

不同模式背景场对复杂山地百米级温度和风场融合预报影响的对比研究  
宋林焯<sup>1,2</sup>, 杨璐<sup>1,2</sup>, 程丛兰<sup>1,2</sup>, 陈明轩<sup>1,2</sup>, 曹伟华<sup>1,2</sup>, 吴剑坤<sup>1,2</sup>

1 北京城市气象研究院, 北京 100089

2 中国气象局城市气象重点开放实验室, 北京 100089

**摘要** 基于高分辨率融合集成预报 RISE 系统, 采用华北 3km 分辨率快速循环更新的中尺度数值模式 CMA-BJ、欧洲中心 0.125 度分辨率全球数值模式 ECMWF、常规自动站和冬奥赛道加密自动站逐时观测资料, 以北京冬奥会复杂山地为研究区域, 对比分析了不同模式背景场对 100m 网格分辨率地面 2-m 温度和 10-m 风场融合分析和 1-24 小时逐小时间隔预报准确性的影响。对比试验结果表明: (1) 采用区域模式和全球模式作为 RISE 系统背景场, 均可有效形成复杂山地百米级精细化融合产品, 但不同模式背景场对不同气象要素分析和预报性能的影响存在明显差异; (2) 对于温度分析, 模式背景场的影响最小, 以 CAM-BJ 和 ECMWF 为模式背景场的 RISE 温度分析场空间分布基本一致, 分析 MAE 误差均小于 0.2°C; (3) 对于风场分析, 采用高分辨率区域模式比粗分辨率全球模式更能提升 RISE 高精度风场融合产品精细化水平; (4) 对于温度预报, 以 ECMWF 为背景场的 RISE 100m 格点融合预报性能显著优于 CMA-BJ 背景场, 冬奥高山站和所有站平均预报误差分别减小 10.5% 和 7.0%; (5) 对于风场预报, 以 CAM-BJ 和 ECMWF 为模式背景场的 RISE 冬奥高山站临近 1-6h 风速预报 MAE 误差分别为 1.42m/s 和 1.30m/s, 7-24h 预报 MAE 则分别为 1.52m/s 和 1.54m/s, 而 RISE 区域内所有站 1-24h 平均 MAE 误差分别为 1.38m/s 和 1.24m/s。研究成果有助于深入理解模式背景场在百米级融合预报中的作用, 对提升复杂地形下天气预报准确性有重要的科学意义和业务应用价值。

**关键词** 不同模式背景场 百米级融合预报 复杂山地 北京冬奥会

投稿日期 2023-04-10 修改日期 2023-09-11

**作者简介** 宋林焯, 女, 博士, 副研究员。主要从事多源数据融合预报研究。E-mail: lysong@ium.com

**通讯作者** 杨璐, E-mail: lyang@ium.cn

**资助项目** 北京市自然科学基金项目 8212025, 北京市气象局科技项目 BMBKJ202004011, 国家自然科学基金项目 42275012

Funded by Beijing Natural Science Foundation (Grant 8212025), Science and Technology project of Beijing Meteorological Bureau (Grant BMBKJ202004011), National Natural Science Foundation of China (Grant 42275012)

Comparative study on the influence of different NWP model background on the 100-meter integrated forecasts in complex terrain

SONG Linye<sup>1,2</sup>, YANG Lu<sup>1,2</sup>, CHENG Conglan<sup>1,2</sup>, CHEN Mingxuan<sup>1,2</sup>, CAO Weihua<sup>1,2</sup>, WU Jiankun<sup>1,2</sup>

1 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

2 Key Laboratory of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China

**Abstract** Based on the high resolution integrated forecast system of RISE, using the meso-scale CMA-BJ model with 3km resolution and the global-scale ECMWF model with 0.125 degree resolution, adopting the hourly observation data of conventional and dense automatic weather stations, taking the outdoor mountainous competition area in Beijing Winter Olympics as the research area, this study compares the effects of different numerical weather prediction model background on the accuracy of surface 2-m temperature and 10-m wind analysis and hourly forecast for the future 1-24h with 100m grid resolution. The results show that: The 100m high-resolution refined fusion analysis products can be formed by using different model backgrounds through RISE downscaling over complex terrain and rapid integrated correction of observation data; The spatio-temporal resolution of model backgrounds has relatively little effect on the analysis product, and the main factor that determines the analysis performance is the fusion of dense observations. Different model backgrounds have a great influence on the seamless forecast results with 100m resolution in complex terrains. On the one hand, the prediction error is affected by the temporal and spatial resolution of model background, on the other hand, it depends more on the prediction performance of model backgrounds itself, and the influence of different model background fields on different meteorological elements is also different. For the temperature forecast, the precision level of prediction using coarse resolution ECMWF model as background is basically equivalent to that using higher spatio-temporal resolution CMA-BJ model. Furthermore, the accuracy of temperature forecast is improved steadily; the average forecast error reduction rates for the Winter Olympic alpine stations and all stations in the RISE region are 10.5% and 7.0% respectively. For the wind forecast, the precision level of 100m resolution forecast with ECMWF model as background is lower than that with CMA-BJ model as background. Furthermore, the 6-24h (mainly by model forecast) forecast error for Winter Olympic alpine stations increases 8.7%, while the 1-5h (mainly by extrapolation nowcasting) forecast error decreases 1.4%, and the 1-24h forecast error for all stations in the region also decreases 8.1%~11.9%. The results in this study are helpful to further understand the role of model background in the 100-meter-level integrated forecast, and have important scientific significance and practical value for improving the accuracy of weather forecast in complex terrain.

**Keywords** Different NWP backgrounds, 100m-resolution integrated forecast, Complex terrain, Beijing Winter Olympics

## 1 引言

随着重大活动气象服务保障要求的不断提升,高时空分辨率的无缝隙精细化天气预报技术不断发展,并逐渐在天气预报预警业务应用中发挥出越来越重要的作用(Brunet et al., 2015; 金荣花等, 2019)。其中,山区复杂地形下的气象要素精细化精准预报难度极大,由于下垫面的高度非均一性、地形结构的高度复杂性、建站难度和运维成本大、气象观测数据稀少,使得小尺度复杂山地气象监测与高精度预报成为国际难题(陈明轩等, 2021; 王倩倩等, 2022)。2022年北京冬奥会气象保障服务提出了“百米级分辨率、分钟级更新”的刚性需求(Chen et al., 2018),尤其是室外山地赛区百米级分辨率网格化的地面温度和风场预报产品尤为关键(Virmavirta et al. 2022; 章鸣等, 2022),相关产品可以为冬奥延庆赛区和张家口赛区低温、暖温融雪、大风等多种气象风险提供重要警示,为“一场一策”赛事保障和相关外围服务提供重要支撑。因此,研究复杂山地百米级分辨率预报技术,提升山区温度和风场预报准确性具有重要的科学意义和应用价值。

当前天气预报最重要的方法是数值模式预报，通过一组流体力学和热力学方程组，根据一定初始条件和边界条件，积分求解出未来一定时段大气运动状态的方法（曾庆存，1979；曹跃等，2019）。但是，受计算机条件和模式发展技术本身的限制（沈学顺等，2020），百米级分辨率的数值预报仍较难实现，数值模式时空分辨率尚不能完全满足精细化预报的需求（金荣花等，2019）。尤其是冬奥山地赛区温度和风场空间布局地性极强，水平距离不足 3 公里的山顶、山腰和山脚天气状态存在很大差异（王倩倩等，2022）。为此，在北京冬奥会测试赛前期，“百米级、分钟级”融合集成预报 RISE（Rapid-refresh Integrated Seamless Ensemble system）系统投入业务应用并参加了“智慧冬奥 2022 天气预报示范计划（SMART2022-FDP）”（陈明轩等，2021；中国气象局，2022）。该系统快速融合逐 6-10 分钟实时多源局地稠密观测资料，其温度和风场预报均以数值预报作为背景场，复杂地形降尺度后形成第一初猜场，然后通过外推预报和模式预报无缝隙权重融合技术、百米级偏差订正技术等（Haiden et al. 2011；Song et al. 2019；陈康凯等，2020；杨璐等，2022），实现 100m 网格分辨率的高精度温度和风场实况分析和未来 24 小时逐小时预报产品。

前人研究指出，观测资料是影响高精度融合产品性能的主要因素之一，但模式背景场的作用也不可忽视（Kann et al. 2015；杨璐等，2022），不同模式的模拟和预报性能对比也是国内外研究的一个重要方面（高学杰等，2010；张宇等，2010；田芝平和姜大膀，2013；孔祥慧等，2021）。何晓凤等（2014）利用 WRF 模式对 ECMWF（0.125 度分辨率）、GFS（0.5 度分辨率）和 T639（0.28125 度分辨率）三种全球环流预报场在中国区域进行 10km 分辨率 70m 高度风速预报的降尺度对比分析，结果表明 ECMWF 预报效果略优于 GFS，T639 稍差，三者均在高原和内陆复杂地形下预报技巧最低。姜燕敏等（2015）对比检验了国家气候中心两个不同版本 BCC\_CSM 模式对中亚地区地表气温、各热通量的模拟性能，指出高分辨率版本对年平均气温、感热通量和长波、短波辐射空间分布的模拟相对更好，但气温标准差的模拟略差于低分辨率版本。Kann et al.（2015）采用 ALARO 模式（4.8km 分辨率）和 AROME 模式（2.5km 分辨率）资料，对比分析了不同模式背景场对阿尔卑斯山区 1km 分辨率地面 2-m 温度和 10-m 风场融合分析产品的影响，结果表明模式背景场分辨率越高则高精度风场分析产品性能相对越好，对温度的影响则不显著。辛渝等（2010）使用中尺度模式 MM5 对新疆达坂城一小草湖风区地面 10-m 高度风况进行了 3km 和 1km 水平分辨率的模拟试验，结果表明两种分辨率模拟试验均可以较真实地反映地形比较平坦、地貌比较单一区域的日平均风速和逐时平均风速变化特征。但是，在地形、地貌特征相对复杂的区域，分辨率的提高反而会加大模拟偏差（辛渝等，2010）。

尽管不同模式对气象要素模拟和预报性能的前人对比研究已经取得了很多成果，但当前国内外关于不同时空分辨率模式背景场对复杂山地百米级融合预报影响的研究还十分匮乏。在北京冬奥会期间，RISE 百米级业务系统采用了华北地区 3km 分辨率 CMA-BJ 中尺度模式作为背景场，在复杂地形区域的百米级高精度实况分析和逐小时滚动预报中取得了较好的应用效果（中国气象局，2022）。但是，当前我们尚不知如果采用分辨率相对更粗的全球数值模式背景场，是否也可以获得百米级高精度的实况分析产品？产品性能如何？不同模式背景场对 RISE 系统 1-24 小时融合预报准确性又有怎样的影响？

针对以上问题，本文基于 RISE 冬奥山区 100m 分辨率系统，采用北京和河北地面自动气象站资料、北京冬奥会赛区加密观测资料和北京市气象局 CMA-BJ（China Meteorological Administration-Beijing）模式、欧洲中心 ECMWF 模式，对比研究不同模式背景场对复杂山地百米级融合分析产品和未来 24 小时预报准确性的影响。研究结果有助于我们更加深入认识模式背景场在高精度融合预报中的作用，对提升复杂地形下天气预报准确性有重要的科学意义和业务应用价值。本文章节安排如下：第 2 部分介绍数据和方法，包括 RISE 冬奥系统配置、观测资料、数值模式数据以及误差客观检验方法；第 3 部分开展了不同模式背景场对冬

奥复杂地形山区 100m 分辨率融合产品的个例试验；第 4 部分给出了北京冬奥会及冬残奥会期间（2022 年 2 月 4 日—3 月 13 日）的批量对比检验结果；第 5 部分为结论和讨论。

## 2 数据和方法

本文采用了北京城市气象研究院推出的百米级融合预报系统 RISE，该系统已纳入了北京市气象局睿图（RMAPS）模式体系，实时业务化运行。在本研究中，RISE 冬奥系统水平分辨率为 100m，覆盖约 100km×100km 范围，包含位于河北崇礼的张家口赛区和位于北京的延庆赛区，地形结构复杂，是举行冬奥室外项目的山地区域，最高海拔超过 2100 米。RISE 冬奥系统采用兰勃脱投影，配置的投影参考纬度为 40oN 和 42oN，中心点经度为 115.5oN，西南角、东北角经纬度分别设置为(115.0oE, 40.4oN)和(116.0oE, 41.2oN)。东西方向和南北方向的格点数为 1001×1001，垂直输出为 21-32 层。地形高度静态数据引入了美国航天飞机雷达地形勘测任务得到的 30m 分辨率 SRTM1s 数据（Farr et al. 2007），精细化的地形高程数据有助于更好地反映真实的冬奥赛区复杂地形特征，能满足百米级模拟和预报的需求。RISE 系统当前业务输出的产品逐 10 分钟更新一次，预报时效为未来 24h，预报输出结果间隔为 1h。背景场采用最新一次起报的数值预报结果，通过复杂地形降尺度预处理插值到 RISE 系统水平和垂直网格上，形成第一初猜场。然后快速融合逐 6-10 分钟实时多源局地稠密观测资料，通过外推预报和模式预报无缝隙权重融合技术、百米级偏差订正技术等（Haiden et al. 2011；Song et al. 2019；陈康凯等，2020；杨璐等，2022），实现 100m 分辨率温度和风场高精度实况分析和预报。

RISE 系统温度和风场的具体融合技术路线如图 1 所示。对于地面 2m-温度（图 1a），首先把模式 2-m 温度预报（）分解为三维模式层部分（）和二维地表层部分（），以充分考虑昼夜温度盈亏。类似地，观测温度和模式预报温度之差（）也被分解为三维模式层部分（）和二维地表层部分（）。将模式温度预报数据三线性插值到三维 RISE 格点（水平分辨率 100m、垂直分辨率 250m），考虑到冬奥山区地形复杂、垂直落差大，因此引入温度廓线外推法，模式前处理模块中采用了最大温度梯度（），复杂山区温度第一初猜场由边界层温度廓线转换到 RISE 谷平面地形高度得到。在 RISE 冬奥山区 100m 系统中，为了解决公里级模式数据插值到 RISE 格点后精细化释用问题，引入了基于高斯模糊的复杂地形三维插值方法（陈康凯等，2020）。RISE 百米级温度分析产品以数值模式预报结果作为第一初猜场，然后利用局地稠密的高频地面自动站观测对第一初猜场进行快速订正后得到。RISE 百米级格点温度预报则通过外推临近预报和模式降尺度预报权重融合计算得到，采用的权重函数（）为预报时效的负指数函数。对于地面 10-m 风场（图 1b），RISE 系统 2 分钟平均风分解成了 U 和 V 分量，首先把模式 U 和 V 风预报插值到 RISE 格点（水平分辨率 100m、垂直分辨率 125m）作为第一初猜场，然后把自动站风速风向观测转换为 U 和 V 分量，通过观测的快速融合订正作用后得到 RISE 百米级风场分析结果。由于模式地面 10-m 并非实际地形的地面 10-m 高度，因此在风场融合过程中引入了因子来确定模式风和观测风之间的差异，其作用是将模式地面 10-m 风转换为真实地面 10-m 风。在 RISE 风场中还加入了高时空分辨率三维风场融合技术和高精度风场偏差订正技术（杨璐等，2019，2022）。RISE 百米级格点风向预报也通过外推临近预报和模式降尺度预报权重融合计算得到，但采用的权重函数（）为预报时效的线性函数。

图 1 RISE 系统(a)温度和(b)风场技术路线，(c)对比试验方案

Fig.1 Technical scheme of (a) temperature and (b) wind field for RISE system, (c) scheme of the comparison test

本文采用的数值预报数据包括华北地区中尺度模式 CMA-BJ(何静等, 2019; Zhong et al. 2020; 全继萍等, 2022) 和欧洲中期数值预报中心全球模式 ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasts), 均为实时可获取的模式数据, 可供业务运行。CMA-BJ 模式和 ECMWF 模式数据的对比情况如表 1 所示。其中 CMA-BJ 模式水平分辨率为 3 公里, 垂直 59 层, 1 小时快速更新循环, 不同起报时次的预报时长不等, 预报时效在 18h 到 72h 之间, 预报间隔为 1h。ECMWF 模式水平分辨率地面为 0.125 度, 高空为 0.25 度, 垂直 19 层, 12 小时更新一次, 每次预报未来 240h, 预报间隔为 3h-6h (表 1)。两套不同模式背景场预处理源代码模块均已开发完成并集成到了 RISE 系统中, 对比试验方案设置如图 1c 所示, 方案 A 和 B 的 RISE 百米级格点温度和风场技术路线相同 (图 1a-b), 但输入的数值模式预报数据分别采用了 CAM-BJ 区域模式和 ECMWF 全球模式。但是由于不同数值模式存在差异, 为了实现 RISE 系统 1h 间隔的融合预报产品, 模式背景场的时间间隔必须等于或小于 1h, 因此对 ECMWF 模式资料进行了线性权重时间插值处理。另外需指出, 由于 ECMWF 实时数据中没有地面 2 米和三维水汽混合比等变量, 因此通过热力学方程转换计算得到, 且地面 2 米比湿的计算中采用了地面气压代替地面 2 米气压。

表 1 CMA-BJ 模式和 ECMWF 模式信息及在 RISE 冬奥系统预处理中的对比情况

Table 1 Comparison details of CMA-BJ model and ECMWF model information and the corresponding pre-processing in the RISE system for Beijing Winter Olympic

	CMA-BJ 模式	ECMWF 模式
类型	华北区域数值预报	全球数值预报
水平分辨率	地面 3 公里, 高空 3 公里	地面 0.125 度, 高空 0.25 度
垂直分辨率	59 层, sigma 面	19 层, 等压面
更新频率	1 小时循环更新, 一天 24 次	12 小时循环更新, 一天 2 次
预报时效	未来 18h 到 72h 不等	未来 240h
时间分辨率	逐 1 小时预报	逐 3-6 小时预报
RISE 预处理数据裁剪范围	35.4732 oN ~ 43.1696oN 111.31 oE ~ 122.38oE	35.25 oN ~ 43.25oN 111.25 oE ~ 122.5oE
实时业务可用的起报时次	取一天 4 次 (即 00UTC、03UTC、12UTC、18UTC)	取一天 2 次 (即 00UTC、12UTC)
预处理数据间隔频次	逐 1 小时间隔	逐 1 小时间隔
(采用线性时间权重插值方法)		
预处理时间	约 20~30 分钟	约 5~6 分钟

在 RISE 冬奥系统区域内, 3km 分辨率 CMA-BJ 模式和 0.125 度分辨率 ECMWF 模式的地形高度分布总体一致, 呈西北-北部海拔高、西南-南部海拔低的特征 (图 2), 但是 ECMWF 模式南北和东西方向仅大约各 7-8 个网格点, 延庆赛区高海拔且极度陡峭的特征基本被平滑而无法反映, 张家口赛区高地形特征在粗分辨率下也被较大程度地平滑 (图 2b), CMA-BJ 模式地形高度则相对更加接近实际地形 (图 2a)。

图 2 RISE 冬奥系统区域范围内(a) CMA-BJ 模式, (b) ECMWF 模式地形高度, 单位: 米

Fig.2 Topographic height of (a) CMA-BJ model, (b) ECMWF model in the region of RISE Winter Olympics system. Unit: meter

本文采用的观测资料包括 RISE 冬奥山区系统区域内所有国家级自动站、区域自动站，以及针对北京冬奥会建设的赛区加密观测站。2022 年冬奥会及冬残奥会期间区域内的地面自动站总个数达到 167 个，能实时接收到的温度有效观测个数平均约为 153 个，风速风向有效观测平均个数约为 138 个。除此之外，本文重点考察北京冬奥复杂地形赛区 19 个高山站，包括张家口赛区 11 站（雪上技巧 1 号站、空中技巧 2 号站、障碍追逐 3 号站、障碍技巧 4 号站、平行大回转 5 号站、U 型场地技巧 6 号站、冬两 1 号站、越野 2 号、3 号站、跳台 2 号、3 号站）和延庆赛区 8 站（西大庄科站、竞速 1 号、3 号、5 号、8 号站、竞技赛道 1 号、2 号、3 号站）。这些高山站海拔最低 928 米（西大庄科）、最高 2177 米（竞速 1 号），平均海拔 1753.3 米，且均为北京冬奥会 FDP（Forecast Demonstration Plan）考核站。在客观检验时，本文采用站点观测资料为真值，选择距离站点最近的 RISE 格点预报作为站点分析和预报值（陈明轩等，2021），以平均绝对误差（Mean-Absolute-Error, MAE）为衡量标准（宋林焯等，2019），对比在复杂地形下基于不同模式背景场的 100m 高分辨率格点实况分析性能与未来 1-24 小时预报产品误差。

### 3 不同模式背景场对百米级融合产品的对比试验结果

#### 3.1 地面 2-m 温度场

图 3a 和图 3b 分别给出了 2021 年 12 月 29 日 07:00UTC CMA-BJ 和 ECMWF 模式背景场地面 2-m 温度。由于 CMA-BJ 模式快速更新循环，每天起报的时次多于 ECMWF 模式（表 1），这里的个例试验为了同等对比，模式起报时间统一采用 2021 年 12 月 29 日 00:00UTC，有效预报时间为 07:00UTC。图 3c 和图 3d 则分别给出了基于 CMA-BJ 模式背景场和基于 ECMWF 模式背景场的 RISE 系统 2-m 温度格点分析场结果。可以看出，两个模式本身预报的温度空间分布都表现为张家口赛区温度最低、延庆赛区温度相对较高、南部温度最高的特征，说明两者温度预报结构总体类似（图 3a、b）。但 ECMWF 模式预报精细化程度低于 BJ-CMA 模式，且 ECMWF 预报的张家口低温区（南部高温区）比 BJ-CMA 偏高（低），存在明显的差异。然而，通过高精度地形调整和观测快速融合订正之后可以看到，基于 CMA-BJ 和 ECMWF 不同模式背景场的 RISE 2-m 温度分析产品都表现为更加精细化的空间分布特征，能够反映复杂地形和山脉走势（图 3c、d）。虽然温度分布基本趋于一致，但数值上仍存在一些差别，尤其是在没有自动站或观测网分布稀疏的区域。上述试验结果表明：模式背景场作为 RISE 第一初猜场发挥了不可或缺的重要作用，但不论以哪种模式作为第一初猜场，RISE 百米级分辨率的温度分析结果基本类似。高分辨率融合分析产品的性能在有观测的地方主要依赖于观测，在观测稀疏的地方则主要依赖于模式。

图 3 (a) CMA-BJ 和(b) ECMWF 模式的地面 2-m 温度模式背景场，(c)基于 CMA-BJ 和(d)基于 ECMWF 模式背景场的 RISE 地面 2-m 温度分析场，模式背景场时间为 20211229 00:00UTC+7h，RISE 分析时间为 20211229 07:00UTC，单位：oC

Fig.3 Surface 2-m temperature field of (a) CMA-BJ model, (b) ECMWF model, and the corresponding RISE surface 2-m temperature analysis product based on CMA-BJ model, (d) ECMWF model as NWP backgrounds. The model background time is 20211229 00:00UTC+7h, and the RISE analysis time is 20211229 07:00UTC. Unit: oC

图 4 给出了以 CMA-BJ 和 ECMWF 作为模式背景场的 RISE 地面 2-m 温度 1-24h 逐小时滚动预报产品的对比结果，图中以+1h、+6h、+12h 和+24h 预报结果为例展示。可以看出，基于不同模式背景场的 RISE 系统百米级温度预报产品均能体现精细化分布特征，随着预报时效增加也体现出明显的温度日变化特征，白天温度高、晚上温度低，空间和时间演变整体趋势

大体一致，尤其是 1h 临近时段（图 4a、e），绝大部分区域预报差异在 1oC 以内（图 4i）。这是因为 RISE +1h 预报结果以基于高分辨率分析场（图 3c、d）的外推预报为主，模式预报权重占比最小。在+6h 到+24h 预报时效，以 CMA-BJ 和 ECMWF 不同模式背景场得到的 RISE 温度预报结果存在明显的差别（图 4b-d、f-h），采用 CMA-BJ 背景场的 RISE 温度 6-24h 预报结果相对更低（图 4j-l）。具体而言，基于 CMA-BJ 模式背景场，张家口赛区 RISE +6h 温度预报最低在-18oC 以下，而基于 ECMWF 模式背景场的 RISE +6h 温度预报则约为-17oC（图 4b、f）。以 CMA-BJ 为模式背景场，RISE +24h 预报（Valid time: 20211230 07:00UTC，即北京时间下午 15:00）张家口地区持续报出-18oC 以下低温（图 4d），而以 ECMWF 为模式背景场时，张家口地区温度最低值约为-14oC，且东南部和南部温度预报也相对更高（图 4h）。

图 4 RISE 系统地面 2-m 温度预报场，(a)-(d)基于 CMA-BJ 模式背景场，(e)-(h)基于 ECMWF 模式背景场，(i)-(l)为两者之间的差异。第一、二、三、四行分别为+1h、+6h、+12h、+24h 预报结果，RISE 起报时间 20211229 07:00UTC，单位：oC

Fig.4 Surface 2-m temperature forecasts of RISE system, (a)-(d) based on CMA-BJ model background, (e)-(h) based on ECMWF model background, and (i)-(l) are their differences. The first, second, third and fourth lines are +1h, +6h, +12h and +24h forecast results, respectively. The initial time of RISE system is 20211229 07:00UTC. Unit: oC

RISE 系统基于不同模式背景场的 100m 分辨率温度融合个例产品误差对比情况如图 5a 所示。这里，检验站点为北京冬奥会复杂山地 FDP 考核的 19 个高山站点。针对 20211229 07:00 UTC 起报的结果可以看到：对于所有预报时效，基于 ECMWF 模式背景场的 RISE 温度预报误差均小于基于 CMA-BJ 模式背景场的 RISE 温度预报误差（图 5a，红色实线和蓝色实线）。在历史个例的对比试验中，为了公平比较，CMA-BJ 和 ECMWF 模式采用了完全一致的起报时间，即 20211229 00:00UTC；但在实际实时业务应用中，一天 2 次更新的 ECMWF 模式只能采用 00 时起报的实时资料，而快速更新循环的 CMA-BJ 模式则可以采用最新的 03 时起报的实时资料（表 1）。同样以 CMA-BJ 为模式背景场，采用 03 时起报背景场资料的 RISE 实时业务温度预报误差小于采用 00 时起报背景场的误差（图 5a，柱状和蓝色实线），这体现了模式快速更新循环对于 RISE 高精度融合预报性能提升的正面作用。另外，CMA-BJ 和 ECMWF 背景场的地面 2-m 温度原始误差均较大（图 5a，蓝色虚线和红色虚线），这是因为模式地形和实际地形存在较大的差别（图 2），也即模式里的地面 2-m 和真实的地面 2-m 存在较大的差异。因此，这体现了 RISE 系统百米级高分辨率融合分析和预报技术的优势，可以在原有粗分辨率模式预报结果的基础上大幅提升山区复杂地形下的温度预报精细化水平和准确性。尤其对于粗分辨率 ECMWF 模式，张家口赛区和延庆赛区的高海拔特征较难以体现，且模式的地面 2 米远低于实际海拔高度上的地面 2 米（图 2b），且实际比赛的冬奥赛区范围仅 3km×3km 左右，若直接采用 ECMWF 模式在延庆或张家口赛区的地面 2-m 温度预报产品误差很大，但其 2-m 温度和三维温度预报趋势比 CMA-BJ 模式相对更为准确，使得通过 RISE 系统复杂地形百米级融合技术后可以得到更加精细化且误差更小的温度短临预报产品。

图 5 RISE 系统 20211229 07:00UTC 起报的个例对比试验结果，(a)温度，(b)风速。纵坐标为误差，横坐标为预报时效。虚线为原始模式背景场误差，实线为 RISE 系统基于不同模式背景场的 100m 分辨率试验产品误差，柱状为 RISE 实时业务产品误差

Fig.5 Comparison results of RISE system test for the case initialized at 20211229 07:00UTC. (a) temperature, (b) wind speed. The ordinate is the error and the abscissa is the forecast hours. The dashed lines are the original model background errors, the solid lines are the RISE 100m

resolution test product errors based on different backgrounds, and the bars are the RISE real-time product errors

### 3.2 地面 10-m 风场

图 6 给出了 CMA-BJ 和 ECMWF 模式背景场的地面 10-m 风场空间分布以及基于这两种不同模式背景场的 RISE 系统 10-m 风场格点融合分析产品的对比结果。可以看到，ECMWF 模式预报的近地面风场由于分辨率粗，基本无法反映复杂山地环境下的局地风环流及扰流等小尺度精细化空间分布特征，表现为冬季盛行西北风，而 3km 分辨率 CMA-BJ 模式预报的近地面风场则更能体现出小尺度风场空间精细化特征（图 6a、b）。进一步，通过 RISE 地面自动站风速风向观测快速融合及地形作用调整后，最终 RISE 系统格点风场分析产品的准确性和精细化水平均显著提升（图 6c、d），这说明 100m 分辨率格点实况分析产品性能主要取决于局地稠密观测资料融合作用。但尽管如此，当模式背景场本身分辨率较低时，冬奥山区风场释用产品的精细化程度也相对较低，说明对于 RISE 高精度融合预报而言，所采用的模式背景场空间分辨率越高，则对复杂地形下百米级格点风场分析产品的空间精细化水平有一定程度的利好。

图 6 同图 3，但为地面 10-m 风场，为了防止箭头太密每隔 30 个格点绘制矢量箭头，单位：m/s

Fig.5 Same as Fig.3, but for the surface 10-m wind. Vector arrows are drawn every 30 grid points in order to prevent arrows being too dense. Unit: m/s

图 7 给出了以 CMA-BJ 和 ECMWF 为数值背景场的 RISE 系统 1-24h 近地面风场预报结果及两者之差。在+1h 临近预报时效，由于观测资料融合反馈作用最强，因此 RISE 格点风场的预报精细化水平相对较高，尤其是采用 3km 分辨率 CMA-BJ 模式背景场，体现了模式背景场分辨率对风场融合预报精细化程度的影响。随着预报时效的延长，观测融合（模式背景场）的作用逐渐减弱（加强），对于+6h 到+24h 预报，以 ECMWF 为第一初猜场的 RISE 风场预报结果精细化程度减弱，尽管在延庆赛区和张家口赛区均预报为西北风，但风速大小与风场局地变化明显弱于以 CMA-BJ 为第一初猜测场的预报，最大差异可超过 3m/s（图 7j-l）。如果模式背景场本身没有预报出局地扰流等小尺度环流，则 RISE 系统也较难预报出来。RISE 系统通过风速风向观测融合作用（短临时段）、风场偏差订正作用（全时段）和地形降尺度作用等实现和提升 100 米分辨率风场预报准确性。所以，对 RISE 复杂山地百米尺度风场预报而言，接入越高分辨率的模式背景场对局地小范围的融合风场预报产品有较大程度的利好。

图 7 同图 4，但为地面 10-m 风场预报

Fig.7 Same as Figure 4, but for 10-m surface wind field forecast

针对上述 20211229 07:00UTC 起报个例，RISE 系统基于不同模式背景场的高山考核站风速误差对比情况如图 5b 所示。采用 ECMWF 模式背景场的 RISE 风速预报误差总体大于采用 CMA-BJ 模式背景场的风速预报误差（图 5b，红色实线和蓝色实线）。这可能主要是由于采用 ECMWF 0.125 度分辨率 10U 和 10V 背景场输入的 RISE 风场预报精细化程度远低于基于 CMA-BJ 3km 分辨率 10U 和 10V 风背景场输入的预报结果（图 7）。RISE 系统高精度风场融合预报技术路线（图 1b）不仅适用于 CMA-BJ 模式（图 5b，蓝色实线和蓝色虚线），同样也适用于 ECMWF 模式（图 5b，红色实线和红色虚线）。RISE 系统近地面风场预报性能与基于历史数据统计得

出的偏差订正系数有紧密联系。另外，与 RISE 温度预报试验结果类似，以 CMA-BJ 为模式背景场，采用其最新 03 时起报数据为背景场的 RISE 实时业务产品风速预报误差整体小于采用其 00 时起报数据为背景场的 RISE 风速误差（图 5b，柱状和蓝色实线），再次表明模式背景场快速更新循环对于 RISE 融合预报性能提升的正面作用。

#### 4 冬奥会期间批量对比检验结果

北京冬奥会和冬残奥会正赛时段为 2022 年 2 月 4 日—3 月 13 日，在批量对比检验中，充分考虑了 RISE 系统实时运行中不同模式背景场更新频次、滞后时间及 RISE 预处理时间（表 1），统一采用 RISE 当前起报时次能取到的最新模式背景场数据。例如，2022 年 2 月 18 日 00:00 UTC 起报的 RISE，采用了 2 月 17 日 18:00 UTC 起报的 CMA-BJ 模式背景场和 2 月 17 日 12:00 UTC 起报的 ECMWF 模式背景场。检验的起报时次为所有冬奥 FDP 每天的 00UTC（08 点）、03UTC（11 点）、06UTC（14 点）、09UTC（17 点）、12UTC（20 点）、15UTC（23 点）、18UTC（02 点）、21UTC（05 点）起报结果。对于极少量由于观测资料缺失、模式资料缺失或机器故障造成的实时缺测数据，为了公平对比，只要基于 CMA-BJ 模式背景场和基于 ECMWF 模式背景场两者只要其中 1 组缺测则该时次的样本剔除。

##### 4.1 百米级实况分析产品

表 2 给出了 RISE 系统冬奥 FDP19 个高山站(FDP19)平均的温度和风速分析误差。采用 CMA-BJ 模式背景场，RISE 温度分析产品 MAE 为 0.112oC，风速 MAE 为 0.618m/s；采用 ECMWF 模式背景场，RISE 温度分析产品 MAE 为 0.112oC，风速 MAE 为 0.705m/s（表 2），因此高山站温度分析误差与基于 CMA-BJ 持平，风速分析误差则略增大。针对全部站点（ALL）的检验结果表明：采用 ECMWF 模式背景场的 RISE 温度和风速分析 MAE 均略小于采用 CMA-BJ 模式背景场，但整体而言分析误差均较小（表 2）。这一结果说明，CMA-BJ、ECMWF 两种不同模式数值预报对 RISE 系统冬奥山区复杂地形下 100 米高分辨率网格化分析产品的影响存在一定的影响，其中对风场的影响大于对温度的影响。百米级高精度温度和风场的分析产品性能主要取决于观测资料，其次是模式背景场分辨率及其准确性。采用不同模式背景场，温度（风速）分析产品的平均 MAE 均在 0.2oC（0.4m/s）以下。

表 2 2022 年 2 月 4 日到 3 月 13 日期间，采用不同模式背景场的 RISE 分析产品误差，FDP19 和 ALL 分别表示冬奥 FDP 高山 19 站和研究区域内全部站点的检验结果

Table 2 The analysis errors of RISE system based on different NWP backgrounds. FDP19 and ALL represent the verification results of Winter Olympic FDP 19 stations in high mountain area and all stations in the whole complex terrain area

RISE 分析产品	采用 CMA-BJ 模式背景场	采用 ECMWF 模式背景场
温度误差(oC)-FDP19	0.112	0.112
风速误差(m/s)-FDP19	0.618	0.705
温度误差(oC)-ALL	0.180	0.160
风速误差(m/s)-ALL	0.350	0.230

图 8 进一步给出了冬奥延庆赛区山脚、山腰、山顶三个冬奥 FDP 观测站的温度实况和 RISE 分析结果，其中该山脚和山顶之间的水平球面距离约 5km，垂直落差 1249m，山腰和山顶之间的水平球面距离约 900m，垂直落差 252 m。对于这样复杂地形局地小范围区域，次公里级以上的格点分析资料几乎难以反映出山脚、山腰、山顶温度的差别。从图 8 可以看到，海拔最高的山顶冬季可出现低于-25oC 的低温，且几乎不会出现 10oC 以上温度（图 8c），山脚的温度则相对较高，在 ±20oC 之间（图 8a）。从图 8 还可发现，RISE 系统 100 米分辨率

高精度格点融合分析产品的温度值和自动站实况基本吻合，山脚、山腰、山顶的分析温度和实况之间的相关系数均超过 0.99，这说明 RISE 百米级温度分析产品较为准确，基本接近自动站实况，具有较好的应用价值。采用 ECMWF 模式背景场的温度分析结果（图 8d-f）和采用 CMA-BJ 模式背景场的温度分析结果基本类似（图 8a-c），这说明对于 RISE 百米级融合温度分析，不同模式背景场的影响很小（表 2、图 8），局地观测资料融合才是影响 RISE 温度分析产品性能的主导因素。

图 8 基于 CMA-BJ 模式背景场的 RISE 系统(a)山脚 A1489 站-西大庄科，(b)山腰 A1703 站-竞速 3 号，(c)山顶 A1701 站-竞速 1 号温度分析和观测散点图，Corr 表示分析和观测之间的相关系数；(d)-(f)同(a)-(b)，但为基于 ECMWF 模式背景场

Fig.8 Scatter diagram of RISE temperature analysis and observation based on CMA-BJ model background, (a) A1489 station at mountain foot, (b) A1703 station on mountainside, (c) A1701 station at mountain top. Corr represents the correlation coefficient between analysis and observation; (d)-(f) are the same as (a)-(b), but based on ECMWF model background

RISE 系统风速分析与风速实况对比结果如图 9 所示。可以看到，在冬奥复杂山地，山顶更易出现超过 14m/s 的 7 级以上大风（图 9c），山脚大风出现频率则最低（图 9a）。相比与温度分析产品，风速分析产品与实况观测的相关系数较低，其中山脚和山顶的相关系数可达 0.97 以上，但山腰的相关系数低于 0.90，这可能是由于山腰站的地理环境更为复杂，融合时也更易受周边观测站的影响。总体而言，RISE 风速分析和自动站观测吻合程度较好，说明 RISE 风场分析产品具有较好的应用价值。对比基于不同模式背景场的结果，采用 ECMWF 模式背景场的风速分析和采用 CMA-BJ 模式背景场的风速分析结果大体类似（图 9），但基于 ECMWF 模式背景场的 RISE 风速分析整体相对更偏弱（图 9d-f），精细化水平也相对更低（图 6）。这说明对于地面 10-m 风，除了局地观测资料的主导作用之外，模式背景场对 RISE 百米级风场分析产品也有一定程度的影响。对于复杂地形区域，模式分辨率和预报准确性越高，风场分析精细化程度和分析性能相对越好。

图 9 同图 8，但为风速

Fig.9 Same as Fig.8, but for the wind speed

#### 4.2 百米级融合预报产品

图 10a 给出了 2022 年北京冬奥会和冬残奥会期间 RISE 系统基于不同模式背景场的冬奥 FDP 19 个高山站 1-24 小时温度预报批量检验对比结果，图 10b 则给出了 RISE 冬奥系统区域范围内所有站点 1-24 小时温度预报批量检验对比结果。可以看到，RISE 基于不同模式背景场的高山站温度预报平均 MAE 误差均在 1.6oC 以内（图 10a），所有站温度预报平均 MAE 误差在 2.5oC 以内（图 10b）。但是相比于基于 CMA-BJ 模式背景场，基于 ECMWF 模式背景场的 RISE 100m 分辨率地面 2-m 温度预报产品在复杂地形高山站的预报误差更小，1-24h 逐小时预报误差减小百分比在 6.7%~16.6%之间，平均为 10.5%，尤其在临近 1-7h 预报时效内，温度预报改善率最高（图 10a）。所有站的检验结果和高山站检验结果基本类似，预报误差减小百分比平均为 7.0%（图 10b）。

图 10 2022 年 2 月 4 日到 3 月 13 日平均的 RISE 系统 1-24 小时温度预报误差（左坐标，MAE: oC）及误差减小率（右坐标，基于 ECMWF 背景场减去基于 CAM-BJ 背景场: %），(a)冬奥 FDP 高山 19 站和(b)研究区域内全部站点检验结果

Fig.10 The mean temperature forecast errors (left coordinate, MAE: °C) and error reduction rate (right coordinate, ECMWF background minus CAM-BJ background: %) of RISE system from February 4 to March 13, 2022. Results of (a) Winter Olympic FDP 19 stations in high mountain area and (b) all stations in the whole complex terrain area

对于地面 10-m 风速预报, RISE 基于不同模式背景场的风速平均预报误差均在 1.6m/s 以内(图 11)。对比基于 CMA-BJ 模式背景场和基于 ECMWF 模式背景场的结果, 冬奥高山 19 站检验误差较为接近, 尤其是 6-24h 预报时效(图 11a), 但区域内所有站检验结果表明采用 ECMWF 模式背景场的 RISE 风速预报误差相对更小(图 11b)。FDP19 站检验结果表明在临近 1-5h 预报时效内, 基于 ECMWF 模式背景场的 RISE 风速预报误差相对更小, 误差减小百分比约为 0.8~14.5%, 平均为 8.7%; 而在 6-24h 预报时效内, 基于 ECMWF 模式背景场的 RISE 风速预报误差相对增大, 误差减小百分比绝大部分为负数, 平均为-1.4%(图 11a)。所有站检验结果表明, 基于 ECMWF 模式背景场的 RISE 系统 1-24h 风速预报误差均小于基于 CMA-BJ 模式背景场, 误差减小百分比在 8.1%~11.9%之间(图 11b)。这可能是由于 ECMWF 模式虽然整体大范围风速预报能力较好, 但由于其模式背景场本身的分辨率相对较低, 对于区域范围较小的冬奥赛区风速精细化预报能力仍比较有限。

图 11 同图 10, 但为风速预报误差及误差减小率

Fig.11 Same as Fig.10, but for the wind speed

因此, 上述北京冬奥会期间复杂山地地面温度和风场百米级高精度融合预报批量对比检验结果说明: RISE 系统 100m 网格分辨率的融合预报产品性能除了受模式背景场水平分辨率和时间分辨率的影响, 更大程度依赖于模式背景场本身的预报性能。模式背景场的时空分辨率越高, 对于 RISE 系统高精度分析和预报产品性能固然是利好的条件, 但并不是 RISE 系统百米级分辨率融合预报性能更优的必要条件。

## 5 结论与讨论

基于高时空分辨率融合集成预报 RISE 系统, 利用北京冬奥会复杂山地区域自动站观测资料, 开展冬奥会期间 2022 年 2 月 4 日到 3 月 13 日期间不同模式背景场对百米级融合集成预报的影响研究, 通过对比检验采用 CMA-BJ 中尺度模式和 ECMWF 全球模式背景场的 RISE 100m 分辨率格点温度和风场预报误差, 得出以下主要结论:

(1) 融合集成预报系统既可采用中尺度模式为背景场, 也可采用全球模式为背景场。虽然 ECMWF 模式分辨率相对较粗, 且冬奥赛区的高海拔特征较难以体现, 但通过 RISE 系统复杂地形百米级降尺度算法和观测资料快速融合订正后也能够得到高分辨率的精细化融合分析产品。RISE 系统 100 米分辨率实况分析产品性能主要取决于观测资料融合作用, 模式时空分辨率的影响相对很小, 在一定程度上可不考虑。但是, 百米级融合预报产品性能不仅受模式时间和空间分辨率的影响, 也较大程度依赖于模式背景场本身的预报性能。

(2) 地面 2-m 温度检验结果表明, 相比于基于 CMA-BJ 模式背景场, 基于 ECMWF 模式背景场的 RISE 100m 分辨率温度 1-24h 预报产品在复杂地形高山区域的预报误差更小, 冬奥 FDP 高山 19 站平均绝对误差减小百分比平均为 10.5%, RISE 系统 100km×100km 全域范围内的温度预报 MAE 误差减小百分比则平均为 7.0%。在精细化程度方面, 不同模式背景场的温度预报产品精细化程度基本持平, 这主要源于局地稠密观测资料融合和地形调整作用。

(3) 地面 10-m 风速检验结果表明, 基于 CMA-BJ 和 ECMWF 模式背景场的风速误差也存在明显差异。相比于基于 CMA-BJ 模式背景场, 基于 ECMWF 模式背景场的 RISE 100m 分辨率

冬奥 FDP 高山 19 站风速 1-5h 时效比基于 CMA-BJ 模式背景场的误差更小。在精细化程度方面，基于时空分辨率更高的中尺度模式 CMA-BJ 背景场的 RISE 风场产品精细化程度更优，这主要是因为 RISE 系统 6h 后预报权重以模式预报为主，如果模式背景场本身分辨率低，则风场的小尺度局地性特征也较难在 RISE 系统中体现。

本文试验采用了 3h 间隔的 ECMWF 模式预报数据，采用时间插值方法获取 1h 间隔的降尺度中间数据，这是因为当前实际实时业务应用中只能获取 3h 间隔、地面 0.125 度、高空 0.25 度的 ECMWF 模式预报资料。因此，未来若采用时空分辨率更高的 ECMWF 实时资料（1h 间隔、地面和高空均为 0.125 度分辨率）可能有望获得更好的融合预报效果。另外，RISE 系统近地面风场预报性能与基于历史数据统计得出的偏差订正系数有关（杨璐等，2022），温度预报与地形降尺度算法及不同地区的温度可持续性特征有关（陈康凯等，2020），因此未来可通过优化订正系数和降尺度插值与融合算法进一步提升预报准确性。本文主要采用 CMA-BJ 区域模式和 ECMWF 全球模式开展对比研究，但初步测试结果表明采用 CMA-MESO 3km 分辨率区域模式也可有效形成复杂山地百米级精细化温度和风场融合产品。CMA 模式体系（原 GRAPES）是中国气象局自主研发建立的中国数值天气预报业务体系（e.g., 薛纪善和陈德辉，2008；陈静和李晓莉，2020；沈学顺等，2020），其中 CMA-MESO 区域模式是当前我国气象部门业务应用和技术研发的核心模式，因此未来有必要基于 CMA-MESO 模式开展进一步的深入研究。除温度和风场要素之外，降水尤其是强降水的精细化预报对汛期防灾减灾有重要意义。针对 RISE 京津冀降水融合预报（程丛兰等，2019；Song et al. 2019），基于诸如 CMA-BJ、CMA-MESO 等中尺度模式及 ECMWF、CMA-GFS 等全球模式（陈超君等，2012；沈学顺等，2020），开展不同模式背景场对比试验，研究基于多模式的高时空分辨率融合集成技术及后处理订正技术（智协飞和黄闻，2019；陈博宇等，2020），也是未来的重要研究方向之一。

致谢：感谢北京市气象局为本研究提供观测数据和模式数据。感谢任萍、张延彪在源代码修改测试方面的帮助。感谢卢冰、秦睿、杨扬、张帅在数值模式方面提供的帮助。

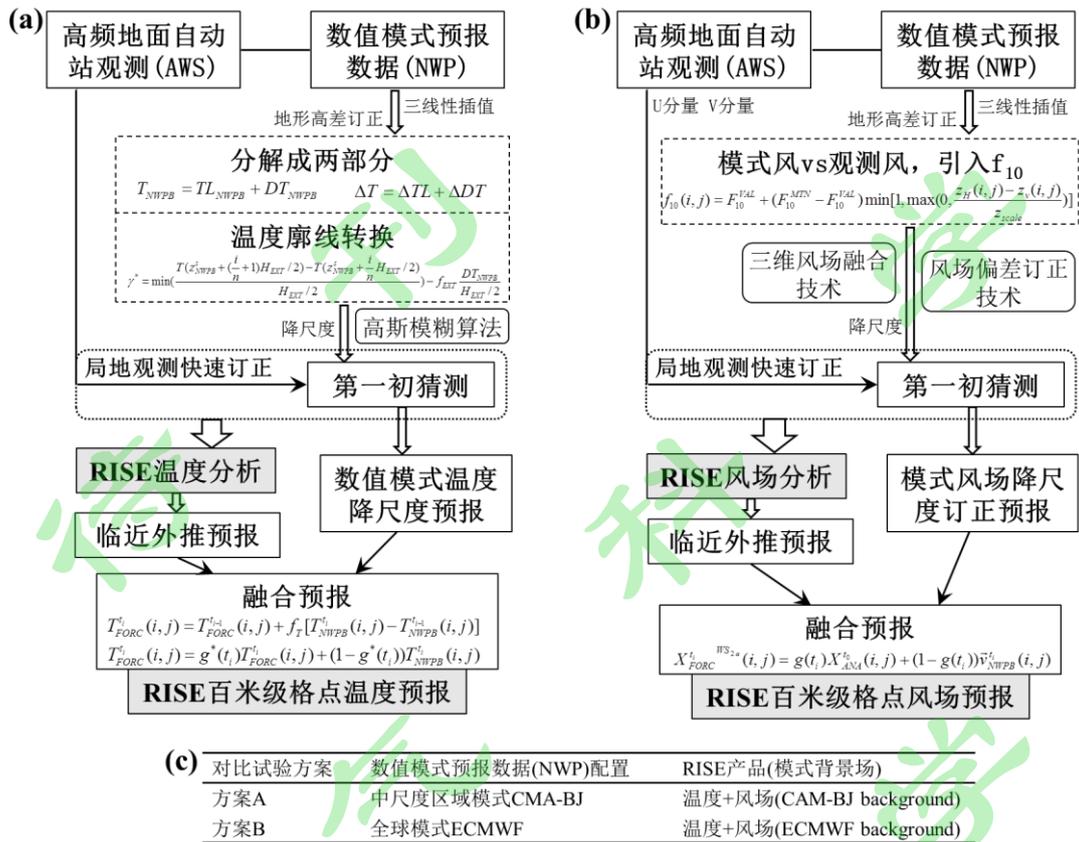


图 1 RISE 系统(a)温度和(b)风场技术路线, (c)对比试验方案

Fig.1 Technical scheme of (a) temperature and (b) wind field for RISE system, (c) scheme of the comparison test

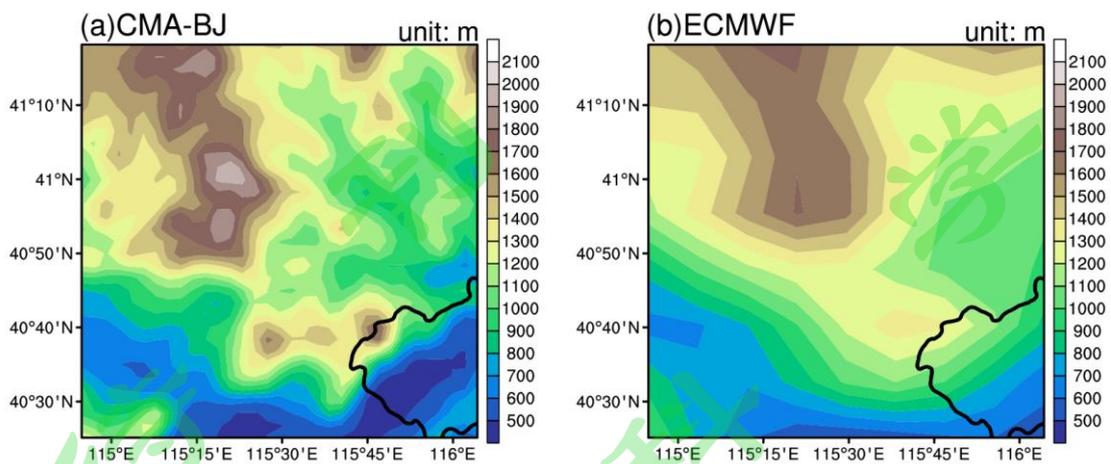


图 2 RISE 冬奥系统区域范围内(a) CMA-BJ 模式, (b) ECMWF 模式地形高度, 单位: 米  
 Fig.2 Topographic height of (a) CMA-BJ model, (b) ECMWF model in the region of RISE Winter Olympics system. Unit: meter

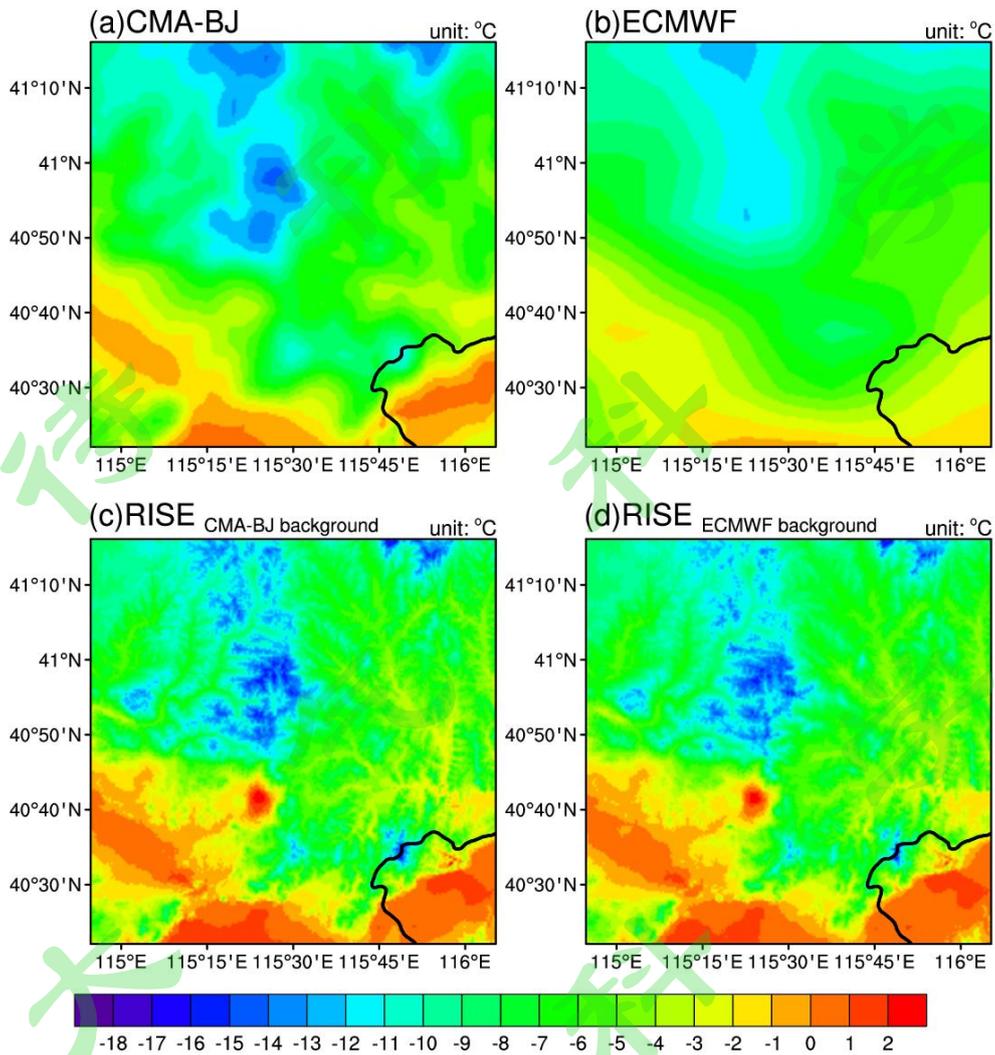


图 3 (a) CMA-BJ 和(b) ECMWF 模式的地面 2-m 温度模式背景场, (c)基于 CMA-BJ 和(d)基于 ECMWF 模式背景场的 RISE 地面 2-m 温度分析场, 模式背景场时间为 20211229 00:00UTC+7h, RISE 分析时间为 20211229 07:00UTC, 单位: °C

Fig.3 Surface 2-m temperature field of (a) CMA-BJ model, (b) ECMWF model, and the corresponding RISE surface 2-m temperature analysis product based on CMA-BJ model, (d) ECMWF model as NWP backgrounds. The model background time is 20211229 00:00UTC+7h, and the RISE analysis time is 20211229 07:00UTC. Unit: °C

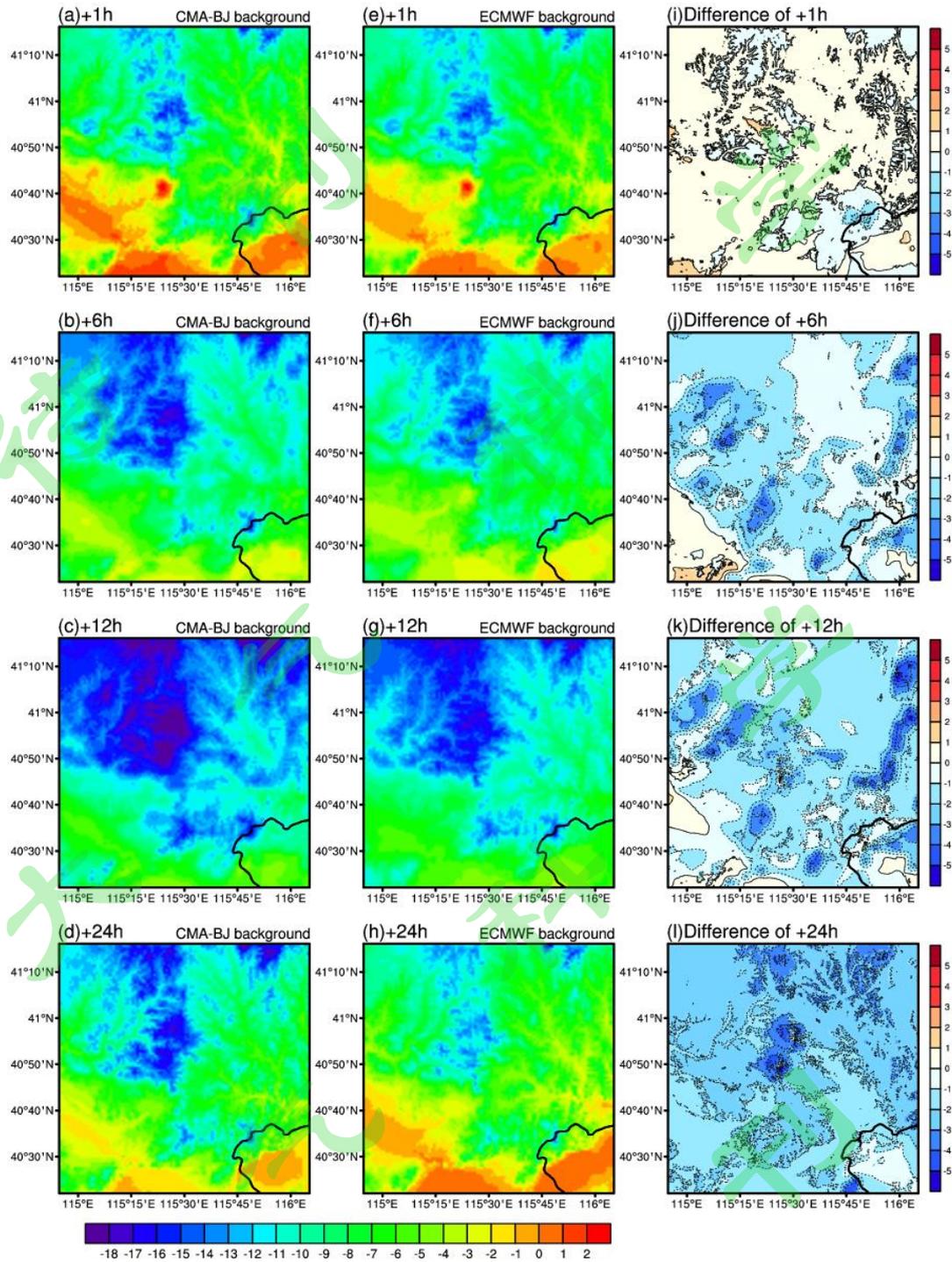


图 4 RISE 系统地面 2-m 温度预报场，(a)-(d)基于 CMA-BJ 模式背景场，(e)-(h)基于 ECMWF 模式背景场，(i)-(l)为两者之间的差异。第一、二、三、四行分别为+1h、+6h、+12h、+24h 预报结果，RISE 起报时间 20211229 07:00UTC，单位：°C

Fig.4 Surface 2-m temperature forecasts of RISE system, (a)-(d) based on CMA-BJ model background, (e)-(h) based on ECMWF model background, and (i)-(l) are their differences. The first, second, third and fourth lines are +1h, +6h, +12h and +24h forecast results, respectively. The initial time of RISE system is 20211229 07:00UTC. Unit: °C

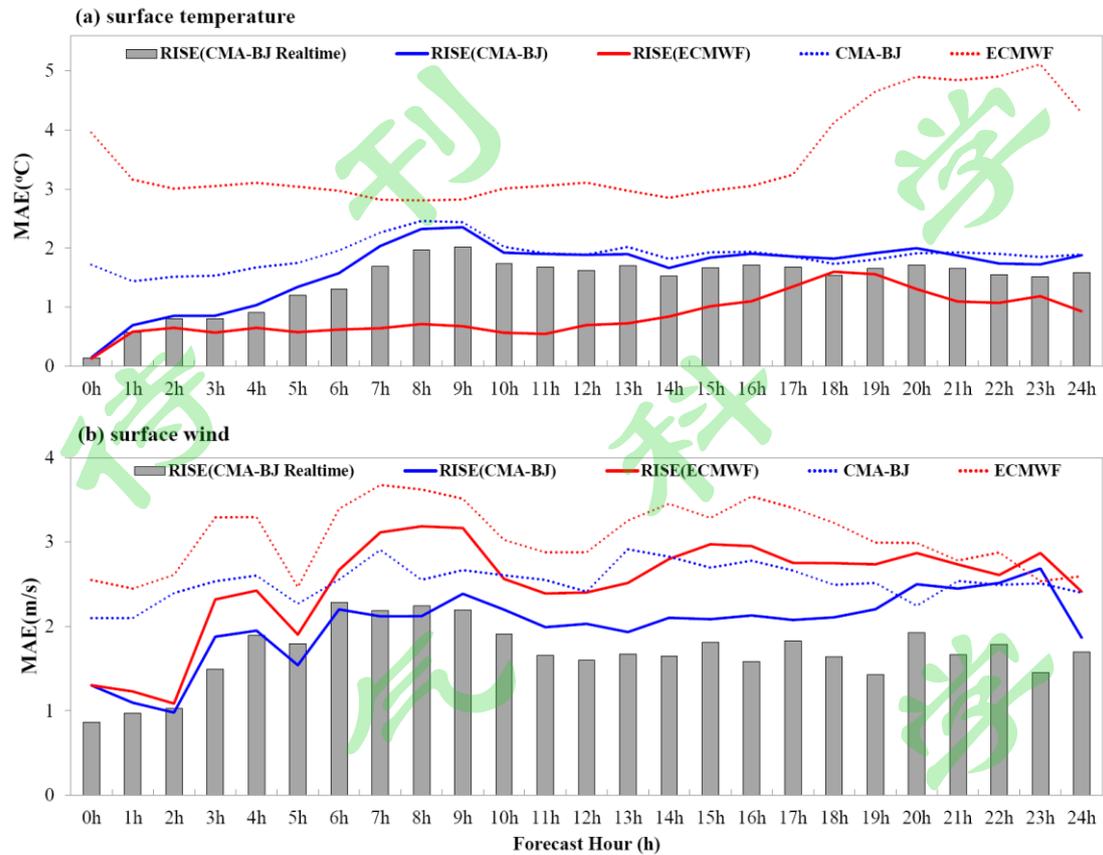


图 5 RISE 系统 20211129 07:00UTC 起报的个例对比试验结果，(a)温度，(b)风速。纵坐标为误差，横坐标为预报时效。虚线为原始模式背景场误差，实线为 RISE 系统基于不同模式背景场的 100m 分辨率试验产品误差，柱状为 RISE 实时业务产品误差

Fig.5 Comparison results of RISE system test for the case initialized at 20211129 07:00UTC. (a) temperature, (b) wind speed. The ordinate is the error and the abscissa is the forecast hours. The dashed lines are the original model background errors, the solid lines are the RISE 100m resolution test product errors based on different backgrounds, and the bars are the RISE real-time product errors

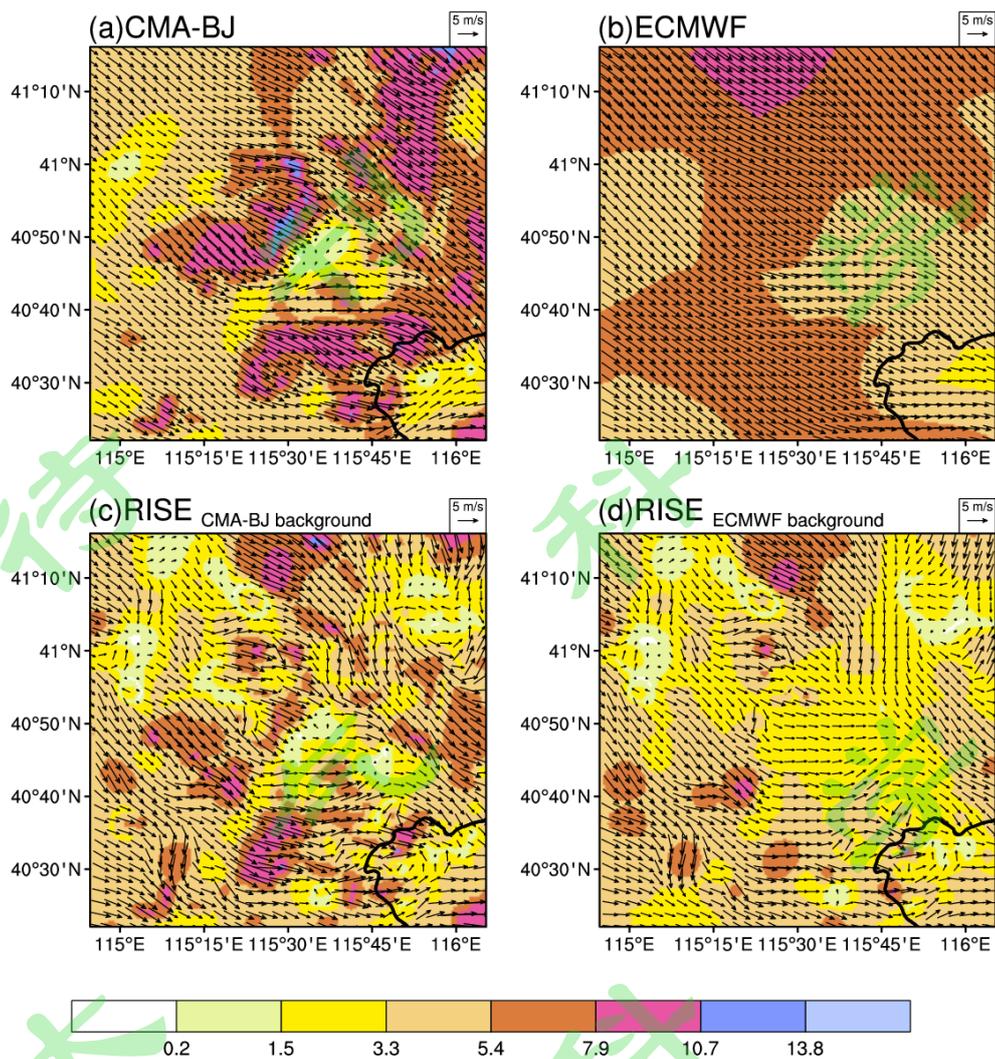


图 6 同图 3，但为地面 10-m 风场，为了防止箭头太密每隔 30 个格点绘制矢量箭头，单位：m/s

Fig.5 Same as Fig.3, but for the surface 10-m wind. Vector arrows are drawn every 30 grid points in order to prevent arrows being too dense. Unit: m/s

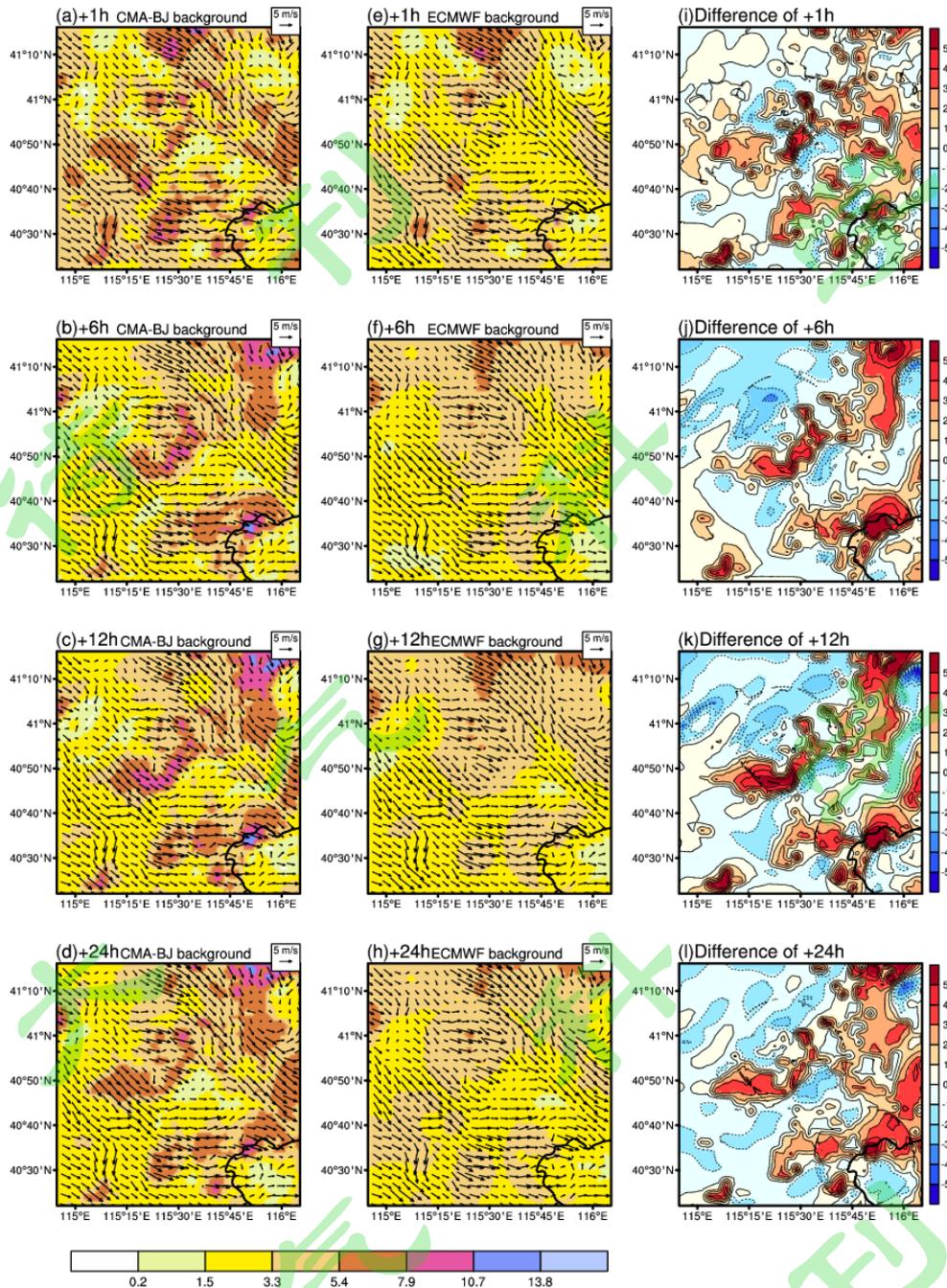


图7 同图4，但为地面10-m风场预报

Fig.7 Same as Figure 4, but for 10-m surface wind field forecast

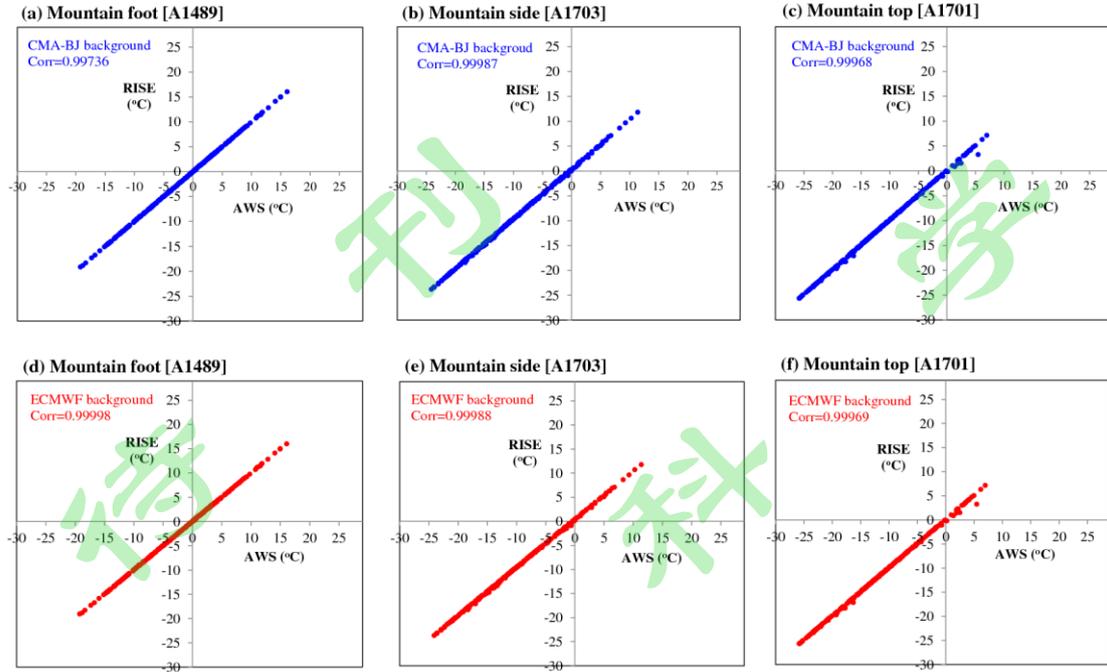


图 8 基于 CMA-BJ 模式背景场的 RISE 系统(a)山脚 A1489 站-西大庄科, (b)山腰 A1703 站-竞速 3 号, (c)山顶 A1701 站-竞速 1 号温度分析和观测散点图, Corr 表示分析和观测之间的相关系数; (d)-(f)同(a)-(b), 但为基于 ECMWF 模式背景场

Fig.8 Scatter diagram of RISE temperature analysis and observation based on CMA-BJ model background, (a) A1489 station at mountain foot , (b) A1703 station on mountainside, (c) A1701 station at mountain top. Corr represents the correlation coefficient between analysis and observation; (d)-(f) are the same as (a)-(b), but based on ECMWF model background

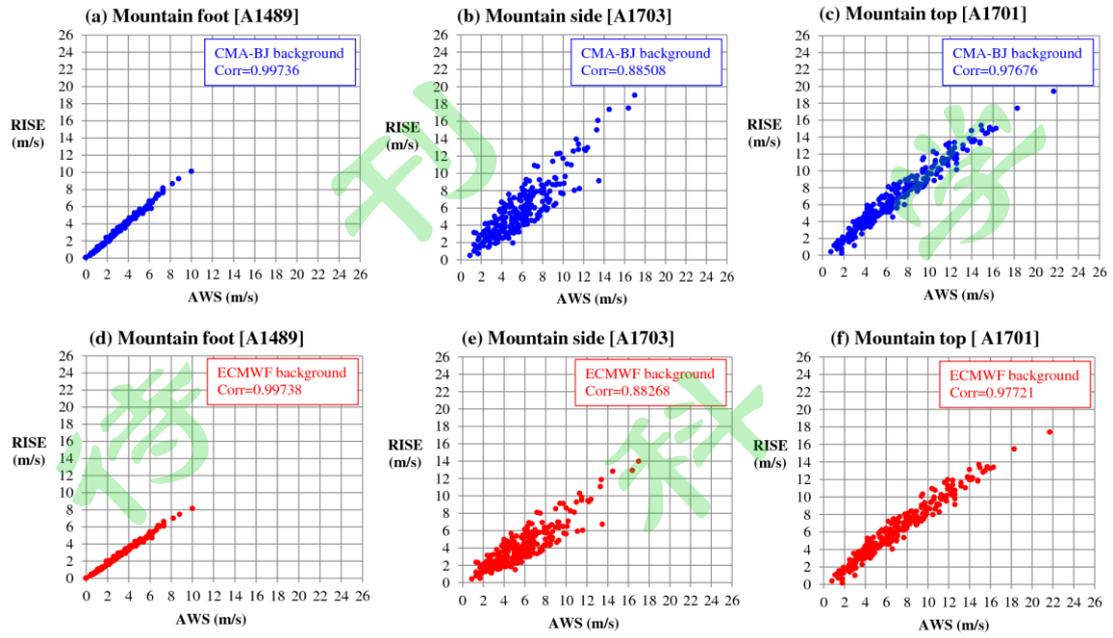


图9 同图8，但为风速  
Fig.9 Same as Fig.8, but for the wind speed

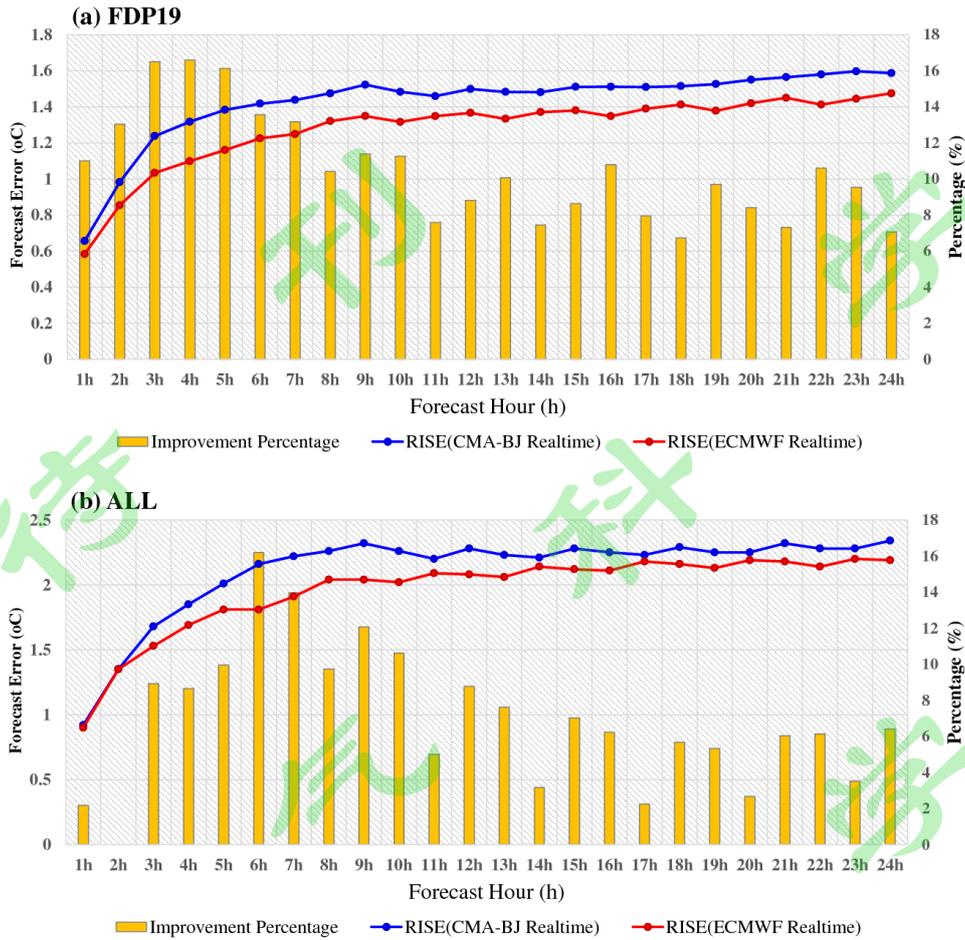


图 10 2022 年 2 月 4 日到 3 月 13 日平均的 RISE 系统 1-24 小时温度预报误差(左坐标, MAE: °C) 及误差减小率(右坐标, 基于 ECMWF 背景场减去基于 CAM-BJ 背景场: %), (a)冬奥 FDP 高山 19 站和(b)研究区域内全部站点检验结果

Fig.10 The mean temperature forecast errors (left coordinate, MAE: °C) and error reduction rate (right coordinate, ECMWF background minus CAM-BJ background: %) of RISE system from February 4 to March 13, 2022. Results of (a) Winter Olympic FDP 19 stations in high mountain area and (b) all stations in the whole complex terrain area

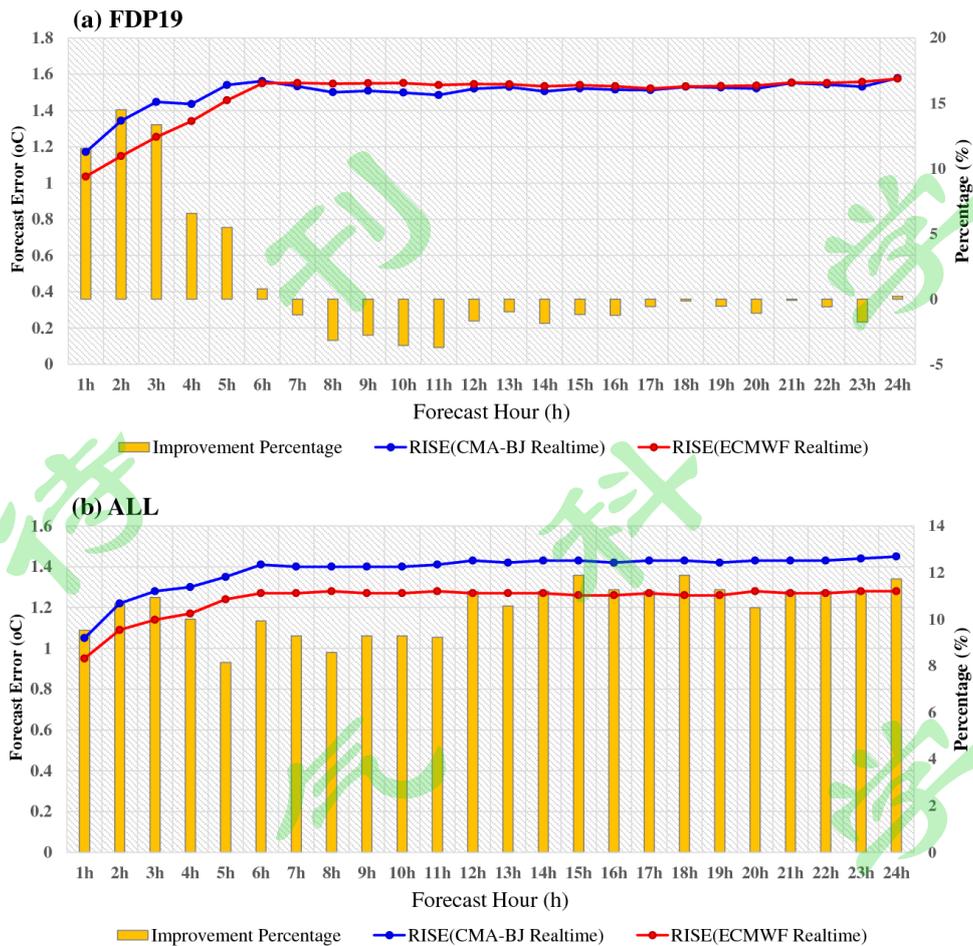


图 11 同图 10, 但为风速预报误差及误差减小率  
Fig.11 Same as Fig.10, but for the wind speed

参考文献 (References)

Brunet G, Jones S, Mills B. 2015. Seamless prediction of the Earth system: from minutes to months [EB/OL]. [http://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_1156\\_en.pdf](http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1156_en.pdf).

曹越, 赵琳娜, 巩远发, 等. 2019. ECMWF 高分辨率模式降水预报能力评估与误差分析[J]. 暴雨灾害, 38(3): 249 - 258. Cao Y, Zhao L N, Gong Y F, et al. 2019. Evaluation and error analysis of precipitation forecast capability of the ECMWF high-resolution model [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 38(3): 249-258.

陈博宇, 代刊, 唐健, 等. 2020. 基于多模式 QPF 融合的台风暴雨预报后处理技术研究及应用试验[J]. 气象, 46(10): 1261 - 1271. Chen B Y, Dai K, Tang J, et al. 2020. Research and application experiment on post-processing technology of typhoon rainstorm forecast based on multi-model QPF fusion [J]. *Meteor Mon (in Chinese)*, 46(10): 1261-1271.

陈超君, 王东海, 李国平, 等. 2012. 冬季高海拔复杂地形下 GRAPES-MESO 要素预报的检验评估[J]. 气象, 38(6): 657 - 668. Chen C J, Wang D H, Li G P, et al. 2012. A study of the GRAPES-Meso prediction verification for high altitude and complex terrain during winter time [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38(6): 657-668.

Chen M X, Quan J N, Miao S G, et al. 2018. Enhanced Weather Research and Forecasting in

Support of the Beijing 2022 Winter Olympic and Paralympic Games [J]. WMO Bulletin, 67(2): 58–61.

陈明轩, 付宗钰, 梁丰, 等. 2021. “智慧冬奥 2022 天气预报示范计划” 进展综述[J]. 气象科技进展, 11(6): 8 – 13. Chen M X, Fu Z Y, Liang F, et al. 2021. A review of SMART2022-FDP progress [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 11(6): 8 – 13.

陈康凯, 宋林焯, 杨璐, 等. 2020. 一种基于高斯模糊的复杂地形下高分辨率三维插值方法的研究与试验应用[J]. 高原气象, 39(2): 367 – 377. Chen K K, Song L Y, YANG L, et al. 2020. Research and application of a three-dimensional interpolation method for high-resolution temperature in complex terrain based on Gaussian fuzzy. Plateau Meteorology (in Chinese), 39(2): 367–377.

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. 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. Adv Meteo Sci Technol (in Chinese), 10(2): 9 – 18, 29

程从兰, 陈敏, 陈明轩等. 2019. 临近预报的两种高时空分辨率定量降水预报融合算法的对比试验[J]. 气象学报, 77(4): 701 – 714. Cheng C L, Chen M, Chen M X, et al. 2019. Comparative experiments on two high spatiotemporal resolution blending algorithms for quantitative precipitation nowcasting [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 77(4): 701–714.

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., et al. 2007. The shuttle radar topography mission. Reviews of Geophysics [J]. 45(2), <https://doi.org/10.1029/2005rg000183>.

高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 2010. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验[J]. 大气科学, 30(2): 185 – 192. Gao X J, Xu Y, Zhao Z C, et al. 2020. Impacts of Horizontal Resolution and Topography on the Numerical Simulation of East Asian Precipitation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(2): 185–192.

Haiden T, A Kann, C Wittmann, et al. 2011. The integrated nowcasting through comprehensive analysis (INCA) system and its validation over the Eastern Alpine region [J]. Wea Forecasting, 26: 166–183.

何静, 陈敏, 仲跻芹, 等. 2019. 雷达反射率三维拼图观测资料在北方区域数值模式预报系统中的同化应用研究[J]. 气象学报, 77(2): 210 – 232. He J, Chen M, Zhong J Q, et al. 2019. A study of three-dimensional radar reflectivity mosaic assimilation in the regional forecasting model for North China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 77(4): 701–714.

何晓凤, 周荣卫, 孙逸涵. 2014. 3 个全球模式对近地层风场预报能力的对比检验[J]. 高原气象, 33(5): 1315 – 1322. He X F, Zhou W R, Sun Y H. 2014. Verification of surface wind speed of three global circulation models in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33(5): 1315 – 1322.

姜燕敏, 黄安宁, 吴昊旻. 2015. 不同水平分辨率 BCC\_CSM 模式对中亚地面气温模拟能力评估 [J]. 大气科学, 39 (3): 535 – 547. Jiang Y M, Huang A N, Wu H M. 2015. Evaluation of the performance of Beijing climate center climate system model with different horizontal resolution in simulating the annual surface temperature over Central Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 535–547.

金荣花, 代刊, 赵瑞霞, 等. 2019. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. 气象, 45(4): 445 – 457. Jin R H, Dai K, Zhao R X, et al. 2019. Process and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 45(4): 445 – 457.

Kann A, C Wittmann, B Bica, et al. 2015. On the Impact of NWP Model Background on Very

High-Resolution Analyses in Complex Terrain [J]. *Wea Forecasting*, 30: 1077-1089.

孔祥慧, 王爱慧, 毕训强, 等. 2021. CAS-ESM 模式对欧亚大陆逐日降水特征的数值模拟: 物理参数化方案和水平分辨率的影响[J]. *大气科学*, 45(4): 725 - 745. KONG X H, WANG A H, Bi X Q, et al. 2021. Simulation of Daily Precipitation Characteristics in Eurasia Using CAS-ESM Model: Sensitivity of Physical Parameterization Schemes and Horizontal Resolutions [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(4): 725-745.

全继萍, 李青春, 仲跻芹, 等. 2022. “CMA-北京模式”中三种不同阵风诊断方案在北京地区大风预报中的评估[J]. *气象学报*, 80(1): 108 - 123. Quan J P, Li Q C, Zhong J Q, et al. 2022. Evaluation of three different gust diagnostic schemes in the CMA-BJ for gale forecasting over Beijing [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 80(1): 108-123.

沈学顺, 王建捷, 李泽椿, 等. 2020. 中国数值天气预报的自主创新发展 [J]. *气象学报*, 78(3): 451 - 476. Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al. 2020. China's independent and innovative development of numerical weather prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 78(3): 451 - 476.

宋林焯, 陈明轩, 程丛兰, 等. 2019. 京津冀夏季雷达定量降水估测的误差统计及定量气候校准[J]. *气象学报*, 77(3): 497 - 515. Song L Y, Chen M X, Cheng C L, et al. 2019. Characteristics of summer QPE error and a climatological correction method over Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 77(3): 497-515.

Song L Y, M X Chen, F Gao, et al. 2019. Elevation influence on rainfall and a parameterization algorithm in the Beijing area [J]. *J. Meteor. Res.*, 33(6): 1143-1156.

田芝平, 姜大勝. 2013. 不同模式分辨率 CCSM4 对东亚和中国气候模拟能力分析[J]. *大气科学*, 37(1): 171 - 186. Tian Z P, J D B. 2013. Evaluation of the performance of low- to high-resolution CCSM4 over East Asia and China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (1): 171 - 186.

王倩倩, 陈羿辰, 程志刚, 等. 2023. 海陀山冬奥气象综合观测平台及研究进展. *气象学报*, 81(1): 175 - 192. Wang Q Q, Chen Y C, Cheng Z G, et al. 2023. A comprehensive meteorological observation platform for the 2022 Beijing Winter Olympic Games over the Haitou mountain: Configuration, application, and development [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 81(1): 175-192.

Virmavirta M, Kivekäs J. 2012. The effect of wind on jumping distance in ski jumping - fairness assessed [J]. *Sports Biomech*, 11(3): 358 - 369.

辛渝, 汤剑平, 赵逸舟, 等. 2010. 模式不同分辨率对新疆达坂城—小草湖风区地面风场模拟结果的分析[J]. *高原气象*, 29(4): 884 - 893. Xin Y, Tang J P, Zhao Y Z, et al. 2010. Simulation of surface wind using MM5 model with different resolutions—a case study of Dabancheng and Xiaocaohu wind farms from April to September 2006 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29(4): 884-893.

薛纪善, 陈德辉. 2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用. 北京: 科学出版社, 383pp. Xue J S, Chen D H. 2008. Scientific Design and Application of GRAPES Numerical Prediction System. Beijing: Science Press (in Chinese), 383pp

杨璐, 陈敏, 陈明轩, 等. 2019. 高时空分辨率三维风场在强对流天气临近预报中的融合应用研究. *气象学报*, 77(2): 243 - 255. Yang L, Chen M, Chen M X. 2019. Fusion of 3D high temporal and spatial resolution wind field and its application in nowcasting of severe convective weather. *Acta Meteorol Sin (in Chinese)*, 77(2): 243-255.

杨璐, 宋林焯, 荆浩, 等. 2022. 复杂地形下高精度风场融合预报订正技术在冬奥会赛区风速

预报中的应用研究[J]. 气象, 48(2): 162 - 176. Yang L, Song L Y, Jing H, et al. 2022. Fusion prediction and correction technique for high-resolution wind field in Winter Olympic Games area under complex terrain [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 48(2): 162-176.

章鸣, 连志鸾, 平凡, 等. 2022. 河北冬奥赛区一次夜间增温过程的数值模拟及诊断[J]. 大气科学, 46(1): 168 - 180. Zhang M, Lian Z L, Ping F, et al. 2022. Numerical Simulation and Diagnosis of a Nocturnal Warming Process in the Hebei Winter Olympic Games Area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(1): 168-180.

张宇, 郭振海, 张文煜, 等. 2010. 中尺度模式不同分辨率下大气多尺度特征模拟能力分析[J]. 大气科学, 34(3): 653 - 660. Zhang Y, Guo Z H, Zhang W Y, et al. 2010. Analysis of Mesoscale Numerical Model's Ability in Atmospheric Multi-Scale Characteristics Simulation for Different Resolutions [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(3): 653-660.

曾庆存. 1979. 数值天气预报的数学物理基础: 第一卷. 北京: 科学出版社, 543pp. Zeng Q C. 1979. Mathematical and Physical Basis of Numerical Weather Prediction (Vol. 1). (in Chinese), Beijing: Science Press, 543pp .

智协飞, 黄闻. 2019. 基于卡尔曼滤波的中国区域气温和降水的多模式集成预报[J]. 大气科学学报, 42(2): 197 - 206. Zhi X F, Huang W. 2019. Multimodel ensemble forecasts of surface air temperature and precipitation over China by using Kalman filter [J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 42(2): 197 - 206.

中国气象局. 2022. 北京 2022 年冬奥会和冬残奥会气象保障服务成果·科技支撑卷. 气象出版社. China Meteorological Administration. 2022. Beijing 2022 Winter Olympic and Paralympic Winter Games Meteorological support services achievements • Scientific and Technological support volume.

Zhong J Q, B Lu, W Wang, et al. 2020. Impact of Soil Moisture on Winter 2-m Temperature Forecasts in Northern China [J]. Journal of Hydrometeorology, 21: 597-614.

气  
科  
风  
刊  
气  
情