

邓国,戴玲玲,周玉淑,等,2022. CMA 高分辨区域集合预报系统支撑北京冬奥会气象服务保障的评估分析[J]. 气象,48(2): 129-148. Deng G, Dai L L, Zhou Y S, et al, 2022. Evaluation and analysis of meteorological service for Beijing Winter Olympic Games supported by CMA high-resolution regional ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 48(2): 129-148(in Chinese).

CMA 高分辨区域集合预报系统支撑 北京冬奥会气象服务保障的评估分析^{*}

邓 国^{1,2,3} 戴玲玲⁴ 周玉淑^{5,6} 陈 静^{1,2,3} 李红祺^{1,2,3} 陈法敬^{1,2,3} 王继志²

1 中国气象局地球系统数值预报中心,北京 100081

2 灾害天气国家重点实验室,北京 100081

3 国家气象中心,北京 100081

4 安徽省滁州市气象局,滁州 239004

5 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室,北京 100029

6 中国科学院大学,北京 100049

提 要: 冰雪运动项目与气象条件关系密切,气象条件是冬奥会赛事顺利进行的关键因素之一。中国气象局地球系统数值预报中心根据 2022 年北京冬奥会比赛气象保障需求,基于多尺度混合初值扰动方法和侧边界扰动方法,初步建立了高分辨率区域集合预报试验系统,针对北京冬奥会比赛同期时段开展了连续试验。初步试验统计结果表明:主要预报变量高、中、低层等压面要素集合平均值的均方根误差基本小于等于控制预报误差,体现了集合平均相对于单一确定性预报的优势;地面要素风和降水预报效果较好,但温度 24 h 预报偏差高于 2℃,距离精准冬奥气象保障还有一定差距。针对试验期间两次寒潮大风过程开展了高分辨率区域集合预报,天气学分析的检验结果表明,集合预报产品可以比较准确地描述地面温度主要分布特征、寒潮移动过程和降水预报,为预报员提供寒潮标准 24 h 变温预报、大风预报等有价值的概率预测信息。基于诊断方法开发了能见度、大风、降水相态等对冬奥赛事运行和运动员表现有重要影响的天气要素集合预报产品,初步试验结果表明不同集合成员的取舍对能见度预报反应敏感,具有一定预报能力,但预报范围偏大,数值偏低,需进一步改进;阵风预报与实况大值区分布比较一致,降水相态预报与观测分布吻合,雨雪分界线,降雨、雨夹雪、雪、冰粒落区范围合理,进一步提升了北京冬奥会气象的保障能力。

关键词: 高分辨率,区域集合预报,冬季奥运会,气象保障

中图分类号: P456, P435

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.092901

Evaluation and Analysis of Meteorological Service for Beijing Winter Olympic Games Supported by CMA High-Resolution Regional Ensemble Prediction System

DENG Guo^{1,2,3} DAI Lingling⁴ ZHOU Yushu^{5,6} CHEN Jing^{1,2,3}

LI Hongqi^{1,2,3} CHEN Fajing^{1,2,3} WANG Jizhi²

1 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Beijing 100081

3 National Meteorological Centre, Beijing 100081

4 Chuzhou Meteorological Office of Anhui Province, Chuzhou 239004

^{*} 国家重点研发计划(2018YFF0300103)、国家自然科学基金项目(41975137 和 42175012)、中国气象局数值预报(GRAPES)发展专项共同资助

2021 年 7 月 7 日收稿; 2021 年 9 月 29 日收修定稿

第一作者:邓国,主要从事集合预报技术研究. E-mail: deng719@cma.gov.cn

通讯作者:周玉淑,主要从事中尺度气象学研究. E-mail: zys@mail.iap.ac.cn

5 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

6 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Winter sports are closely related to meteorological conditions, which is one of the most important factors for the success of Winter Olympic Games. According to the meteorological support requirements of Beijing Winter Olympic Games, CMA Earth System Modeling and Prediction Centre has preliminarily established a high-resolution regional ensemble prediction test system based on the multi-scale blending (MSB) initial condition perturbation method and lateral boundary condition (LBC) perturbation method, and carried out continuous tests for the same period corresponding to the 2022 Beijing Winter Olympic Games. The statistical results of the preliminary test show that the root mean square error of the ensemble mean values of isobaric surface elements at high, medium and low layers of the main forecast variables is basically less than or equal to the control forecast error, which reflects the advantages of the ensemble mean over the single deterministic forecast. The forecast effect of surface element wind and precipitation is good, but the deviation of 24 h temperature forecast is 2 °C higher, which is far from the accurate Winter Olympic Games meteorological support. The high-resolution regional ensemble forecast synoptic analysis of two cold waves and strong wind processes during the test period shows that the ensemble forecast products can accurately describe the main distribution characteristics of ground temperature, cold wave movement process and precipitation forecast, and provide valuable probabilistic forecast information for forecasters, such as cold wave standard 24 h varying temperature forecast and gale forecast. Based on the diagnostic method, the weather element ensemble forecast products that have an important impact on the operation of Winter Olympic events and athletes' performance such as visibility, strong wind and precipitation phase are developed. The preliminary test results show that the choice of different ensemble members is sensitive to the visibility forecast, and has a certain forecast ability, but the forecast range is too large, and the value is low, which needs to be further improved. The distribution of gust forecast is consistent with the actual large-value area. The precipitation phase forecast is consistent with the observed distribution, especially the boundary of rain and snow, and the location ranges of rainfall, sleet, snow and ice particles are reasonable, which further improves the meteorological support ability to the Beijing Winter Olympic Games.

Key words: high-resolution, regional ensemble prediction, Beijing Winter Olympic Games, meteorological support

引 言

精准气象预报服务是历届冬季奥林匹克运动会(以下简称冬奥会)成功举办的最重要条件之一。近几届冬奥会举办前,相关国家均开展了气象保障关键科学问题和技术攻关。加拿大环境部针对 2010 年温哥华冬奥会气象保障服务,提出了 SNOW-V10 计划(Science of Nowcasting Olympic Weather for Vancouver 2010),开发针对冬奥气象保障的精细预报系统,包括 1 km 分辨率数值预报系统、多模式预报集成系统、模式与观测融合预报系统、高分辨率区域集合预报系统、微尺度地表气象特征模拟系统等,

并开展复杂地形下降水相态、瞬时大风和低能见度等关键问题的深入研究(Joe et al, 2010; Mailhot et al, 2010; 2014; Bailey et al, 2014; Isaac et al, 2014)。俄罗斯水文气象中心针对 2014 年索契冬奥会,提出了 FROST-2014 计划(Forecast and Research: the Olympic Sochi Testbed 2014),开展赛场周边冬奥高影响天气研究,通过局地资料同化、高分辨率数值模式和集合预报等技术研发,提高冬奥赛区客观气象预报水平(Kiktev et al, 2015; 2017);韩国气象厅针对 2018 年平昌冬奥会,提出了 ICE-POP 2018 计划(ICE-Pyeong Chang 2018 Winter Olympic Game Project),从观测、预报、服务三方面提高气象保障能力(Korea Meteorological Administration, 2018)。

第24届冬奥会将于2022年2月在北京和河北举办,具体地点包括北京城区、延庆和河北赛区,后两个赛区地形复杂,沟壑纵横,气象条件多样。从北京冬奥气候风险评估来看,冬奥期间存在多种气象风险,可能会对比赛产生重要影响。冬奥会雪上项目主赛场均位于山区,对气象保障服务有极高要求。根据北京冬奥组委“一项一策”气象保障需求,需要为冬奥会赛事提供赛场、赛道、转场交通通道及其他关键区域在时间上的精准气象监测、预警预报及赛事专项的服务产品。众所周知,山区地形复杂,气象数据稀少,小尺度山地气象监测预报是国际难题。由于赛区的复杂地形和气象特征的巨大差异,无法移植国际现有技术方案,必须开展针对北京冬奥会的气象保障关键技术研发,力争到2022年冬奥会举办时,用先进的气象科技手段和精准的气象服务为赛事运行提供最好的气象保障。在我国,气象部门针对夏季强天气精细预报,开展了大量研究和应用工作,积累了丰富的气象保障服务经验,但是专门针对复杂地形下冬季大型冰雪运动气象精细监测、预报和服务的系统性研究还很少(李炬等,2020)。尤其北京冬奥会是近20年内唯一一次在大陆性冬季风主导的气候条件下举办的冬奥会,与往届冬奥会气象条件不同,中小尺度天气特征不同,气象预报服务关注重点不同,原有在冬季雪上项目预报技术服务方面的研究比较少,特别是温度、湿度、能见度、大风等气象条件的准确可靠的预报和预警,是保障冬季赛事运行和影响运动员表现的重要外部因素,需要重点考虑。

数值预报方法预测大气会面临着固有的不确定性,那么解决问题的方法也要从这一本质问题出发来考虑,摆脱追求确定性的思维方式,集合预报就是面对大气运动混沌的本质而设计出的解决方案(许小峰,2018)。目前,集合预报已经成为各国业务数值天气预报系统的基础组成部分(Kalnay,2002;沈学顺等,2021),在天气预报业务中发挥关键作用(端义宏和金荣花,2012)。根据区域模式的特点,集合预报可通过初值扰动、模式扰动、侧边界扰动等技术构成预报集合成员,体现数值预报模式初值误差、模式误差和大气系统混沌特性引起的数值预报的不确定性,取得了令人瞩目的进展(Duan et al,2012;张涵斌等,2017;2019;王璐和沈学顺,2019;范宇恩等,2019)。目前,国内集合预报系统的水平分辨率为10 km,国外建立的区域高分辨率集合预报系统已

经为千米级,如英国为2.2 km(Golding et al,2014)、法国为2.5 km(Nuissier et al,2012)、德国为2.8 km(Bouall  gue et al,2013)等。从集合预报技术特点和时空分辨能力来看,国内区域集合预报研发已经相对落后,需要中国科学家和业务人员奋起直追。目前,初始扰动生成方案依然是区域集合预报技术的重点和难点,对于风暴尺度、云尺度的集合预报,初始场的生成还有更高的要求(杜钧,2002;Hagelin et al,2017;Wang et al,2014)。现阶段国际上较为流行的方法主要包括两大类,一种是基于全球集合预报的动力降尺度方法(Frogner et al,2006);区域集合预报初值扰动场直接来源于全球集合预报初值场的动力降尺度,受到分辨率限制,降尺度扰动不能充分包含区域模式所能分辨的小尺度扰动信息(Zhang et al,2015a;2015b)。另外一类方法是集合预报根据自身循环产生扰动初值(Wei et al,2008;陈静等,2002;张涵斌等,2017;王婧卓等,2018),这种根据模式自身扰动循环产生的扰动信息,尺度一般比较小,包含大尺度扰动信息有限,部分误差信息随模式积分不增长或者转化为增长的扰动需要一定积分时间因而较慢,而较大尺度的扰动可能具有“组织化结构”,一般对应于较高的离散度增长速度和评分(Zhang et al,2015b)。综合以上两种方法的特点,开展多尺度混合扰动初值扰动构造方法已经成为国际区域集合预报研究的新技术(Caron,2013;Wang et al,2014;Zhang et al,2015a;2015b)。从最近三届冬奥会关于气象条件预测保障关键科学和技术研发来看,集合预报特别是高分辨区域集合预报技术在冬奥会气象保障中发挥了重要作用,也是开展冬奥会服务高时空分辨率无缝隙客观预报和智能化预报服务的核心产品。根据索契冬奥会FROST-2014计划的总结报告,无论高精度确定性预报还是集合预报产品,对冬奥会均提供了技巧很高的服务支撑作用。其中高分辨确定性预报对2 m温度预报较好,但对风的预报稍差;而集合预报(索契冬奥会包含5个7~11 km分辨率对流参数化集合预报系统和2个2~3 km对流可分辨高分辨率区域集合预报系统)则对2 m温度、风和降水预报均表现出较高的预报技巧。基于索契冬奥会测试和比赛期间的表现,FROST-2014报告建议加强集合预报特别是对流可分辨高分辨率集合预报产品的应用。因为对于冬奥会气象服务保障,气象预报服务精度要求高,但是单一确定性预报的不确

定性很高,所以要发挥千米级集合预报的优势,通过集合预报产品的应用,给出赛区高影响天气发生概率和赛事关注的气象要素阈值的概率信息,最大程度降低冬奥气象预报服务的不确定性。国家气象中心是世界上最早开展集合预报研发和业务系统建设的预报中心之一,先后研发了基于欧洲中心(EC)引进的全球模式和美国的全球/区域集合预报系统,到完全基于中国科学家自主研发的全球与区域同化预报系统(薛纪善和陈德辉,2008)的集合预报系统体系。目前,国家气象中心的全球集合预报系统空间分辨率为 50 km,区域集合预报系统空间分辨率为 10 km(陈雨潇等,2020;王婧卓等,2021),均难以满足北京冬奥气象保障高时空分辨率的要求。为此,本研究针对北京冬奥赛事区域,发展复杂地形条件下高分辨率区域集合预报系统初值扰动和模式扰动技术构造方法,开展 3 km 高分辨区域集合预报系统研发和试验,开发可为北京冬奥服务的温度、能见度、极端风、降水和降雪的诊断产品和短期精细化概率预报产品,提高对高影响天气过程的预报和服务能力;针对北京冬奥会期间可能出现的高影响天气过程进行分析,开展高分辨率区域集合预报天气过程检验;通过天气学检验和统计检验,评估高分辨率区域集合预报系统的冬奥气象保障能力,为进一步提高我国高分辨率区域集合预报系统预报和服务能力奠定基础。

1 资料和方法

本文使用的站点观测资料来源于国家气象业务内网(具体下载链接:<http://idata.cma/>)提供的气温、过去 24 h 变温、24 h 降水量、水平能见度(人工)、极大风速、自动站输出地面 1 h 资料里的风向风速资料以及冬奥服务保障团队提供的加密观测资料(崇礼赛区和延庆赛区)。预报模式为中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO),初始场和侧边界条件来自国家气象中心 T639 全球集合预报系统。在国家气象中心业务化的区域集合预报系统基础上,针对北京冬奥会气象保障要求,发展了新的区域集合预报初值扰动产生和侧边界扰动更新方法,选取北京冬奥会赛区及赛事时间段开展 3 km 高分辨率集合预报试验和产品开发分析,评估高分辨率集合预报对北京冬奥会气象保障能力。

1.1 高分辨区域集合预报试验方案

为提高复杂地形条件下区域集合预报北京冬奥会气象保障能力,从预报模式和集合预报技术两方面入手提高赛事关注的气象要素阈值预报能力,以便提前做好规避赛事风险准备。现有国家级区域集合预报业务系统分辨率为 10 km,而各冬奥赛区比赛地点水平距离只有几千米甚至几百米,不能精确捕捉局地赛道地面重要气象要素不确定性信息,同时兼顾建立实时预报系统计算资源能力,最终构建了以北京冬奥会赛区为中心的华北区域高分辨区域集合预报系统。针对复杂地形条件特点,预报模式中增加了区域模式研发团队的成果,包括为提高计算稳定性和局地中小尺度天气过程捕捉能力,将水平分辨率提高到 3 km,垂直分辨率由 33 层提高到 50 层,积分步长自动调整,在动力框架中增加物理过程热膨胀项的影响,采用新的模式初始静态资料;为降低近地面温度预报偏差,更新了 RRTM 长波辐射参数化方案、优化陆面参数化方案(包括地面辐射、地表净辐射通量)、引入 CP 格点的近地层方案。在集合预报技术方面,分析冬奥比赛区域复杂地形地貌特征对数值天气预报影响,基于 3 km 模式重新统计了集合预报初始误差协方差特征,作为区域集合预报初值不确定性特征,并以此调整高分辨集合预报扰动结构;采用多尺度混合扰动初值产生方法以包含局地小尺度不确定性信息;更新侧边界条件以减少侧边界虚假波动影响;基于诊断方法开发了对冬奥赛事运行有重要影响的能见度、大风、降水相态等产品等,从而建立了复杂地形条件下冬奥赛区高分辨率集合预报系统。

1.1.1 初值扰动方法

区域模式需要准确描述中小尺度天气系统,同时也受到大尺度天气系统的影响,区域集合预报需要能够同时描述模式所能分辨的多种尺度的扰动信息。Wang et al(2011;2014)和 Zhang et al(2015a;2015b)利用滤波技术和谱分析方法,对全球集合预报大尺度扰动进行低通滤波而保留较大尺度扰动结构,对区域集合预报小尺度扰动进行高通滤波而保留中小尺度扰动结构,由此获得不同尺度的初值扰动量。但是,由于目前集合成员数量太小(集合成员均为 15 个),对应的初始扰动场远远不能覆盖区域模式概率密度函数描述的相空间,无论是全球集合预报的扰动信息,还是区域集合预报的扰动信息,两

种不同来源的扰动信息重叠冗余部分很少,来自全球集合扰动信息和区域集合扰动信息都可以充实和丰富区域模式初值不确定的描述能力,因此,本研究采用多尺度混合初值扰动技术构造高分辨率区域集合预报初始扰动场。考虑全球集合预报和区域集合预报描述的大气运动尺度特征和不确定性信息存在显著差异,构造融合源于全球集合预报较大尺度的扰动信息和区域集合预报自身循环产生的中小尺度扰动信息的多尺度混合初值扰动场。

区域模式自身扰动循环采用集合变换卡尔曼滤波(ETKF)初值扰动方法。ETKF方法是一种次优的卡尔曼滤波(Wang and Bishop, 2003; 马旭林, 2008),它通过集合预报扰动的协方差矩阵来估计预报误差协方差矩阵。增长模繁殖法(BGM)中,每次繁殖循环后得到的预报扰动,需要乘以一个固定的尺度化算子使其扰动量级减小,从而得到分析扰动,与BGM方法不同的是,ETKF方法是通过将预报扰动乘以一个变换矩阵 $\mathbf{T}$ 来使之变为分析扰动的,即

$$\mathbf{X}^a = \mathbf{X}^f \mathbf{T} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}^a$ 为分析扰动, $\mathbf{X}^f$ 为预报扰动,通过转换矩阵 $\mathbf{T}$ 将预报扰动向量进行线性组合产生当前时刻的分析扰动向量,变换矩阵 $\mathbf{T}$ 的推导过程见 Wang and Bishop(2003)。

由于集合成员数明显少于预报误差方差投影的方向数,式(1)得到的分析扰动协方差达不到真实的分析误差协方差的量级,此时需要在每一次循环,如第 i 次循环引入一个放大因子 Π 来使分析扰动成员的协方差与控制预报分析场的误差方差大体相当,即 t_i 时刻的分析扰动为:

$$\mathbf{X}_i^a = \mathbf{X}_i^f \mathbf{T}_i \Pi_i \quad (2)$$

集合扰动进行中心化扰动时,需要遵守三个条件:(1)中心化后的分析扰动的总和为零;(2)由分析扰动估计的分析误差协方差在中心化前后不变;(3)每个成员的误差方差在中心化前后不变,也就是成员等同性。为了使集合扰动成员相对于集合平均中心化,引入球面单形中心化方案(Wang et al, 2004),在式(2)的基础上乘以矩阵 $\mathbf{U} = \mathbf{C}^T$, $\mathbf{C}$ 是预报扰动向量投影到观测空间中的协方差矩阵的特征向量,根据此得到 ETKF 方法的最终表达式:

$$\mathbf{X}_i^a = \mathbf{X}_i^f \mathbf{T}_i \Pi_i \mathbf{C}^T \quad (3)$$

然后,对大尺度扰动场 $\mathbf{X}^{ga}$ 和区域 ETKF 初值扰动场小尺度扰动场 $\mathbf{X}^{ra}$ 进行融合,得到混合初值扰

动场 $\mathbf{X}^{ma}$:

$$\mathbf{X}^{ma} = \mathbf{X}^{ga} + \mathbf{X}^{ra} \quad (4)$$

混合扰动场既包含大尺度信息,又具有中小尺度信息,最后通过尺度调整因子调整混合扰动场的扰动幅度,使之具有动力意义的、误差快速增长的特性。

1.1.2 模式扰动方法

采用随机物理过程倾向项扰动方案(SPPT)表征模式不确定性。方案通过随机扰动净倾向来表示模式不确定性,从而改善集合离散度与概率预报技巧。即:

$$\delta X_p = \Psi(\lambda, \varphi, t) \delta X \quad (5)$$

式中:第一项 δX_p 表示模式积分过程扰动的物理倾向, δX 为模式物理倾向项,而 $\Psi(\lambda, \varphi, t)$ 表示随机扰动项。本扰动方案基于一阶 Markov 过程的随机扰动,产生的随机扰动为时间和空间的函数,在空间和时间上相关,同时,扰动场服从正态分布结构。

1.1.3 侧边界更新

区域模式通过标准初始化过程产生初始场和侧边界条件。前面基于多尺度混合初值扰动方法产生包含多种扰动信息的新初始场,这些新初始场中包含的扰动信息与来自全球集合预报初始化过程产生的侧边界条件中包含的扰动信息不一致,会在边界区域产生虚假扰动,影响模式预报效果(Caron, 2013)。考虑初值和侧边界条件存在的不连续、不匹配情况,参考 CMA-MESO 同化系统更新侧边界条件的方法,在完成混合初值扰动技术产生新的初始场以后,再对模式侧边界条件进行更新,使新的初值和侧边界条件匹配,减少不连续和虚假波动影响。

1.2 北京冬奥气象保障针对性产品开发

根据北京冬奥服务需求和敏感气象要素,重点关注赛前和赛事期间大风、低温(风寒)、低能见度、降雪等高影响天气,开发集合预报能见度、极端风、降水相态产品,为北京冬奥气象保障提供更有针对性的预报产品。

(1) 大气能见度

大气能见度是气象观测的常规项目,它是表征大气透明程度的一个重要物理量(傅刚等, 2009)。目前数值研究工作中普遍采用的是根据消光系数计算出大气的水平能见度,公式是 Stoelinga and Warner(1999)给出的:

$$vis = -\ln \varepsilon / \beta \quad (6)$$

式中: vis 是水平能见度, 单位: m; ϵ 为常数, 取值为 0.02; β 为消光系数。该经验公式被后来的数值研究工作普遍采用, 为水平能见度的数值预报建立了可行方案, 消光系数又可细分为四个部分, 分别为云水、雨水、冰和雪的影响, 表示为:

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 \quad (7)$$

$$\text{云水: } \beta_1 = 144.7C_1(0.88) \quad (8)$$

$$\text{雨水: } \beta_2 = 2.24C_2(0.75) \quad (9)$$

$$\text{冰: } \beta_3 = 327.8C_3(1.0) \quad (10)$$

$$\text{雪: } \beta_4 = 10.36C_4(0.7776) \quad (11)$$

$$C_1 = Q_c / \left\{ \left[\frac{287.04T(1 + 0.608Q_v)(1 + Q_v)}{p} \right] + \frac{Q_c + Q_r}{1000} + \frac{Q_i + Q_s}{917} \right\}$$

$$C_2 = Q_r / \left\{ \left[\frac{287.04T(1 + 0.608Q_v)(1 + Q_v)}{p} \right] + \frac{Q_c + Q_r}{1000} + \frac{Q_i + Q_s}{917} \right\}$$

$$C_3 = Q_i / \left\{ \left[\frac{287.04T(1 + 0.608Q_v)(1 + Q_v)}{p} \right] + \frac{Q_c + Q_r}{1000} + \frac{Q_i + Q_s}{917} \right\}$$

$$C_4 = Q_s / \left\{ \left[\frac{287.04T(1 + 0.608Q_v)(1 + Q_v)}{p} \right] + \frac{Q_c + Q_r}{1000} + \frac{Q_i + Q_s}{917} \right\} \quad (12)$$

式中: T 为温度, 单位: K; Q_c, Q_r, Q_i 和 Q_s 分别表示云水、雨水、冰水和雪水的混合比, 单位: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; p 为地面气压, 单位: hPa; C_1, C_2, C_3 和 C_4 分别表示云水、雨水、冰水和雪水的液态水含量。

(2) 阵风产品

大风天气对冬奥会赛事影响非常明显, 往往会导致比赛临时中断、赛程调整甚至取消, 加强大风灾害的预报对赛事保障至关重要。基于数值模式的近地面风速预报是冬奥会气象保障的关键一环。本研究采用的阵风产品诊断公式* 为:

$$GUST = \sqrt{U_{10}^2 + V_{10}^2} + (\sqrt{U_{lpl}^2 + V_{lpl}^2} - \sqrt{U_{10}^2 + V_{10}^2}) \times [1.0 - \min(0.5, ZPBL/2000)] \quad (13)$$

从边界层高度的混合动量来计算地面阵风。其中, $GUST$ 表示地表最大阵风风速, $ZPBL$ 表示大气边界层的高度, U_{10} 和 V_{10} 分别表示 10 m 风分量,

U_{lpl} 和 V_{lpl} 分别表示边界层高度的风分量。

(3) 降水相态产品

降水相态预报就是预报降水时的降水类型及降水发生的时段, 包括液态(降雨)、固态(降雪、冰粒、冻雨等)以及混合态(雨夹雪)3 种。目前, 考虑到不同降水相态的算法均不能完全准确地诊断所有类型的降水, 数值预报中心模式后处理采用 4 种算法进行集合, 根据不同方案中相同结果最多的, 并根据降水相态造成危害的程度确定最终的诊断结果(佟华和张玉涛, 2019)。这 4 种算法分别是 BTC 方案(Baldwin et al, 1994)、改进的 BTC 方案、Ramer 方案(Ramer, 1993)和 Bourgoiuin 方案(Bourgoiuin, 2000)。其中, BTC 方案是基于观测的热力垂直廓线, 用一些经验性的常数和公式设定来检查水凝物在降落过程中的温度垂直廓线结构, 从而判断水凝物到达地面的降水相态。Ramer 方案是根据地面降水的冰分数和近地面的湿球温度来判断是哪种降水相态。Bourgoiuin 方案基于能量的观点, 用是否有足够的能量使水凝物融化或者冰冻来判断降水相态。输出结果包括冻雨、冰粒、雪、雨。

1.3 试验资料和试验时间

本文研究内容采用 CMA-MESO 为基础的高分辨率区域集合预报试验系统, 模式垂直层次为 51 层, 水平格距为 0.03° , 格点数为 533×467 , 试验区域是以北京为中心的华北区域, 具体模式范围和地形信息参考图 1, 集合预报成员数为 14 个集合扰动成员和 1 个控制预报成员, 一共 15 个集合成员, 侧边界扰动由中国气象局数值预报中心 T639 全球集合预报系统提供。考虑试验区域范围、中纬度地区大气运动的速度和冬奥气象保障时效要求, 本试验预报时效为 36 h。集合预报试验检验所需的等压面要素纬向风 U 、经向风 V 、温度 T 、高度 H 和地面 2 m 百叶箱温度、10 m 风速的实况资料为 CMA-MESO 同化分析场。对于降水预报检验, 采用了国家气象信息中心华北地区国家级自动观测站的站点降水观测资料。

由于北京冬奥会的举办时段为 2022 年 2 月 4—20 日, 在冬奥会开展前的同期时段, 都是冬奥气象保障能力的关键测试时期。因此, 本研究以 2019 年 2 月 1—15 日为时间段开展连续半个月的预报试验。

* 阵风产品诊断公式来自于 CMA-MESO 统一后处理诊断程序 cal_gust.F

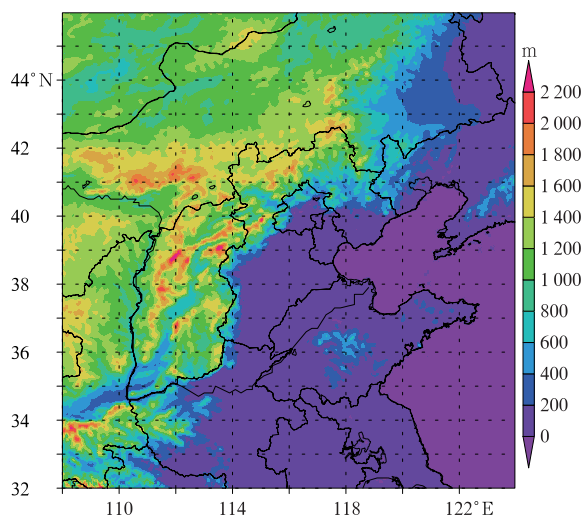


图1 高分辨区域集合预报系统
预报范围和地形

Fig. 1 Domain and terrain of the 3 km high resolution regional ensemble prediction system

2 高分辨区域集合预报冬奥气象保障能力检验

为考察高分辨区域集合预报冬奥气象保障能力,需要通过等压面要素、近地面要素综合检验评估模式的综合预报能力。连续性变量的检验主要考虑离散度-技巧关系,离散型降水变量检验包括 AROC 评分和 Brier 评分。图 2 表示集合预报不同要素(温度场和风场)、不同层次(低、中、高)的控制预报、集合平均均方根误差以及集合离散度。其中,集合平均是包括控制预报在内的 15 个集合成员的等权重数学平均(下同)。从图 2 可见,总体来说,无论温度场还是风场,集合预报平均值的均方根误差基本小于等于控制预报误差,体现了集合平均相对控制预报的优势,即集合预报对确定性预报具有一定的改善作用,这是由于集合平均过滤掉了集合成员的不确定因素。但不同要素在不同层次上表现不一样:比如,500 hPa 温度场的集合平均和控制预报基本相同,而风场 U 分量则在高层与控制预报误差基本一样(图 2b),说明集合预报还需要进一步改进。集合平均均方根误差和集合预报离散度的关系是衡量集合预报系统可靠性的一个重要标准,一个好的集合预报系统的集合平均均方根误差和集合离散度应该基本一致。从各个变量各个层次相互关系来看,预报变量中高层两者一致性关系较好,且集合离散度与均方根误差随预报时效延长呈增长趋势(图

2a~2d),在一定程度上体现了预报的不确定性;但两种变量低层离散度明显,而且初始时刻,离散度高于均方根误差(图 2e,2f),说明如何改善低层预报要素的离散特征,是发展高分辨区域集合预报系统(水平 1~4 km 分辨率)面临的技术挑战。

地表要素预报,特别是温度、风、降水预报,是保障赛事运行和运动员表现的重要外部因素。图 3 为 2 m 温度集合平均误差,预报时效内误差一直缓慢增长,24 h 预报误差略高于 2.5 °C,36 h 最高超过 3 °C 以上,虽然与冬奥气象保障要求的 24 h 温度预报偏差在 ±2 °C 内还有一定差距,但 3 km 的集合预报系统提供了未来大气状况变化的更多可能性信息,为预报员制定预报结果提供了修正空间。检验结果表明,地面气象要素,尤其是温度的预报误差,还需要针对性改进和订正,后面可以通过改进模式下垫面描述能力、资料同化、改进预报模式等方法解决。从地面风速预报检验来看,风速预报均方根误差 24 h 基本小于 2 m·s⁻¹,36 h 略高于 2 m·s⁻¹,与 EC 地面要素预报结果相比,还存在一定差距,但与大部分其他业务模式平均预报误差比较,已经具有一定优势(参考中国气象局数值预报中心业务检验评估和区域高分辨数值预报检验评估结果)。

AROC 利用相对作用特征曲线来衡量,其原理是将信号探测理论应用到数值天气预报的二分类要素预报的检验方法中,在每个格点上,考虑一个事件(如降水)发生或不发生两种状态。检验的结果为预报正确、空报和漏报,用双态分类联列表表示。将命中率沿着假警报率增加方向积分,可以得到 ROC 面积,即 AROC,来描述预报系统的能力。AROC 面积越大,表明概率预报技巧越高。6 h 累计降水量阈值分别设为 0.1、4.0 和 13.0 mm,降水量级为小、中、大。由图 4 可见,检验时段对于降水小量级、中级评分均大于 0.5,说明概率预报有正技巧,但对于大量级降水预报,AROC 约等于 0.5,预报没有技巧。说明试验期间,虽然经历两次寒潮过程,试验区发生多次降水,高分辨区域集合预报对小到中雪预报技巧较好,对大量级降水预报而言,因本次过程基本达不到该量级,因此评分意义不大。

Brier 评分(简称 BS)为均方概率误差,是一种用来检验概率预报准确性的传统方法,BS 取值范围为 0~1,越小越好。对于 BS 评分而言,各个级别降水评分值都比较低,说明集合概率与真实观测概率的偏差不大,降水预报准确性较好;预报降水量级从

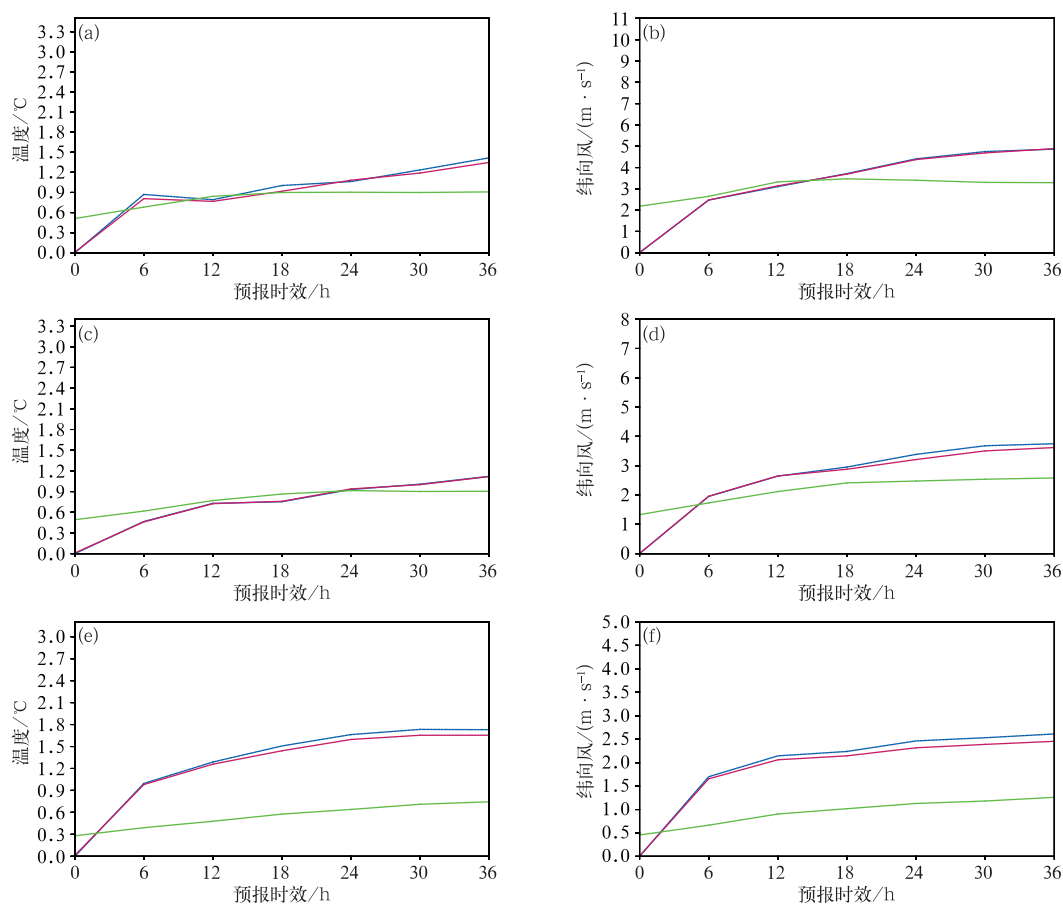


图 2 2019 年 2 月 1 日 00 时至 15 日 00 时 250 hPa(a,b), 500 hPa(c,d), 850 hPa(e,f) 平均温度场(a,c,e) 和纬向风 U 分量(b,d,f) 的控制预报均方根误差(蓝线)、集合平均均方根误差(红线) 和集合离散度(绿线) 随预报时效的演变
(每日两个起报时次: 00 时和 12 时, 共计 29 时次, 世界时, 下同)

Fig. 2 Evolution with forecast timeliness of control forecast root-mean-square error (RMSE) (blue line), ensemble mean RMSE (red line) and ensemble spread (green line) of temperature field (a, c, e) and U component of zonal wind (b, d, f) at 250 hPa (a, b), 500 hPa (c, d), 850 hPa (e, f) on average from 00 UTC 1 to 00 UTC 15 February 2019 (two starting times every day: 00 UTC and 12 UTC, totally 29 times, the same below)

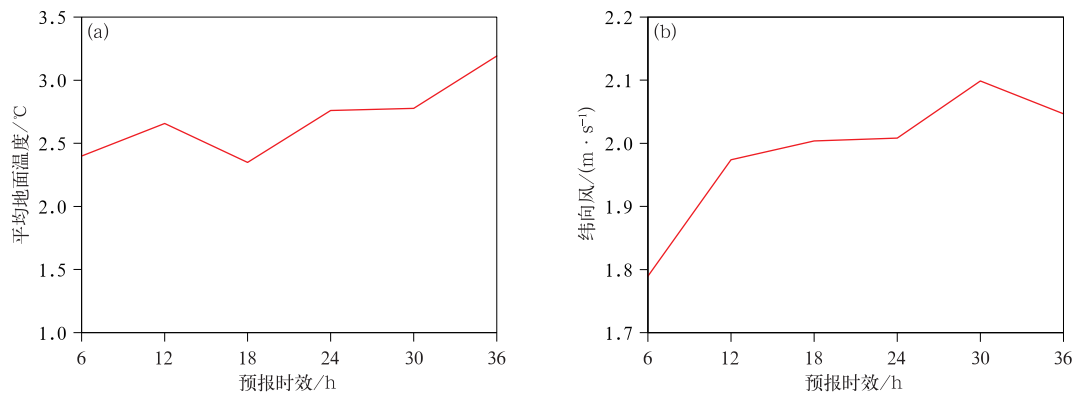


图 3 同图 2, 但为平均地面温度场(a) 和纬向风 U 分量(b) 的集合平均均方根误差
Fig. 3 Same as Fig. 2, but for ensemble mean RMSE of surface temperature field (a) and U component of zonal wind field (b) on average

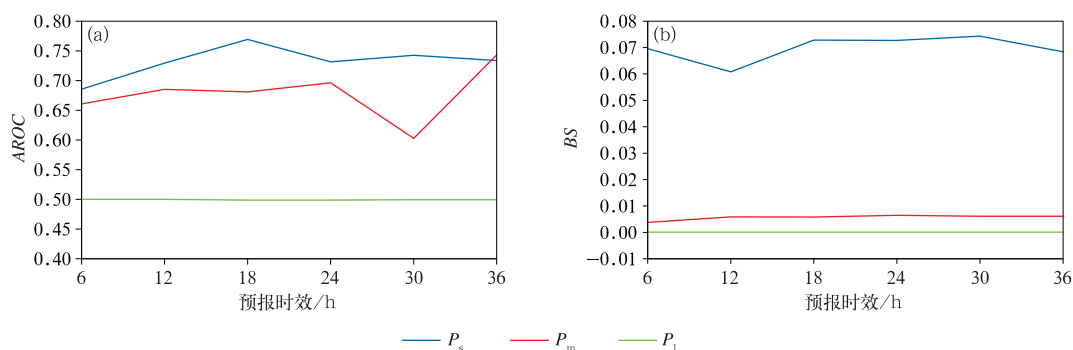


图4 2019年2月1日00时至15日00时的6 h累计降水 AROC(a)和BS(b)评分随预报时效演变
(P_s , P_m 和 P_l 分别表示降水量级小、中、大,降水阈值划分为6 h累计降水量达到0.1、4.0和13.0 mm)

Fig. 4 Evolution with forecast timeliness of AROC (a) and BS (b) score of 6 h accumulated precipitation from 00 UTC 1 February to 00 UTC 15 February 2019
(P_s , P_m and P_l represent small, medium and large precipitation magnitudes respectively, the precipitation threshold is divided into 0.1, 4.0 and 13.0 mm within 6 h)

小到大,评分依次降低,同样对于大的降水量级统计评分意义不显著。

3 冬奥赛事高影响事件天气学分析及检验

3.1 天气过程简介

模式开展的2019年2月1—15日的连续高分辨区域集合预报试验期间,包含了两次冷空气南下

影响我国大范围区域的过程,华北地区出现大风、降温 and 降雪。第一次过程发生在6—10日,第二次过程为14—15日,分别有强冷空气和中等强度冷空气南下。第一次冷空气降温幅度较大,中东部大部分地区出现4~6级偏北风、阵风7~8级,华北气温下降6~10℃;华北西部、黄淮等地出现小到中雪或雨夹雪;第二次过程导致华北北部出现4~5级偏北风,华北南部气温普遍下降4~6℃,发生小到中雪或雨夹雪过程。第一次过程(图5a),500 hPa有欧亚大陆中高纬阻塞高压发展东移,阻塞高压东部出

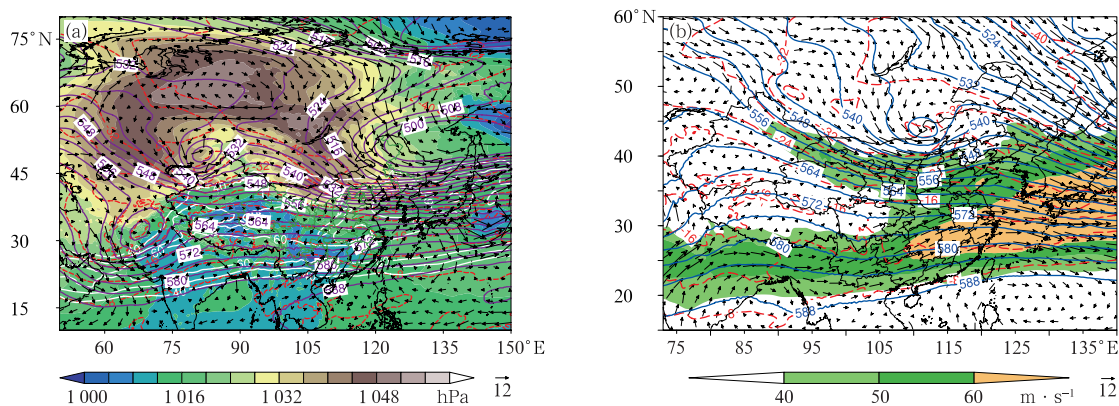


图5 2019年2月两次过程的天气形势

(a) 6日12时500 hPa位势高度(紫色线,单位:dagpm)、温度(红色线,单位:℃)和850 hPa风场(风矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(填色为地面气压;白色线为200 hPa风速 $\geq 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区域);(b)14日06时500 hPa位势高度(蓝色线,单位:dagpm)、温度(红色线,单位:℃)和700 hPa风场(风矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (填色为200 hPa风速 $\geq 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区域)

Fig. 5 Synoptic situation of two processes in February 2019

(a) 500 hPa geopotential height (purple line, unit: dagpm), temperature (red line, unit: °C) and 850 hPa wind field (wind vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 12 UTC 6 (colored: ground pressure; white line: 200 hPa wind with speed $\geq 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) 500 hPa geopotential height (blue line, unit: dagpm), temperature (red line, unit: °C) and 700 hPa wind field (wind vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 06 UTC 14 (colored area: 200 hPa wind with speed $\geq 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

现切断低涡,来自阻塞高压和低涡的干冷偏北风和东北风南下汇入到华北地区上空的槽后,高空槽东移时,槽后偏北大风影响到华北地区,产生强烈降温。同时,华北也位于 200 hPa 高空急流出口区左侧,为强高空辐散。地面为大范围冷高压控制,高压东部偏北风环流携带洋面上的水汽进入陆地,华北地区处于地面高压南部的东风气流中,偏东风水汽输送明显。近地面西北大风与偏东风气流辐合抬升形成上升运动,配合中层低槽和高层辐散,低层水汽辐合抬升,最终造成降水和降雪。第二次过程中,对流层中层 500 hPa 有高空槽东移发展加强(图 5b),槽区正涡度发展,有低涡形成,200 hPa 上空有明显高空急流维持,华北地区正好位于 500 hPa 槽前上升气流区,也基本处于高空急流入口区左后侧,高层辐散效应明显。700 hPa 上则位于低涡南部槽区干冷的西北风与来自南方相对暖湿的西南风的辐合带北部,从低层到高层均为有利的环流配置,利于上升运动维持加强和水汽抬升。

3.2 地表要素预报检验分析

3.2.1 第一次寒潮大风过程

近地面温度和风场变化对冬奥赛事影响较大,是冬奥期间需要重点关注的两个物理量。预报期间的两次冷空气南下均引发大风降温,第一次过程风速较大,降温明显,对这次过程的预报情况分析主要针对降温和大风过程。图 6a,6b 显示,集合预报的平均 2 m 温度预报与同时次的实况较为一致。从高分辨区域集合预报 24 h 集合平均预报可见(图 6a),内蒙古和河北北部地区温度为 -24°C 以上,同一纬度地区西部温度低于东部地区,显示寒潮过程自西向东方向移动,与实况吻合较好。预报不确定性(集合离散度)较大区域与寒潮移动过程密切相关(预报区域西部离散度较高),说明寒潮天气过程大气发展演变非线性特征显著,不同集合成员对于寒潮降温幅度预报存在一定差异,这种集合预报不同成员的敏感性特征对实际预报中确定寒潮影响关键

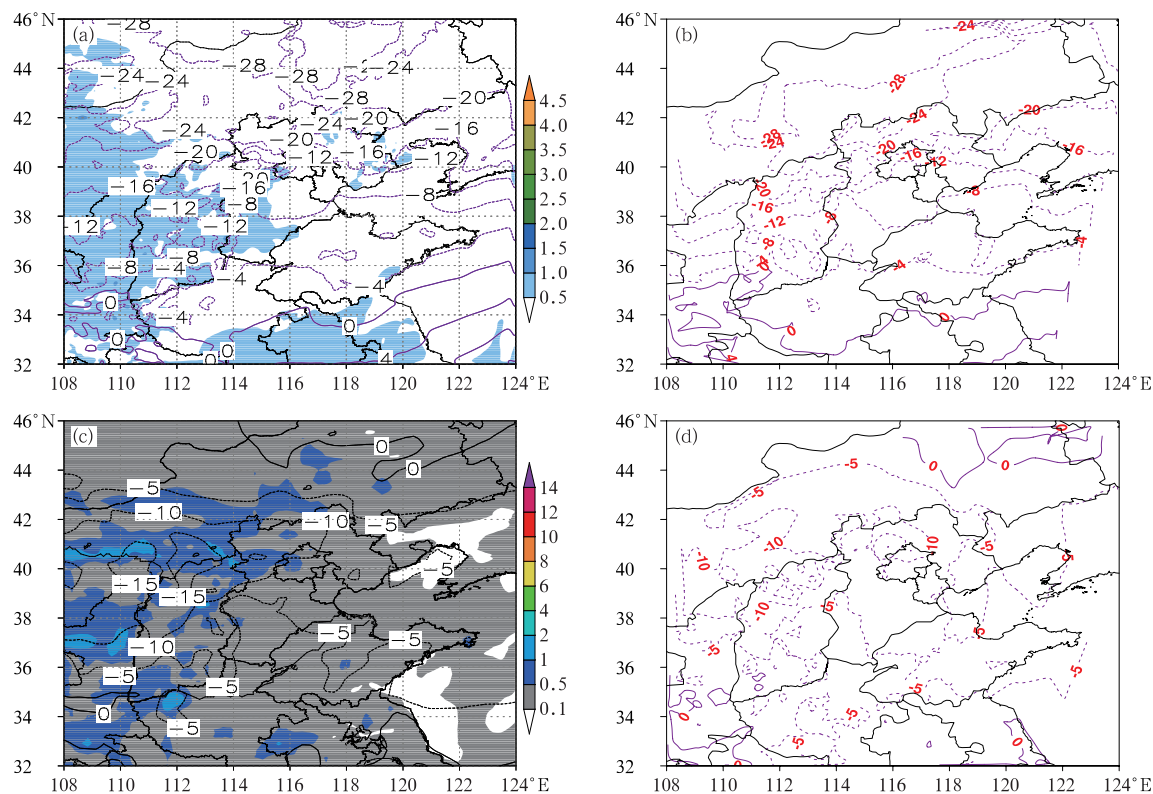


图 6 2019 年 2 月 7 日 00 时地面温度(a,b,距离地面 2 m 高度)和 24 h 变温(c,d)(单位: $^{\circ}\text{C}$)

(a,c)6 日 00 时 24 h 预报,(b,d)对应实况

(图 6a 和 6c 中等值线表示集合平均,填色表示离散度)

Fig. 6 Ground temperature (a, b, 2 m above the ground) and 24 h temperature variation (c, d) at 00 UTC 7 February 2019 (unit: $^{\circ}\text{C}$) (a, c) 24 h forecast at 00 UTC 6, (b, d) corresponding observation
(In Figs. 6a and 6c, isoline represents the ensemble mean, and the colored area represents the spread)

区位置具有一定参考价值。在 24 h 变温预报中(图 6c),京津冀地区均有大幅度降温,张家口和北京地区预报 24 h 变温为 -10°C ,强度与实况降温幅度(降温约 $7\sim 12^{\circ}\text{C}$)相当,达到冷空气过境后日最低气温 24 h 内下降 8°C 及以上的寒潮标准,虽然降温预报降温范围略大于实况,但是系统还是较好地预报了这次强降温过程。图 7a,7b 为预报的大风与实况对比:从集合预报 24 小时 10 m 风平均值和离散度来看,即便是集合平均风场,也显示了有一个气旋性扰动气流经过北京地区。同时,沿太行山地区,有一条明显的西南—东北走向的风切变线,与观测实况较为一致;除黄渤海地区显著的大风过程外,山区(太行山和冬奥赛区)风速普遍高于平原地区,北京地区风速离散度达到 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,不同集合成员地面风预报差异较大,指示出类似的大风降温过程对开展室外雪上项目明显有不利影响。

3.2.2 2月14日北京周边降雪过程

第二次寒潮过程以降雪为主要特征,发生小到中雪或雨夹雪过程,本文主要关注这次过程的地表风速预报和降水预报。

图 8a,8b 为第二次寒潮过程预报的地表风与实况对比。从 24 h 预报 10 m 风平均值和离散度来看(图 8a),15 日 00 时,华北北部、黄渤海地区风速较大,冬奥赛区北京和张家口地区风力较高,北京佛爷

顶风力实况达到 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,虽然预报风速略偏大,但总体大风区分布和量级与实况吻合较好;与第一次寒潮过程类似,风场预报离散度较大区域依然位于太行山和军都山等地,说明复杂地形对数值预报结果影响明显,预报不确定性较大,而冬奥雪上项目均位于复杂山区,在提高数值预报模式精细预报能力的同时,需要考虑模式预报的不确定性,这也是高分辨区域集合预报的优势所在。

图 9 为第二次寒潮过程高分辨区域集合预报降水集合平均值和观测实况,从预报结果来看,虽然各个集合成员包括控制预报在内,在华北北部地区预报降雪量较实况普遍偏大,但集合预报对本次降雪过程的预报落区和与实况吻合较好,特别是北京和张家口地区普降中到大雪,对降雪还是有较好的预报效果。

3.2.3 2月14日北京周边降雪过程典型测站单点检验评估

集合箱线图是显示集合预报值概率分布情况的图形,能够定点地显示特定气象要素随时间的分布特征和演变趋势,可以同时显示集合预报的平均信息(中位数)和集合预报的不确定性(盒子的长度)。以 2 月 14 日北京周边降雪过程为例,主要针对地形比较复杂,预报难度较大的崇礼赛区和延庆赛区典型测站的单点集合预报结果开展检验评估。评估要

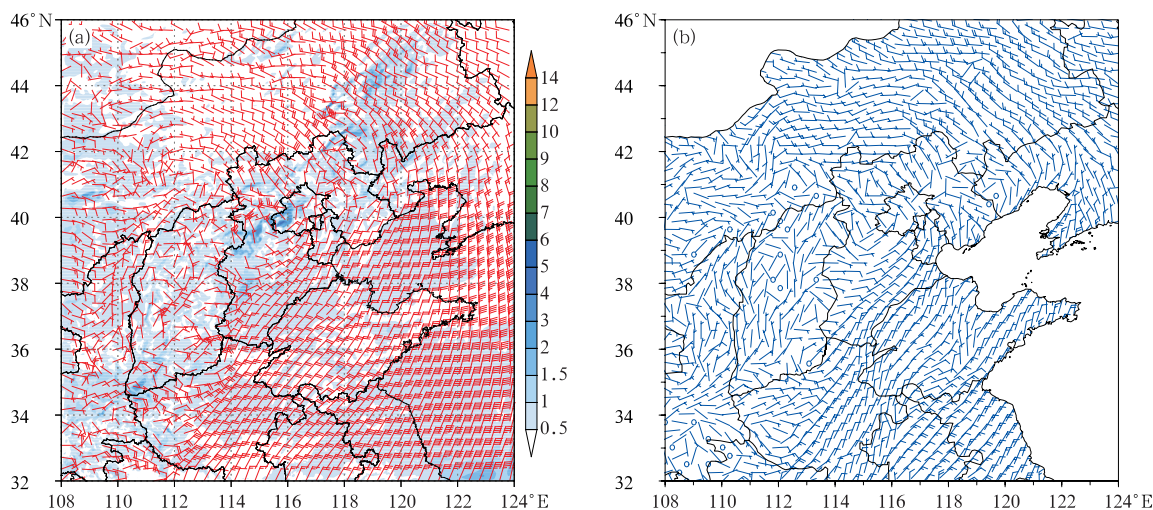


图 7 2019 年 2 月 7 日 00 时地表风速(距离地面 10 m 高度,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

(a)6 日 00 时 24 h 预报,(b)对应实况

(图 7a 中风杆表示集合平均,填色表示离散度)

Fig. 7 The ground wind (10 m above the ground, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 00 UTC 7 February 2019

(a) 24 h forecast at 00 UTC 6, (b) corresponding observation

(Wind pole represents the ensemble mean, and the colored area represents the spread in Fig. 7a)

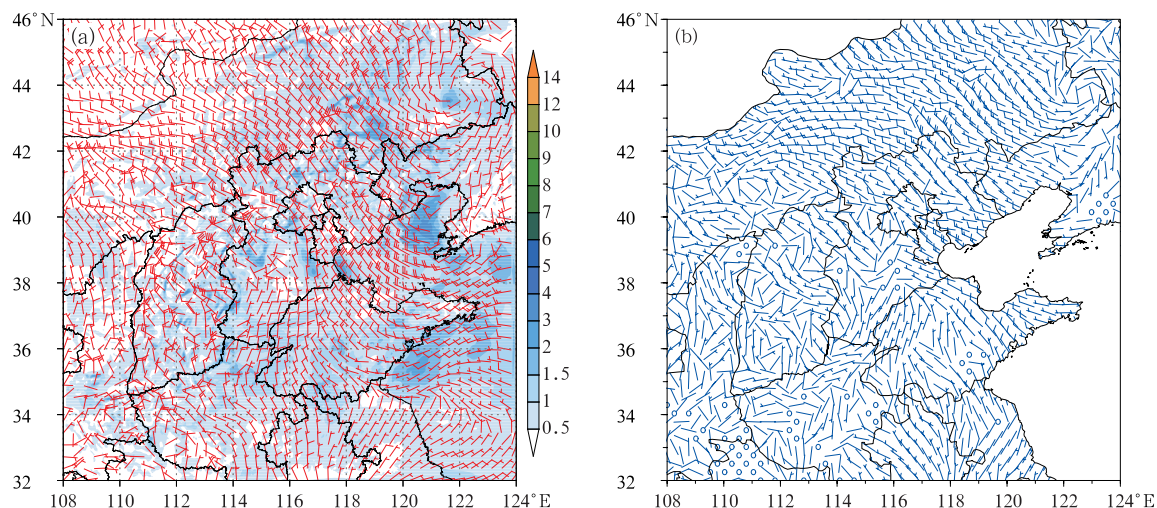


图 8 同图 7, 但为 2019 年 2 月 15 日 00 时

Fig. 8 Same as Fig. 7, but at 00 UTC 15 February 2019

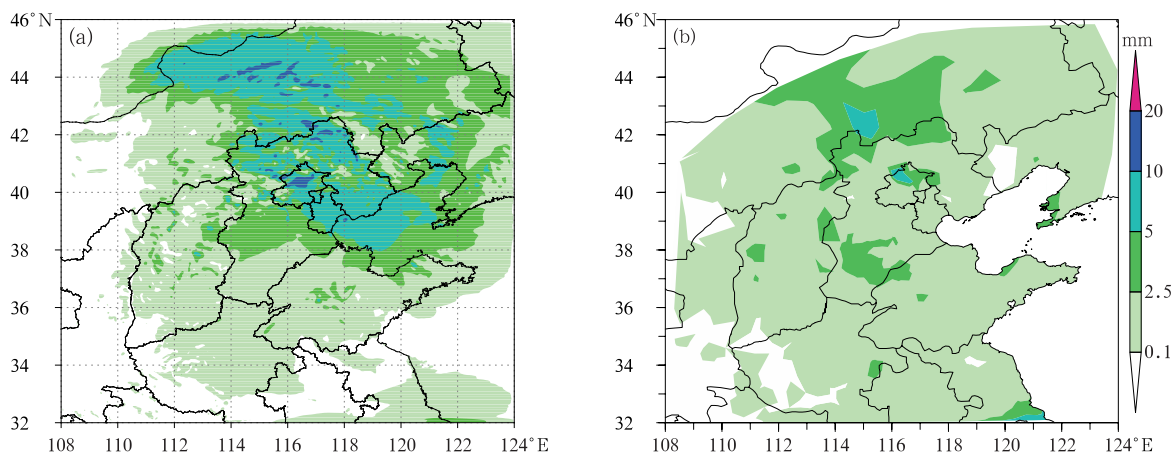


图 9 2019 年 2 月 14 日 00 时至 15 日 00 时 24 h 集合平均(a)和对应实况(b)累计降水

Fig. 9 The 24 h accumulated precipitation of ensemble mean (a) and corresponding observation (b) from 00 UTC 14 to 00 UTC 15 February 2019

素为冬奥赛事最关注的要素,图 10 给出崇礼站和延庆佛爷顶站 2 m 温度、逐小时降雪、10 m 风速和比湿箱线图。从崇礼和延庆地区代表站点(海拔高度均超过 1200 m)箱线图要素的结果来看,单站预报要素与实况无论分布特征还是演变趋势均有较好的一致性,预报误差除降雪以外都较小,大部分时效集合平均温度预报误差在 2°C 左右,负偏差居多(预报低于观测值),风速相较于瞬时风速大部是正偏差,偏大 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右(实况风速包括瞬时风、2 min 平均风速和 10 min 最大风速,差别很大);湿度偏差整体效果也较好。针对这次高影响天气过程,不同集合成员对各个要素总体预报差别较小,大

部分时刻分位数和极值均比较集中。然而,这并不意味着集合预报同一预报时刻针对不同地点预报的差异也相同:以地面温度为例,崇礼 6 h 和 24 h 预报箱线图盒子距离比较长,说明这两个时刻集合成员预报不确定性较大,而在延庆佛爷顶则在初始时刻和 18 h 预报不确定性大,特别是 18 h 预报,不同成员预报最大差别可以达到 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 。降雪单点要素预报结果与实况差别较大,但总体趋势与实况很接近,原因除了模式预报偏差以外,可能与实况观测的特点有关,因为在分析降雪实况资料发现,逐时降雪资料通常很小或者没有明确的观测值,但 24 h 累计值却可能较大。此外,箱线图同时给出了集合平

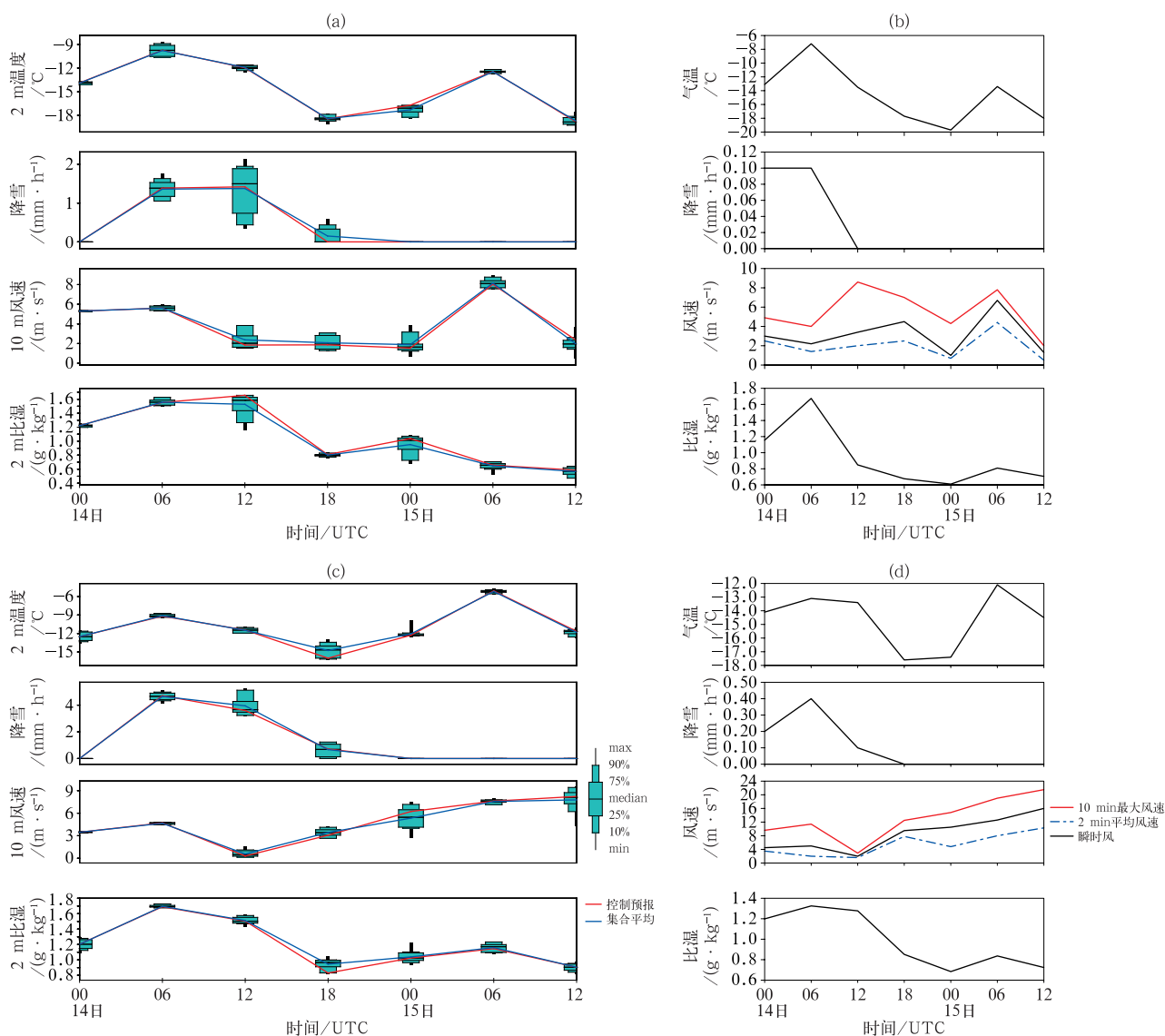


图 10 两个典型代表站点崇礼(a,b)和延庆佛爷顶(c,d)2019年2月14日00时起报
36 h 箱线图要素的天气学检验分析
(a,c)预报,(b,d)实况

Fig. 10 Comparisons between diagram of box-plot (a, c) of 36 h forecast initialized
at 00 UTC 14 February 2019 and corresponding observations (b, d) for
two typical spots at Chongli (a, b) and Foyeding (c, d)

均和控制预报结果,可以为预报提供更丰富的信息。总体来说,针对2月14日降雪过程,针对地面要素36 h预报时效内,各个要素预报误差特别是赛事特别关注的2 m温度和10 m风,基本能满足比赛要求的24 h预报误差温度低于 2°C 、风速小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的要求,同时给出预报不确定性信息,这对于观测资料缺乏、地形复杂、海拔高度较高的地区具有较好的参考价值。

3.3 冬奥气象保障诊断产品检验分析

北京冬奥会是近20年内唯一一次在大陆性冬季风主导的气候条件下举办的冬奥会,能见度、大风、降雪相态等气象条件的预报和预警,是保障北京冬奥赛事运行和影响运动员表现的重要外部因素,需要重点考虑。冬季山地气象预报经验欠缺,预报难度较大。本研究针对北京冬奥气象保障的重点关

注气象条件,在发展高分辨区域集合预报基础上,在后处理系统中也需增加冬奥保障后处理产品,以检验集合预报诊断产品的冬奥气象保障能力。

能见度是影响冬奥赛事的重要因素,不仅直接影响到某些赛事能否举行(比如高山滑雪和自由式争霸赛则要求能见度 >2 km),对赛事后勤支援保障和直升飞机救援等影响也很大。从第一次寒潮过程能见度来看(图 11a,11b),低能见度区域主要位于太行山以及淮河一带,而能见度 24 h 集合平均预报低能见度区域与实况吻合较好,对应区域离散度较大,显示不同集合成员能见度预报差别较大,预报不确定性较大。第二次寒潮过程能见度低值区主要

分布在华北南部广大区域以及内蒙古南部、河北北部和辽西一带(图 11c,11d)。集合预报对此次过程北方地区低能见度区域落区预报较好,而南部低值区域仅在山东、河北一带,在淮河流域广大地区低能见度明显漏报。从能见度预报数值来看,还存在着北方地区能见度预报总体偏低、南部地区偏高问题,还需要进行针对性改进。

大风天气对冬奥会影响特别明显,韩国平昌冬奥会期间发生多起因大风导致比赛推迟和改期的情况。从两次寒潮过程 24 h 阵风集合预报来看,第一次寒潮过程,阵风高值区主要分布在河北北部以及与河北接壤的辽西和内蒙古南部,以及华北南部的

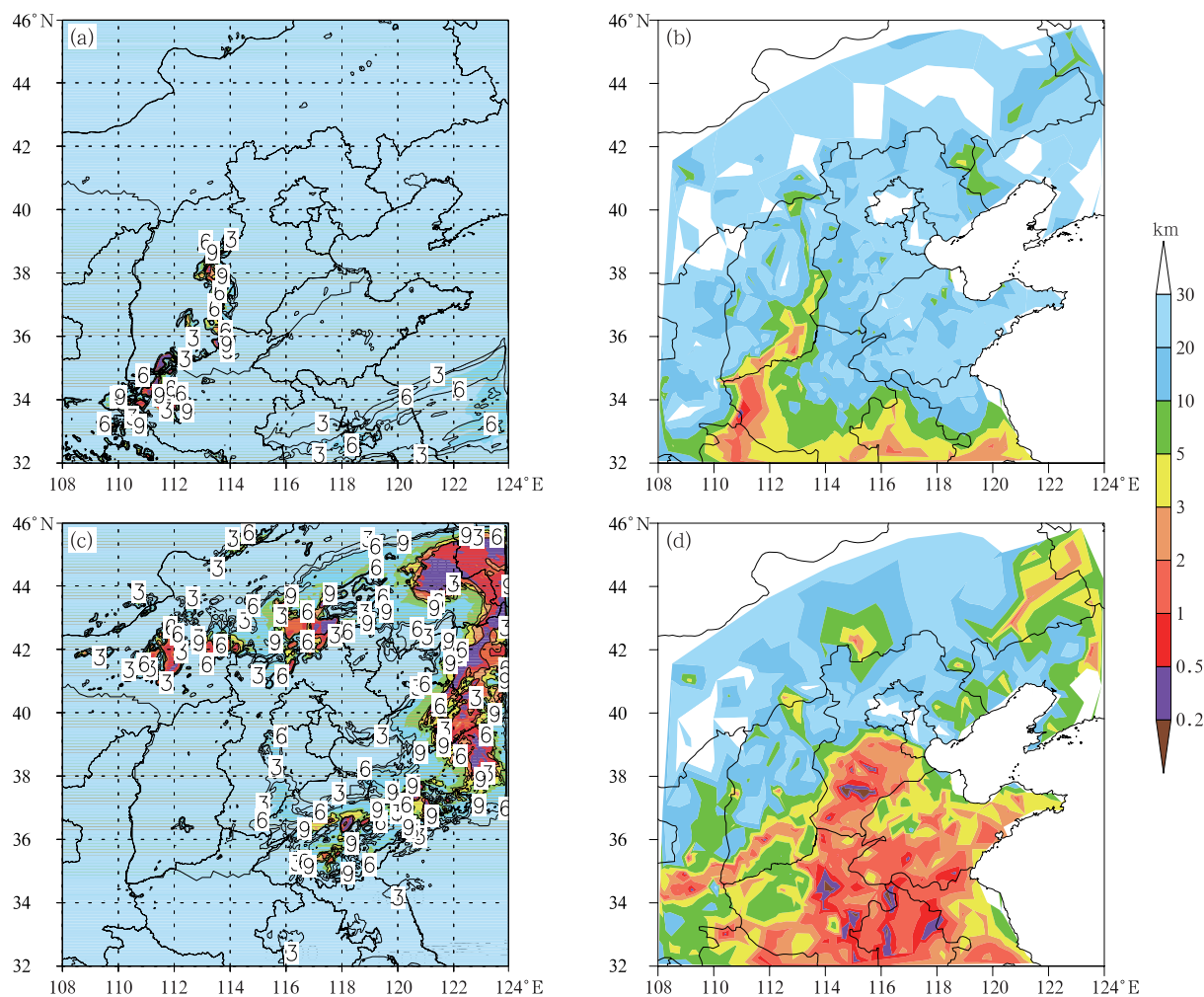


图 11 2019 年 2 月 7 日 00 时(a,b)和 15 日 00 时(c,d)的能见度

(a,c)24 h 预报,(b,d)实况

(图 11a,11c 中填色表示集合平均,等值线表示离散度)

Fig. 11 Visibility at 00 UTC 7 (a, b) and 00 UTC 15 (c, d) February 2019

(a, c) 24 h forecast, (b, d) observation

(Colored area represents ensemble mean and isoline represents the spread in Figs. 11a, 11c)

黄渤海平原地区,与实况非常接近(图 12a,12b);第二次寒潮过程阵风大值区分布在沿太行山脉自西南向东北广大区域,与实况分布也很相似(图 12c,12d),但预报值比实况偏大。比较两次寒潮过程的阵风与实况,并没有发现阵风预报存在系统性偏高的现象;与对应的地面风相比,阵风预报值普遍高 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,更接近观测实况,说明阵风预报相较模式直接输出地面风预报,更能体现室外实际风速极值变化情况,特别是基于集合预报的阵风预报产品可以提供极大风速出现的概率,对冬奥比赛安排具有参考意义。

降水相态是指降水的形态,包括液态(降雨)、固态(降雪、冰粒、冻雨等)以及混合态(雨夹雪)3种。降水相态预报不仅反映冬奥比赛关注的未来天气现象,而且由于降水相态变化引起的雪温、雪质的变化

直接会对室外比赛产生影响。降水相态通常比较复杂,空气中的热力状况和近地面温度对降水相态影响很大,是准确预报地表降水类型的关键(Yang et al, 2021)。地面温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右通常是相态变化的临界点,即 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下降水相态基本是雪, $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时,基本上是雨,在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,出现雨、雨夹雪、雪、冰粒的可能性都有。从两次寒潮过程的降水相态预报邮票图可见(图 13),第一次过程降水量总体较小,降雪主要出现在地面温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以北的山东、河北地区,降雨主要出现在淮河以南地区,在降雨和降雪区过渡地带,出现冰粒现象,而这种过渡带,在实况中比集合预报结果的范围更宽广。第二次寒潮过程出现较大范围的降水天气,从实况和预报来看,降雪分布在山东以北广大地区,降水主要分布在江苏和安徽北部。与第一次过程类似,实况中出现冰粒

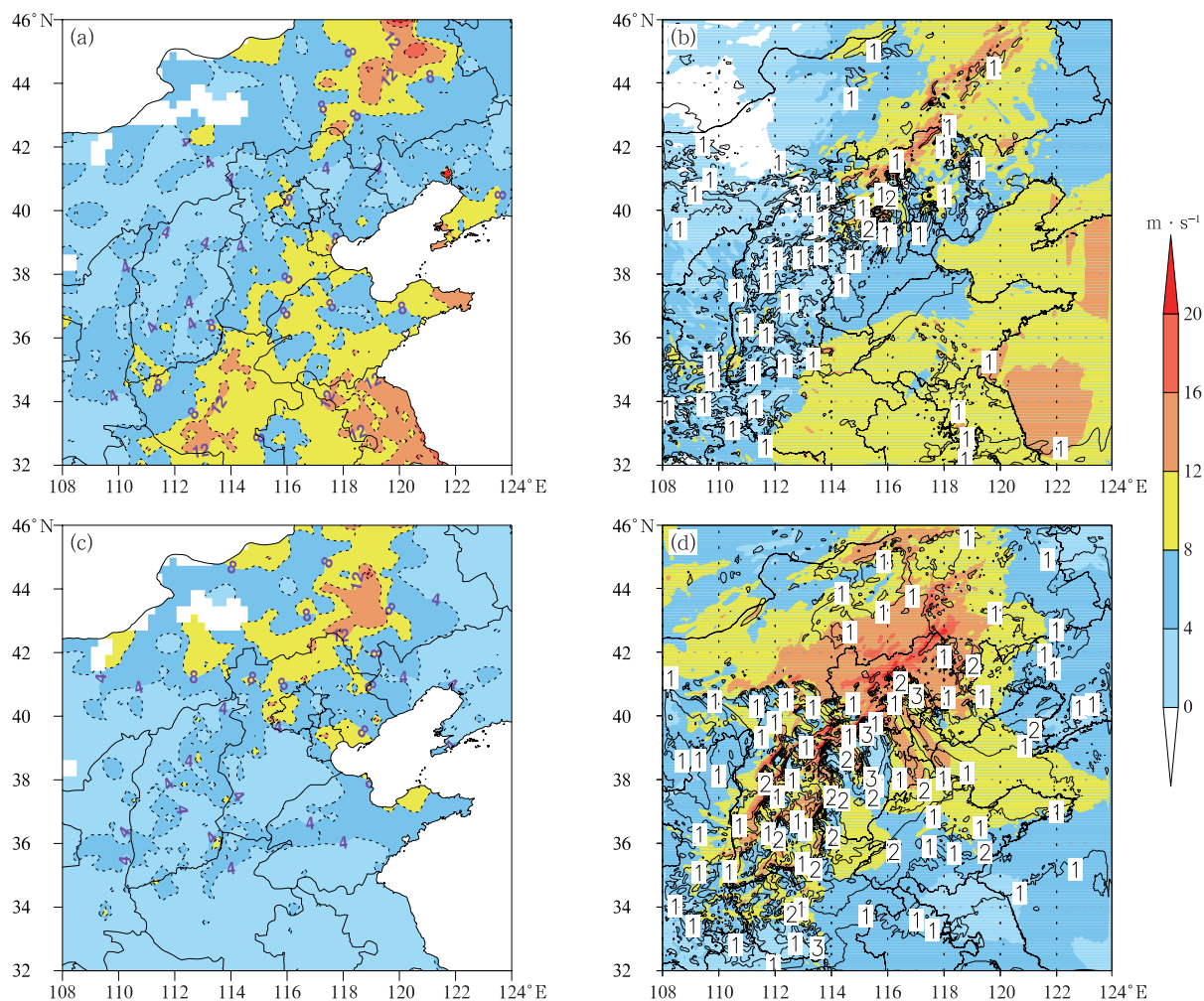


图 12 同图 11,但实况(a,c)和预报(b,d)分别为瞬时大风和阵风预报

Fig. 12 Same as Fig. 11, but for observation (instantaneous gale) (a, c) and gust forecast (b, d)

的大部分区域在模式预报中都统计为降雪,与区域 CMA-MESO 后处理方案倾向于过高估计冻雨和冰粒的预报落区(佟华和张玉涛,2019)的说法不同,需要后续开展更多试验做出判断。另外,在模式预报中,河南部分地区出现冻雨天气,但在实况中记录很少,这也是值得关注的地方,需要后续开展更仔细的对比分析研究。

3.4 高分辨区域集合预报系统后续发展

随着中国气象局全球集合预报系统(CMA-

REPS)业务化,CMA-REPS 的全球背景驱动场将不可避免由 T639-GEPS 转向 CMA-GEPS,加之 CMA-3 km 对流尺度模式全球背景场的变化和云分析技术的应用,国家级区域集合预报业务系统以及冬奥会保障高分辨实时系统技术也随之升级,包括初值扰动技术、侧边界条件更新、模式不确定性以及云分析方案等引入,改进诊断产品,将进一步提升高分辨区域集合预报实时系统冬奥会保障能力,向冬奥会气象保障 24 h 地面温度集合平均预报误差达到 2°C 、地面风速预报误差小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的预报

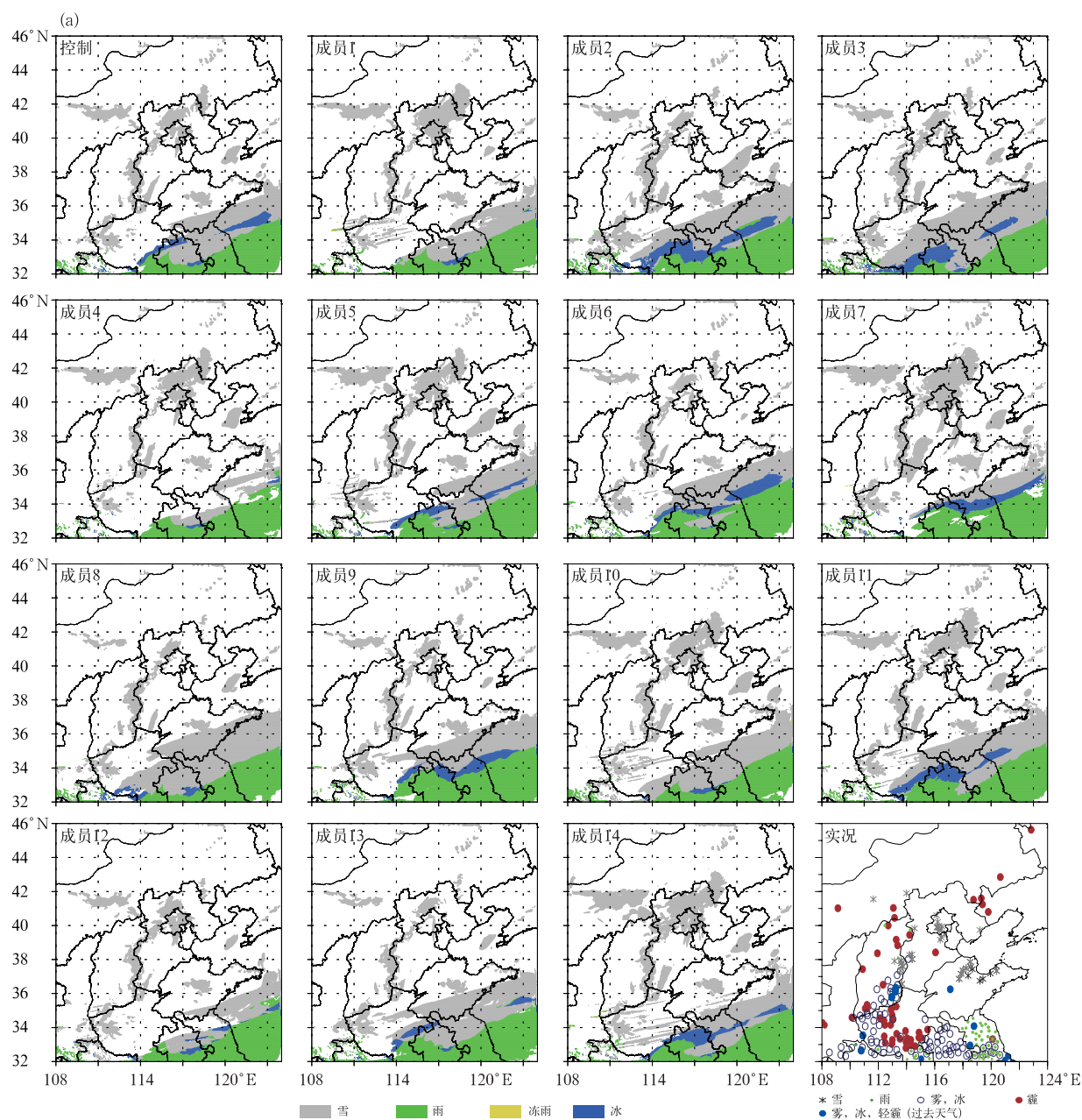
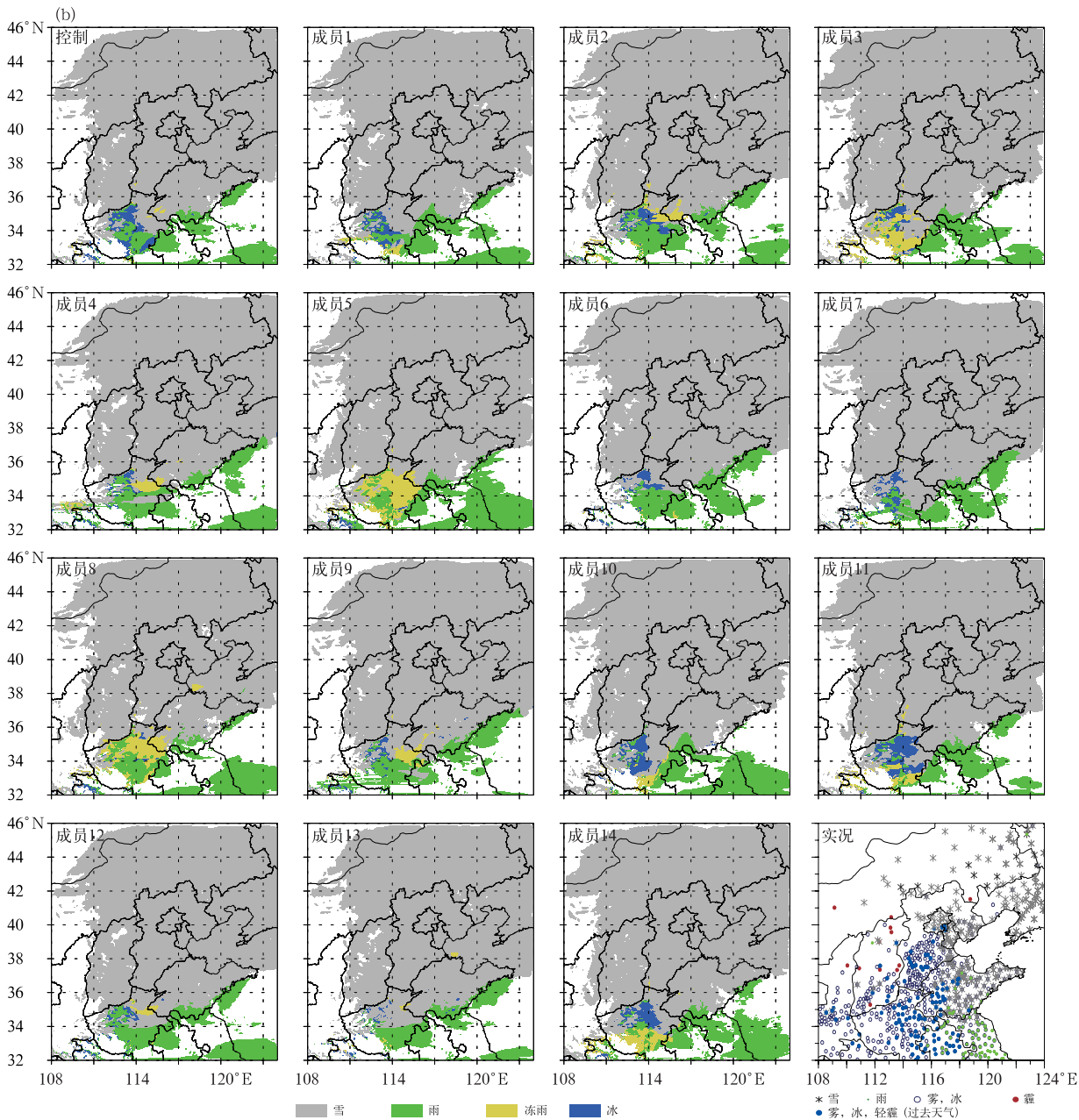


图 13 2019 年 2 月 7 日 00 时(a)和 15 日 00 时(b)降水相态邮票图

Fig. 13 Stamp pictures of precipitation phase at 00 UTC 7 (a) and 00 UTC 15 (b) February 2019



续图 13

continued

要求,发挥概率预报在赛事关注的气象要素阈值预报方面的优势,提高比赛风险管理和评估能力。

4 结论与讨论

本文针对北京冬奥会比赛预报服务需求,在国家级区域集合预报系统基础上,进一步优化初值扰动和侧边界扰动构建方法,针对冬奥气象保障要求,

首次研发了高分辨区域集合预报实时系统,具备了为冬奥气象保障提供实时服务产品和保障能力。针对北京冬奥会比赛时段开展了连续试验,可以为赛事关注的气象要素阈值提供概率预报产品,以便提前做好规避风险准备;开展了试验期间高分辨区域集合预报对主要高影响天气过程的天气检验和统计学检验,评估了高分辨集合预报对冬奥高影响天气过程的预报能力;针对北京冬奥会赛事影响的关键

要素开发了能见度、阵风、降水相态等概率预报产品,提高了对高影响天气过程的预报和服务能力。了解了冬季复杂下垫面条件下高分辨区域集合预报系统现阶段北京冬奥会气象保障能力和存在问题,为进一步分析和改进系统提供依据。主要结论如下:

(1)该研究基于全球集合预报大尺度扰动信息和区域模式自身扰动循环产生的较小扰动信息融合的多尺度混合初值扰动方法,以及高分辨区域集合预报侧边界扰动方法,减低侧边界虚假扰动影响,更新改进了混合侧边界条件信息,是国内针对北京冬奥会保障需求研发的首个CMA高分辨区域集合预报实时系统。统计检验结果表明,主要预报变量高、中、低等压面要素集合平均值的均方根误差小于控制预报误差,表明集合预报相对于单一确定性预报具有优势;此外,集合预报可以给出未来赛事关注的气象要素风险阈值,这是单一确定性预报不具备的优势。地面要素预报检验表明,地面风和温度24 h预报误差略高于 2°C 和 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,接近冬奥气象保障要求24 h温度预报偏差在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、风速误差小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的指标要求;降水预报在小、中等级别降水效果较好(AROC评分高于0.6,试验阶段没有出现大级别降水)。后续需要结合区域CMA模式自身特点,针对冬季山地复杂地形下垫面特点,改进集合预报技术方法,采用地面变量偏差订正技术进一步改进系统预报能力。

(2)试验期间两次寒潮大风过程开展高分辨区域集合预报天气学分析的检验结果表明,通过最普通的集合预报平均值/离散度产品,可较为准确地描述地面温度主要分布特征和寒潮移动过程,24 h达标的寒潮变温预报,变温中心位置与实况吻合,大风预报显示北京等冬奥赛区存在气旋性扰动气流及风切变等。另外,较好地预报出了两次降水的落区和强度,但第二次降雪预报较实况偏大,需对微物理过程进行进一步分析改进。总的来说,高分辨区域集合预报提供了有价值的概率预测信息。

(3)冬奥会气象保障对能见度、大风、降雪相态等气象条件特别关注。本文在CMA模式后处理基础上,针对性开发了相应的能见度、阵风及降水相态等冬奥气象保障产品。两次寒潮过程分析表明,不同集合成员的能见度预报对反映实况十分敏感。阵风预报与实况大值区分布较一致,第二次过程强度稍偏大,输出的10 m风预报、降水相态预报与观测

分布吻合,雨雪分界线,降雨、雨夹雪、雪、冰粒落区范围合理,提升北京冬奥气象保障能力。

数值预报的概率预报业务的发展,是最近三届冬奥会气象预测保障的关键技术,是开展冬奥会服务高时空分辨率无缝隙客观预报和智能化预报服务的核心技术。根据“2022年冬奥会和冬残奥会气象服务需求分析报告(2020版)”,需了解不同比赛项目对气象条件的不同需求,并对气象条件阈值进行综合和提取,另外,针对不同的天气情况,制作相应的气象保障预案。以高山滑雪为例,当气温低于 -15°C 、风力大于5级或气温低于 -20°C 、赛道能见度低于500 m,局部区域能见度低于200 m,日降雪量大于5 cm,2 h降雪量高于2 cm,出现混合性降水或冻雨时比赛暂停。因此,北京冬奥气象保障中,需要提升每一个重要气象要素的预报能力,考虑不同要素之间的组合预报能力。基于本文的研究工作,国家气象中心已经初步建立了3 km高分辨区域集合预报实时保障系统(已完成初值和侧边界条件等技术更新,集合预报能力有提升),提供关键比赛需求的阈值概率预报能力(比如6级大风)和赛事安排风险预警产品,将通过引入分析同化和改进集合预报扰动方法,进一步提高冬奥赛事气象保障能力。

致谢:论文在集合预报后处理和产品制作过程得到了中国气象局地球系统数值预报中心佟华正正高级工程师、高丽高级工程师,王婧卓工程师以及北京城市气象研究院张涵斌高级工程师的鼎力帮助,论文所用观测和检验资料来自国家气象信息中心、国家气象业务内网以及冬奥专项课题组。

参考文献

- 北京冬奥组委体育部,北京2022年冬奥会和冬残奥会气象中心,2020.北京2022年冬奥会和冬残奥会赛区气象条件和大风风险分析报告[M].北京:气象出版社:26. Sports Department of Beijing Winter Olympic Organizing Committee,2020. Beijing 2022 Weather and Wind Analysis Report[M]. Beijing,China Meteorological Press:26(in Chinese).
- 陈静,陈德辉,颜宏,2002.集合数值预报发展与研究进展[J].应用气象学报,13(4):497-507. Chen J, Chen D H, Yan H, 2002. A brief review on the development of ensemble prediction system [J]. J Appl Meteor Sci, 13(4):497-507(in Chinese).
- 陈雨潇,徐致真,陈静,等,2020.随机参数扰动方法对中国冬季降水集合预报的影响[J].大气科学,44(5):984-996. Chen Y X, Xu Z Z, Chen J, et al, 2020. Influence of stochastically perturbed parameterization on ensemble forecasting of winter precipitation in China[J]. Chin J Atmos Sci, 44(5):984-996(in Chinese).

- 杜钧,2002.集合预报的现状和前景[J].应用气象学报,13(1):16-28. Du J, 2002. Present situation and prospects of ensemble numerical prediction[J]. J Appl Meteor Sci, 13(1):16-28(in Chinese).
- 端义宏,金荣花,2012.我国现代天气业务现状及发展趋势[J].气象科技进展,2(5):6-11. Duan Y H, Jin R H, 2012. The status of modern weather operations in China and its future[J]. Adv Meteor Sci Technol, 2(5):6-11(in Chinese).
- 范宇恩,陈静,邓国,等,2019. GRAPES区域集合预报两种侧边界扰动方法对比试验[J].气象,45(12):1629-1641. Fan Y E, Chen J, Deng G, et al, 2019. Comparison of two lateral boundary perturbation methods in the regional ensemble prediction system of GRAPES[J]. Meteor Mon, 45(12):1629-1641(in Chinese).
- 傅刚,李晓岚,魏娜,2009.大气能见度研究[J].中国海洋大学学报,39(5):855-862. Fu G, Li X L, Wei N, 2009. Review on the atmospheric visibility research[J]. Period Ocean Univ China, 39(5):855-862(in Chinese).
- 李炬,程志刚,张京江,等,2020.小海坨山冬奥赛场气象观测试验及初步结果分析[J].气象,46(9):1178-1188. Li J, Cheng Z G, Zhang J J, et al, 2020. Meteorological field experiment and preliminary analysis result in the Winter Olympic Venue in Xiaohaituo Mountain[J]. Meteor Mon, 46(9):1178-1188(in Chinese).
- 马旭林,2008.基于集合卡尔曼变换(ETKF)理论的适应性观测研究与应用[D].南京:南京信息工程大学. Ma X L, 2008. Study on the ensemble transform Kalman filter-based adaptive observation and applications[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 沈学顺,陈起英,孙健,等,2021.中央气象台全球中期数值预报业务系统的发展[J].气象,47(6):645-654. Shen X S, Chen Q Y, Sun J, et al, 2021. Development of operational global medium-range forecast system in National Meteorological Centre[J]. Meteor Mon, 47(6):645-654(in Chinese).
- 佟华,张玉涛,2019. GRAPES-MESO模式预报降水相态诊断及应用研究[J].大气科学学报,42(4):502-512. Tong H, Zhang Y T, 2019. Diagnosis of precipitation types and its application in the GRAPES-MESO forecasts[J]. Trans Atmos Sci, 42(4):502-512(in Chinese).
- 王婧卓,陈法敬,陈静,等,2021. GRAPES区域集合预报对2019年中国汛期降水预报评估[J].大气科学,45(3):664-682. Wang J Z, Chen F J, Chen J, et al, 2021. Verification of GRAPES-REPS model precipitation forecasts over China during 2019 flood season[J]. Chin J Atmos Sci, 45(3):664-682(in Chinese).
- 王婧卓,陈静,庄照荣,等,2018. GRAPES区域集合预报模式的初值扰动增长特征[J].大气科学,42(2):367-382. Wang J Z, Chen J, Zhuang Z R, et al, 2018. Characteristics of initial perturbation growth rate in the regional ensemble prediction system of GRAPES[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2):367-382(in Chinese).
- 王璐,沈学顺,2019.对流尺度集合预报与模式不确定性研究进展[J].气象,45(8):1158-1168. Wang L, Shen X S, 2019. Review on the representation of model uncertainty in convection-allowing ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 45(8):1158-1168(in Chinese).
- 许小峰,2018.从物理模型到智能分析——降低天气预报不确定性的新探索[J].气象,44(3):341-350. Xu X F, 2018. From physical model to intelligent analysis: a new exploration to reduce the uncertainty of weather forecast[J]. Meteor Mon, 44(3):341-350(in Chinese).
- 薛纪善,陈德辉,2008.数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[M].北京:科学出版社:383. Xue J S, Chen D H, 2008. Scientific Design and Application of GRAPES Numerical Prediction System[M]. Beijing: Science Press:383(in Chinese).
- 张涵斌,范水勇,陈敏,等,2019.区域集合预报基于SKEB和多物理过程的混合模式扰动方法研究[J].气象,45(1):17-28. Zhang H B, Fan S Y, Chen M, et al, 2019. Study on a synthetic model perturbation method based on SKEB and multi-physics for regional ensemble forecast[J]. Meteor Mon, 45(1):17-28(in Chinese).
- 张涵斌,智协飞,陈静,等,2017.区域集合预报扰动方法研究进展综述[J].大气科学学报,40(2):145-157. Zhang H B, Zhi X F, Chen J, et al, 2017. Achievement of perturbation methods for regional ensemble forecast[J]. Trans Atmos Sci, 40(2):145-157(in Chinese).
- Bailey M E, Isaac G A, Gultepe I, et al, 2014. Adaptive blending of model and observations for automated short-range forecasting: examples from the Vancouver 2010 Olympic and Paralympic Winter Games[J]. Pure Appl Geophys, 171(1):257-276.
- Baldwin M, Treadon R, Contorno S, 1994. Precipitation type prediction using a decision tree approach with NMC's mesoscale eta model[C]//10th Conference on Numerical Weather Prediction. Portland: American Meteorological Society:30-31.
- Bouall  gue Z B, Theis S E, Gebhardt C, 2013. Enhancing COSMO-DE ensemble forecasts by inexpensive techniques[J]. Meteor Z, 22(1):49-59.
- Bourgouin P, 2000. A method to determine precipitation types[J]. Wea Forecasting, 15(5):583-592.
- Caron J F, 2013. Mismatching perturbations at the lateral boundaries in limited-area ensemble forecasting: a case study[J]. Mon Wea Rev, 141(1):356-374.
- Duan Y H, Gong J D, Du J, et al, 2012. An overview of the Beijing 2008 Olympics Research and Development Project (B08RDP)[J]. Bull Amer Meteor Soc, 93(3):381-403.
- Frogner I L, Haakenstad H, Iversen T, 2006. Limited-area ensemble predictions at the Norwegian Meteorological Institute[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 132(621):2785-2808.
- Golding B W, Ballard S P, Mylne K, et al, 2014. Forecasting capabilities for the London 2012 Olympics[J]. Bull Amer Meteor Soc, 95(6):883-896.
- Hagelin S, Son J, Swinbank R, et al, 2017. The Met Office convective-scale ensemble, MOGREPS-UK[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 143(708):2846-2861.
- Isaac G A, Joe P I, Mailhot J, et al, 2014. Science of Nowcasting

- Olympic Weather for Vancouver 2010 (SNOW-V10): a world weather research programme project[J]. *Pure Appl Geophys*, 171(1-2):1-24.
- Joe P, Doyle C, Wallace A, et al, 2010. Weather services, science advances, and the Vancouver 2010 Olympic and Paralympic Winter Games[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 91(1):31-36.
- Kalnay E, 2002. *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*[M]. London: Cambridge University Press; 364.
- Kiktev D B, Astakhova E D, Zaripov R B, et al, 2015. FROST-2014 Project and Meteorological Support of the Sochi-2014 Olympics [J]. *Russ Meteor Hydrol*, 40(8):504-512.
- Kiktev D B, Joe P, Isaac G A, et al, 2017. FROST-2014: the Sochi Winter Olympics International Project [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(9):1908-1929.
- Korea Meteorological Administration, 2018. WWRP/Research & Development Project and Forecast Demonstration Project International Collaborative Experiments for PyeongChang Olympic and Paralympic Games 2018(ICE-POP 2018)[R]. Seoul: Korea Meteorological Administration.
- Mailhot J, Bélair S, Charron M, et al, 2010. Environment Canada's experimental numerical weather prediction systems for the Vancouver 2010 Winter Olympic and Paralympic Games [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 91(8):1073-1086.
- Mailhot J, Milbrandt J A, Giguère A, et al, 2014. An experimental high-resolution forecast system during the Vancouver 2010 Winter Olympic and Paralympic Games [J]. *Pure Appl Geophys*, 171(1-2):209-229.
- Nuissier O, Joly B, Vié B, et al, 2012. Uncertainty of lateral boundary conditions in a convection-permitting ensemble: a strategy of selection for Mediterranean heavy precipitation events [J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 12(10):2993-3011.
- Ramer J, 1993. An empirical technique for diagnosing precipitation type from model output[C]// Fifth International Conference on Aviation Weather Systems. Vienna: American Meteorological Society; 227-230.
- Stoelinga M T, Warner T T, 1999. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an east coast winter precipitation event [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 38(4):385-404.
- Wang X G, Bishop C H, 2003. A comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes [J]. *J Atmos Sci*, 60(9):1140-1158.
- Wang X G, Bishop C H, Julier S J, 2004. Which is better, an ensemble of positive-negative pairs or a centered spherical simplex ensemble? [J]. *Mon Wea Rev*, 132(7):1590-1605.
- Wang Y, Bellus M, Geleyn J F, et al, 2014. A new method for generating initial condition perturbations in a regional ensemble prediction system: blending [J]. *Mon Wea Rev*, 142(5):2043-2059.
- Wang Y, Bellus M, Wittmann C, et al, 2011. The Central European limited-area ensemble forecasting system: ALADIN-LAEF [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137(655):483-502.
- Wei M Z, Toth Z, Wobus R, et al, 2008. Initial perturbations based on the ensemble transform (ET) technique in the NCEP global operational forecast system [J]. *Tellus A: Dyn Meteor Oceanogr*, 60(1):62-79.
- Yang L, Chen M X, Wang X L, et al, 2021. Classification of precipitation type in North China using model-based explicit fields of hydrometeors with modified thermodynamic conditions [J]. *Wea Forecasting*, 36(1):91-107.
- Zhang H B, Chen J, Zhi X F, et al, 2015a. A comparison of ETKF and downscaling in a regional ensemble prediction system [J]. *Atmosphere*, 6(3):341-360.
- Zhang H B, Chen J, Zhi X F, et al, 2015b. Study on multi-scale blending initial condition perturbations for a regional ensemble prediction system [J]. *Adv Atmos Sci*, 32(8):1143-1155.

(本文责编:俞卫平)