体评估效果。

致谢　感谢国家气象中心周宁芳正研级高工对本文的建议和指导。

参考文献（References）

Barriopedro D, Garcia-Herrera R, Lupo A R, et al. 2006. A climatology of Northern Hemisphere blocking [J]. J. Climate, 19(6): 1042−1063. doi:10.1175/JCLI3678.1

毕慕莹, 丁一汇. 1992. 1980 年夏季华北干旱时期东亚阻塞形势的位涡分析 [J]. 应用气象学报, 3(2): 145−156.　Bi Muying, Ding Yihui. 1992. A study of budget of potential vorticity of blocking high during the drought period in summer of 1980 [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 3(2): 145−156.

Black E, Blackburn M, Harrison G, et al. 2004. Factors contributing to the summer 2003 European heatwave [J]. Weather, 59(8): 217−223. doi:10.1256/wea.74.04

Brunner L, Hegerl G C, Steiner A K. 2017. Connecting atmospheric blocking to European temperature extremes in spring [J]. J. Climate, 30(2): 585−594. doi:10.1175/JCLI-D-16-0518.1

Bueh C, Xie Z W. 2015. An objective technique for detecting large-scale tilted ridges and troughs and its application to an East Asian cold event [J]. Mon. Wea. Rev., 143(12): 4765−4783. doi:10.1175/MWR-D-14-00238.1

Buehler T, Raible C C, Stocker T F. 2011. The relationship of winter season North Atlantic blocking frequencies to extreme cold or dry spells in the ERA-40 [J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 63(2): 174−187. doi:10.1111/j.1600-0870.2010.00492.x

Cattiaux J, Vautard R, Cassou C, et al. 2010. Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate [J]. Geophys. Res. Lett., 37(20): L20704. doi:10.1029/2010GL044613

Diao Y N, Li J P, Luo D H. 2006. A new blocking index and its application: Blocking action in the Northern Hemisphere [J]. J. Climate, 19(19): 4819−4839. doi:10.1175/JCLI3886.1

Dole R M. 1978. The objective representation of blocking patterns. The General Circulation: Theory, modeling and observation [R]. NCAR Colloquim Notes: Summer 1978, NCAR/CQ-6–1978-ASP, 404–426.

顾伟宗, 陈丽娟, 左金清, 等. 2016. 多因子协同作用对 1992 年和 1998 年黄淮地区夏季降水异常的影响 [J]. 大气科学, 40(4): 743−755.　Gu Weizong, Chen Lijuan, Zuo Jinqing, et al. 2016. Combined effect of multiple factors on the summer rainfall anomalies over the Huanghe –Huaihe valley in 1992 and 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(4): 743−755. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1510.15179

霍振华, 陈静, 李晓莉, 等. 2018. GRAPES 业务全球集合控制预报初值的动力升尺度方法 [J]. 气象科技, 46(4): 707−717.　Huo Zhenhua, Chen Jing, Li Xiaoli, et al. 2018. Dynamical upscaling technique for initial fields of GRAPES operational global ensemble control forecast [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 46(4): 707−717. doi:10.19517/j.1671-6345.20170311

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(3): 437−472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

LejenÄs H, Økland H. 1983. Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data [J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 35(5): 350−362. doi:10.3402/tellusa.v35i5.11446

李晓莉, 刘永柱. 2019. GRAPES 全球奇异向量方法改进及试验分析

[J]. 气象学报, 77(3): 552−562. Li Xiaoli, Liu Yongzhu. 2019. The improvement of GRAPES global extratropical singular vectors and experimental study [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 77(3): 552−562. doi:10.11676/qxxb2019.020

李威, 王启祎, 王小玲. 2007. 北半球阻塞高压实时监测诊断业务系统 [J]. 气象, 33(4): 77−81. Li Wei, Wang Qiyi, Wang Xiaoling. 2007. The real-time operational system of monitoring and diagnostics on the northern hemisphere blocking high [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33(4): 77−81. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2007.04.013

李艳, 金荣花, 王式功. 2010. 1950~2008 年影响中国天气的关键区阻塞高压统计特征 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 46(3): 47−55. Li Yan, Jin Ronghua, Wang Shigong. 2010. Statistical characteristics of blocking highs influencing the weather in China during 1950−2008 [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 46(3): 47−55. doi:10.13885/j.issn.0455-2059.2010.03.013

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 Xiaoli, Chen Jing, Liu Yongzhu, et al. 2019. Representations of initial uncertainty and model uncertainty of GRAPES global ensemble forecasting [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 42(3): 348−359. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20190318001

Liu P, Zhu Y J, Zhang Q, et al. 2018. Climatology of tracked persistent maxima of 500-hPa geopotential height [J]. Climate Dyn., 51: 701−717. doi:10.1007/s00382-017-3950-0

陆日宇, 黄荣辉. 1999. 夏季西风带定常扰动对东北亚阻塞高压的影响 [J]. 大气科学, 23(5): 533−542. Lu Riyu, Huang Ronghui. 1999. Influence of the stationary disturbance in the westerlies on the blocking highs over the Northeastern Asia in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23(5): 533−542. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.05.03

Matsueda M. 2011. Predictability of Euro–Russian blocking in summer of 2010 [J]. Geophys. Res. Lett., 38(6): L06801. doi:10.1029/2010GL046557

Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. 1996. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 122(529): 73−119. doi:10.1002/qj.49712252905

Pelly J L, Hoskins B J. 2003. A new perspective on blocking [J]. J. Atmos. Sci., 60(5): 743−755. doi:10.1175/1520-0469(2003)060<0743:ANPOB>2.0.CO;2

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 Fei, Li Xiaoli, Chen Jing, et al. 2019. A stochastic kinetic energy backscatter scheme for model perturbations in the GRAPES global ensemble prediction system [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 77(2): 180−195.

Pfahl S, Wernli H. 2012. Quantifying the relevance of atmospheric blocking for co-located temperature extremes in the Northern Hemisphere on (sub-) daily time scales [J]. Geophys. Res. Lett., 39(12): L12807. doi:10.1029/2012GL052261

Rex D F. 1950. Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate [J]. Tellus, 2(4): 275−301. doi:10.3402/tellusa.v2i4.8603

沈学顺, 苏勇, 胡江林, 等. 2017. GRAPES_GFS 全球中期预报系统的研发和业务化 [J]. 应用气象学报, 28(1): 1−10. Shen Xueshun, Su Yong, Hu Jianglin, et al. 2017. Development and operation transformation of GRAPES global middle-range forecast system [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 28(1): 1−10. doi:10.11898/1001-7313.20170101

Shi N, Wang X Q, Zhang L Y, et al. 2016. Features of Rossby wave propagation associated with the evolution of summertime blocking highs with different configurations over Northeast Asia [J]. Mon. Wea. Rev., 144(7): 2531−2546. doi:10.1175/MWR-D-15-0369.1

Small D, Atallah E, Gyakum J R. 2014. An objectively determined blocking index and its Northern Hemisphere climatology [J]. J. Climate, 27(8): 2948−2970. doi:10.1175/JCLI-D-13-00374.1

Tibaldi S, Molteni F. 1990. On the operational predictability of blocking [J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 42(3): 343−365. doi:10.3402/tellusa.v42i3.11882

Tyrlis E, Hoskins B J. 2008. Aspects of a Northern Hemisphere atmospheric blocking climatology [J]. J. Atmos. Sci., 65(5): 1638−1652. doi:10.1175/2007JAS2337.1

王毅, 金荣花, 代刊, 等. 2014. 2008 年 1 月欧亚阻塞形势的 ECMWF 集合预报效果评估检验 [J]. 大气科学学报, 37(3): 257−267. Wang Yi, Jin Ronghu, Dai Kan, et al. 2014. The assessment and verification of ECMWF ensemble forecasting on the Eurasia atmospheric blocking in January 2008 [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 37(3): 257−267. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2014.03.013

王前, 赵勇, 陈飞, 等. 2017. 南亚高压的多模态特征及其与新疆夏季降水的联系 [J]. 高原气象, 36(5): 1209−1220. Wang Qian, Zhao Yong, Chen Fei, et al. 2017. Characteristics of different patterns of South Asia High and their relationships with summer precipitation in Xinjiang [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 36(5): 1209−1220. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00123

吴国雄, 刘辉, 陈飞, 等. 1994. 时变涡动输送和阻高形成——1980 年夏中国的持续异常天气 [J]. 气象学报, 52(3): 308−320. Wu Guoxiong, Liu Hui, Chen Fei, et al. 1994. Transient eddy transfer and formation of blocking high-on the persistently abnormal weather in the summer of 1980 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 52(3): 308−320.

叶培龙, 李艳, 王式功, 等. 2015. 北半球不同强度、生命期阻塞高压的变化特征及其对温度的影响 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 51(5): 639−645, 651. Ye Peilong, Li Yan, Wang Shigong, et al. 2015. Variation characteristics of different atmospheric blockings and their impact on temperature over the Northern Hemisphere [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 51(5): 639−645, 651. doi:10.13885/j.issn.0455-2059.2015.05.008

叶笃正, 陶诗言, 朱抱真, 等. 1962. 北半球冬季阻塞形势的研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1–1324. Ye Duzheng, Tao Shiyan, Zhu Baozhen, et al. 1962. Studies on the Blocking Situation in the Northern Hemisphere Winter (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–1324.

于淑秋, 林学椿. 2006. 两类江淮大水的大气环流特征 [J]. 气象学报, 64(5): 605−613. Yu Shuqiu, Lin Xuechun. 2006. Characteristics of

two general circulation patterns during floods over the Changjiang –Huaihe River valley [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 64(5): 605−613. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2006.05.007

Zhang B, Liu G, Zhu Y J, et al. 2019. Frequency of persistent blocking and ridge events related to precipitation over Eastern China during August and its preceding atmospheric signals [J]. Weather and Forecasting, 34(6): 1705−1719. doi:10.1175/WAF-D-19-0047.1

张庆云, 陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响 [J]. 气象学报, 56(2): 199−211. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1998. Influence of Asian mid high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 56(2): 199−211.

周宁芳, 贾小龙. 2018. NCEP CFSv2 对北半球夏季中高纬阻塞高压的预测检验 [J]. 高原气象, 37(2): 469−480. Zhou Ningfang, Jia Xiaolong. 2018. Check analysis of the prediction of Northern Hemisphere blocking in summer by NCEP CFSv2 [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 37(2): 469−480. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00036