

百米级快速融合预报 RISE 系统研发及其北京冬奥会应用评估

宋林烨^{1,3}, 杨璐^{1,3}, 秦睿^{1,3}, 程丛兰¹, 吴剑坤¹, 曹伟华¹, 高峰¹, 陈敏¹, 陈明轩^{1,2*}

1. 北京城市气象研究院, 北京, 100089

2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京, 210044

3. 北京城市气象工程技术研究中心, 北京, 100089

摘要: 2022 年北京第 24 届冬季奥林匹克运动会 (简称北京冬奥会) 对气象保障服务提出了“百米级、分钟级”的刚性需求, 尤其是对平均风、阵风及温度、雨雪等的精细化精准预报。针对该需求, 北京城市气象研究院研发了北京地区高时空分辨率快速融合无缝隙集成预报系统 (Rapid-refresh Integrated Seamless Ensemble system, 简称 RISE/睿思), 实现了百米尺度、高频更新的多源数据快速融合预报, 在冬奥气象保障服务获得了全方位应用。本文首先总结了 RISE 系统的基本框架、核心算法和技术进展。该系统通过实时快速融合京津冀尤其是冬奥赛区加密自动站逐 5 分钟观测资料、天气雷达逐 6 分钟扫描资料及临近预报、中尺度数值预报、大涡模拟预报等多源数据, 引入复杂地形降尺度、无缝隙融合技术、百米级偏差订正技术等, 实现京津冀地区 500 米网格、冬奥山地赛区 100 米网格、逐 10 分钟更新循环的地面温、湿、风、阵风及降水、降水相态的精细化分析和未来 0-24 小时预报, 以及冬奥六个室外核心场馆 (群) 67 米分辨率、逐 12 小时更新的地面常规要素的未来 0-10 天预报。然后, 基于长序列批量检验和若干典型天气个例, 评估 RISE 产品在北京冬奥会测试及正式比赛期间的实时应用效果, 给出当前北京及其周边复杂山地区域冬季天气的总体预报水平。最后, 讨论了“百米级、分钟级”天气预报技术未来的发展方向和所面临的关键技术难点。研究成果可以为冬奥等重大活动气象保障决策提供精细、精准的客观预报支撑, 也可以应用于日常天气预报预警服务以及能源、水文等交叉领域, 具有重要的科学意义和业务应用价值。

关键词: RISE 系统, 百米级分辨率, 多源资料融合, 快速更新循环, 北京冬奥会

文章编号

中图分类号

文献标识码

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2409.23139

收稿日期 2023-11-02; **网络预出版日期:**

作者简介 宋林烨, 研究员, 主要从事多源数据融合、临近预报、机器学习应用研究。Email: lysong@ium.cn

通讯作者 陈明轩, 研究员, 主要从事强对流机理和高影响天气短临预报研究。Email: mxchen@ium.cn

资助课题 国家重点研发计划 2018YFF0300102, 中国气象局创新发展专项 CXFZ2021Z013, 国家自然科学基金 42275012, 北京市自然科学基金 8212025、8222051, 北京市科技计划课题 Z221100005222012, 北京市气象局科技项目 BMBKJ202004011

Funded by National Key Research and Development Program (Grant 2018YFF0300102), Innovation Development Project of China Meteorological Administration (Grant CXFZ2021Z013), National Natural Science Foundation of China (Grant 42275012), Beijing Natural Science Foundation (Grants 8212025, 8222051), Beijing Science and Technology Project (Grant Z221100005222012), Science and Technology Project of Beijing Meteorological Bureau (Grant BMBKJ202004011)

Development of Rapid-refresh Integrated Seamless Ensemble system at hundred-meter resolution scale and its application evaluation in Beijing Winter Olympics

SONG Linye^{1,3}, YANG Lu^{1,3}, QIN Rui^{1,3}, CHENG Conglan¹, WU Jiankun¹, CAO Weihua¹,
GAO Feng¹, CHEN Min¹, CHEN Mingxuan^{1,2*}

¹ Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China

² Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

³ Beijing Urban Meteorological Engineering Research Center, Beijing 100089, China

Abstract: The 24th Winter Olympic Games in 2022 (referred to as the Beijing Winter Olympic Games) has put forward the rigid demand of "100-meter and minute-updated" meteorological support services, especially for the forecast demand of refined and accurate wind, gust, temperature, rain and snow, etc. In order to achieve this goal, the Institute of Urban Meteorology has developed a high spatio-temporal resolution Rapid-refresh Integrated Seamless Ensemble (RISE) system, which provided fast fusion forecasts based on multi-source data with hundred-meter resolution scale and minute-level update frequency, and was applied during the Beijing Winter Olympic meteorological support service. This paper firstly summarizes the basic framework, core algorithms and technical progress of RISE system. It integrates multi-source observation data and model forecast products including the 5-min updated surface automatic weather stations, 6-min updated weather radars, nowcasting products, meso-scale numerical forecast products and high-resolution real-time large eddy simulation data, and further introduces complex terrain downscaling technology, seamless fusion technology, high-resolution deviation correction technology, etc. It can generate 10-min updated fine grid analysis and future 0-24h forecast products including surface temperature, humidity, wind, gust, precipitation and precipitation types with a horizontal resolution of 500-meter in Beijing-Tianjin-Hebei region and 100-meter resolution in Winter Olympics mountainous region, and also provide 12-hour updated future 0-10d forecasts of conventional meteorological elements with 67-meter resolution in six outdoor Winter Olympic venues. Then, based on the long-term verification and several typical cases, this paper also evaluates the real-time application performance of RISE products during the Beijing Olympic test and race periods, and gives the current level of winter weather prediction over complex mountainous area in Beijing and its surroundings. Finally, the future development and key technical difficulties of "100-meter and minute-updated" weather forecasting technology are discussed. Results of this study can provide precise and accurate objective meteorological forecast support for major events such as the Winter Olympics, and can also be used in daily weather forecast and early warning services, as well as other interdisciplinary fields such as energy and hydrology, which has important scientific significance and application value.

Key word: RISE system, 100-meter resolution, Multi-source data integration, Rapid-updated cycle, Beijing Winter Olympics

1 引言

最近几年,随着公众和政府天气预报信息越来越精细、精准的实际需求,高时空分辨率短临天气预报技术研究越来越受到重视,其产品也越来越受到关注,尤其是2022年北京冬奥会对诸如风(包括阵风)、温度、雨雪等气象预报提出了“百米级、分钟级”的刚性需求(Chen et al. 2018)。北京冬奥会70%的项目为雪上项目,主要在室外山地赛区举办,赛事安排与天气密切相关。其中,复杂山地赛场的阵性大风预报是最为关键的内容之一,是否出现大风及出现时间直接决定了冬奥赛事“窗口期”的选择(Teakles et al. 2014),而风、温、雨雪等的精准预报不仅直接影响运动员比赛成绩和人身安全,而且对媒体转播、应急救援等冬奥外围保障工作也有重要影响。因此,为了不断满足北京及其周边地区对精细化短临预报产品日益增长的需求,尤其是为了满足北京冬奥会“百米级、分钟级”重大活动气象服务保障需求,亟需研发高分辨率、快速更新的精细预报技术和产品,不仅可以为冬奥赛事决策提供精细的客观预报支撑,也可以广泛应用于日常天气预报预警服务中。

在过去一二十年,我国天气预报取得了巨大进展,这主要得益于气象科技与信息技术的快速进步,电子通讯、计算系统与观测系统的不断发展,以及用户对天气信息越来越精细化、个性化的专业需求(金荣花等,2019)。在天气预报业务中,当前最重要的技术手段是数值天气预报。中国的数值天气预报研究最早开始于1954年,取得了大量有广泛国际影响力的自主创新成果(e.g.,顾震潮,1959;曾庆存,1979;陶诗言等,2003)。中国数值预报研究和业务应用最近几十年在理论、方法和数值模式研究方面均取得了一系列巨大重要进展(e.g.,陈德辉和薛纪善,2004;沈学顺等,2020;李泽椿,2010)。近年来,中国气象局通过自主研发建立了中国数值天气预报业务体系—CMA模式体系(原GRAPES)(e.g.,薛纪善和陈德辉,2008;沈学顺等,2017;陈静和李晓莉,2020),首次以自主技术实现了从区域3-10km到全球25-50km分辨率的确定性预报和集合预报,并在模式动力框架、四维变分同化与卫星资料同化技术等方面取得了突破(沈学顺等,2020)。除此之外,北上广等都开展了各自的数值模式研究及业务应用工作,例如北京区域模式CMA-BJ(原RMAPS-ST)(何静等,2019),上海台风模式(张璟等,2022)等。

然而,尽管数值模式技术在不断发展,但受当前理论储备、核心技术和计算机硬件水平限制,业务数值预报要达到“百米级分辨率、分钟级更新”的要求仍较为困难。尤其是对于北京冬奥会,绝大部分室外赛事项目都在约2.5km×2.5km范围的复杂山地举行,不足2.5km水平范围内垂直高差为500~1000米,天气状态存在较大差异,公里尺度预报产品较难满足精细化气象保障服务需求。另外,北京冬奥会几乎是唯一一次在冬季风、大陆性气候主导下在内陆地区举办的冬奥会(Chen et al. 2018),相较于海洋性气候主导下举办的历届冬奥会,北京冬奥气象服务保障也几乎无先例可循。北京冬奥会影响最大、最为关键的气象要素之一是危险性和破坏性极大的阵风,但当前数值预报模式无法直接预报阵风,也没有阵风生成和演变的理论模型(曾庆存,2017)。目前阵风业务预报一般是基于观测资料的经验参数化公

式得到 (Cheng et al. 2012; 全继萍等, 2022)。所以, 基于以上现状, 要实现复杂地形下“百米级分辨率、分钟级更新”的温湿风及雨雪预报, 无缝隙精细化网格预报技术是最为行之有效的技术方向之一。

最近几年, 无缝隙精细化网格气象预报已成为国际主流趋势, 其快速发展主要受益于综合气象观测数据 (张治国等, 2017; 李炬等, 2010) 与多源资料融合分析网格实况产品的支撑 (师春香等, 2019), 更依赖于多尺度数值预报模式与实时快速更新同化预报系统的快速发展 (陈葆德等, 2013)。我国无缝隙精细化网格气象预报起步于 2014 年, 当前已建立了逐 1h 滚动更新、实时共享的全国 5km 分辨率 0~30 天和每日两次滚动的全球 10km 分辨率 0~10 天无缝隙精细化网格气象预报业务 (金荣花等, 2019)。在国际上, 常用的精细化网格气象预报系统诸如美国 NDFD 系统可提供 1 小时更新 2.5km/5km 分辨率 0~45 天无缝隙网格天气预报 (Glahn and Ruth, 2003), 奥地利 SAPHIR 系统可提供逐 10 分钟更新 1km 分辨率 0~3 天概率和确定性天气预报 (Kann et al. 2018), 澳大利亚 OCF 技术可提供 5km 分辨率 0~8 天网格指导预报 (Engel and Ebert, 2012), 韩国 VDAPS 系统为第 23 届平昌冬奥会提供 1 小时更新 1.5km 分辨率 0~12 小时天气预报产品 (Nam et al. 2016)。前人关于无缝隙融合预报技术的研究很多都集中在夏季降水短临预报方面, 这是因为降水一直以来都是汛期天气预报的重点, 例如英国 NIMROD 强降水短临预报系统 (Golding, 1998)、美国 NIWOT 定量降水预报融合系统 (Wilson et al. 2006)、香港天文台 RAPIDS 定量降水融合预报系统 (Wong and Lai, 2006), 以及降水外推和模式融合订正技术 (e.g., Huang et al. 2012; 程丛兰等, 2013; 王玉虹和 Benedikt, 2022), 而关注冬季大风、温度等的前人研究相对较少。另外, 无论国内外, 也无论哪种气象要素, 针对百米级 (0.1km) 或次公里级 (0.5km) 分辨率的无缝隙精细化网格预报技术开展得相对较少, 在北京冬奥会之前我国业务上几乎没有可直接应用的预报产品。

为满足北京冬奥会高精度天气预报服务需求, 提升复杂地形下客观短临无缝隙融合预报技巧, 北京城市气象研究院研发了适用于京津冀地区尤其是冬奥山地赛区的快速更新无缝隙融合与集成预报系统 RISE (Rapid-refresh Integrated Seamless Ensemble system, 中文简称“睿思”), 并将其纳入北京市气象局“睿图 (RMAPS)”模式体系中, 即 RMAPS-RISE。RISE 系统研发开始于 2017 年, 在初期设计中吸收了 INCA 1km 系统 (Haiden et al. 2009, 2011, 2014; Wang et al. 2017) 和香港天文台 RAPIDS 融合系统 (Wong and Lai, 2006) 的先进算法, 以及 RMAPS-IN 1km 集成预报系统的业务运行和应用服务经验, 并研发了新的适合北京冬奥会复杂地形的多项百米尺度高分辨率预报技术。经过最近几年的优化和测试应用, 已初步建立了 0-24 小时预报时效、逐 10 分钟更新的高时空分辨率无缝隙集成融合分析和预报技术, 实现了京津冀地区 500m 分辨率、冬奥山地赛区 1 万平方公里范围内 100m 分辨率的业务应用产品。另外, 为满足北京冬奥会高精度天气预报服务刚性需求, 中国气象局组织实施了“智慧冬奥 2022 天气预报示范计划 (SMART2022-FDP)”, 英文全称 Sciences of

Meteorology with Artificial-intelligence in Research and Technology for Beijing 2022 Winter Olympics — Forecast Demonstration Project, 目标是让国内先进的高分辨率数值预报模式、先进的客观预报技术参与冬奥会天气预报预警服务, 为北京冬奥会气象预报服务团队提供更多更好的气象科技支撑产品(陈明轩等, 2021; 陈明轩等, 2024)。因此, 本文主要针对 RISE 系统, 总结北京地区高时空分辨率融合集成预报核心技术进展, 评估 RISE 实时产品在北京冬奥会 FDP 期间的实战应用效果, 并分析未来发展面临的关键技术难点, 以期“百米级、分钟级”融合预报技术的未来发展提供一定参考。

2 RISE 系统简介

2.1 运行配置

通过综合参考 CMA-BJ 模式(何静等, 2019; 全继萍等, 2022)、临近预报系统(陈明轩等, 2016)的区域范围, 同时充分考虑北京冬奥会气象保障服务和京津冀地区短临天气预报预警日常业务应用需求, 以及运行时效、计算条件等限制, 最终将 RISE 系统设置为覆盖整个京津冀全域、逐 10 分钟更新、500 米分辨率(以下简称为“RISE 京津冀 500m 系统”, 约 760km×610km 范围)和覆盖整个冬奥山地赛区、逐 10 分钟更新、100 米分辨率(以下简称“RISE 冬奥山区 100m 系统”, 约 100km×100km 范围)两套并行系统(图 1a)。RISE 京津冀 500m 和冬奥山区 100m 系统的参数配置如表 1 所示。同时, 为了实现冬奥会“一场一策”、“5 天以上预报精细化”服务需求, RISE 系统还集成了延庆赛区国家高山滑雪中心和国家雪车雪橇中心、张家口赛区云顶和古杨树场馆群、北京赛区首钢园区和国家体育场(鸟巢)六个室外核心场馆(群)逐 12 小时更新、67 米分辨率(以下简称“RISE-Thin 67m 系统”)的网格预报产品(图 1b-1g)。RISE 系统融合了京津冀 10 部天气雷达和 4000 多个地面自动站(图 1a), 其中雷达组网包括北京(S 波段)、天津(S 波段)、秦皇岛(S 波段)、石家庄(S 波段)、沧州(S 波段)、邯郸(S 波段)、张北(C 波段)、承德(C 波段)和 2022 年新增的海陀山(S 波段)、康宝(S 波段)雷达, 自动站网则包含了国家级站、区域站和陆续新建的冬奥赛道加密站。

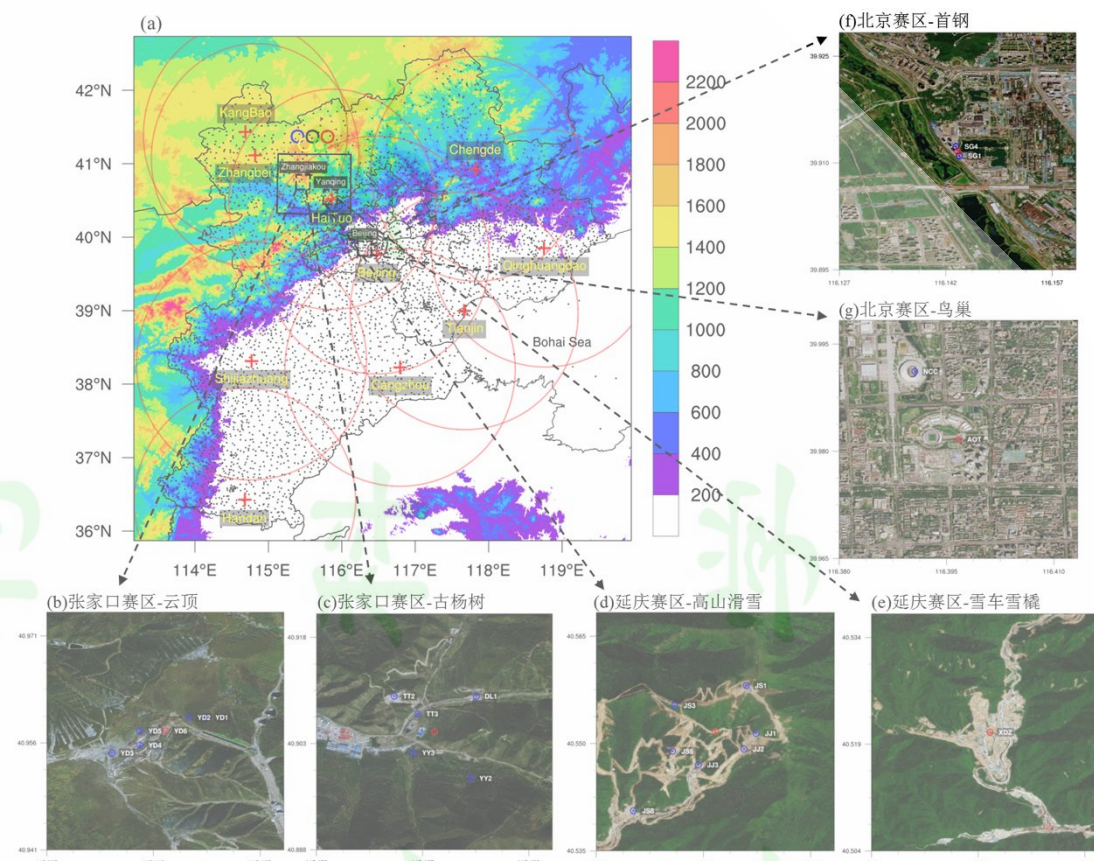


图 1 (a)RISE 系统区域范围、雷达位置（红色+号）、自动站位置（4324 个黑色点）及地形高度（填色，单位：米），其中 RISE 500m 分辨率系统覆盖整个京津冀地区（大图范围），RISE 100m 分辨率系统覆盖冬奥山地赛区（黑色实框）。(b)-(c)为张家口赛区云顶、古杨树场馆群，(d)-(e)为延庆赛区高山滑雪中心、雪车雪橇中心，(f)-(g)为北京赛区鸟巢、首钢场馆群

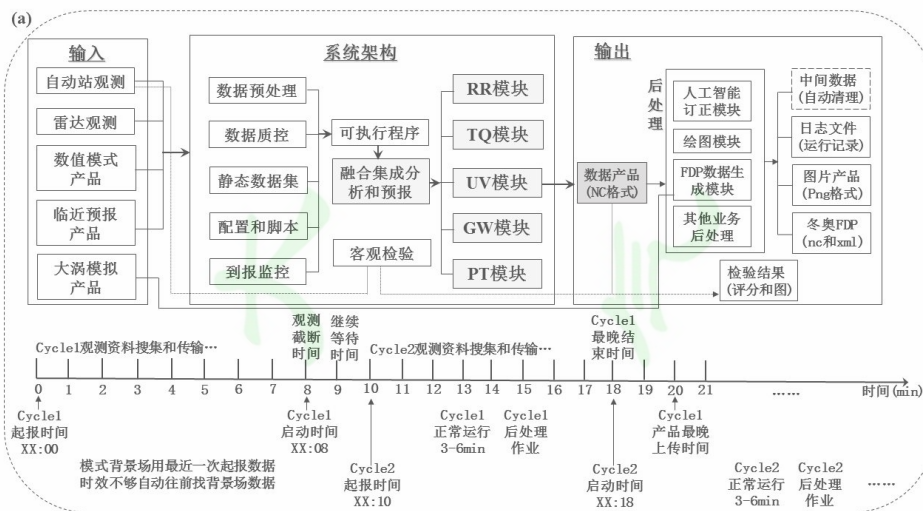
Fig.1 (a) Area of RISE system, locations of radars (red +) and automatic weather stations, and topographic height (shade, unit:m). RISE 500m system covers the entire Beijing-Tianjin-Hebei region (picture range), and RISE 100m system covers the Winter Olympics mountain competition area (solid black box). (b)-(c) Yunding and Guyangshu venues in Zhangjiakou Competition area, (d)-(e) Alpine Skiing Center and snowmobile Sled Center in Yanqing Competition area, (f)-(g) Bird's Nest and Shougang venues in Beijing Competition area

表 1 RISE 系统参数配置表

Table 1 Parameter configuration of RISE system

	RISE 京津冀 500m 系统	RISE 冬奥山区 100m 系统
区域范围	覆盖北京市+河北省+天津市	覆盖延庆赛区+张家口赛区
垂直高度	4000 米	4000 米
东西×南北网格点	1521×1221	1001×1001
网格数量	1,857,141	1,002,001
水平分辨率	500 米	100 米
垂直分辨率	风场 125 米，温湿 200 米	风场 125 米，温湿 200 米
西南角经纬度设置	113.2°E, 35.9°N	115.0°E, 40.4°N
东北角经纬度设置	120.2°E, 42.7°N	116.0°E, 41.2°N
投影方式设置	兰勃脱	兰勃脱
投影参考纬度	33°N, 43°N	40°N, 42°N
投影中心点经度	116.5°E	115.5°E

RISE 系统多源输入资料主要包括自动站观测、雷达观测、数值模式预报、临近预报数据，同时也集成了大涡模拟产品（图 2a）。其中，自动站观测时间分辨率为 5 分钟，冬奥赛道加密站的布设相对较晚且存在迁站过程（张治国等，2017）。雷达资料由北京自动临近预报系统 BJANC（陈明轩等，2010）通过京津冀地区雷达拼图和计算得到，空间分辨率为 1 公里，时间分辨率为 6 分钟。数值模式背景场采用 CMA-BJ 模式华北地区 3km 分辨率数据。临近预报产品由睿图-临近数值预报系统提供，主要采用了其高时空分辨率多普勒雷达四维变分同化得到的三维风场数据产品（Sun et al. 1997；陈明轩等，2016）。其中融合集成分析和预报包括 RR 降水、TQ 温湿、UV 风、GW 阵风和 PT 降水相态五大核心模块（图 2b）。RISE 系统实时运行须考虑运算速度，满足逐 10 分钟更新的目标，因此软件架构、核心算法、业务运行流程、文件结构等均采用模块化设计，具有模块扩展性强、大数据快速处理、连续运算稳定和高效的优势。开发初期的对比试验表明，RISE 系统比原集成预报系统的运行速度提升了约 10 倍，为百米级分辨率、分钟级更新的实现提供了基础条件。速度提升策略还包括编译选项优化、OpenMP 并行运行优化、多路高效 I/O 并发。观测截断时间设为 8 分钟，也即每个循环把从起报时次开始 8-9 分钟内搜集到的观测资料进行有效融合吸收（图 2a）。RISE 京津冀 500m 和冬奥山区 100m 系统一般 3~6 分钟完成运算，不同计算平台存在一定差异。最后，根据优先级别串行或并行运行 RISE 后处理，包括人工智能订正、后处理产品制作，其中冬奥 FDP 产品对时效要求最高。为了提升系统运行稳定性，模式背景场优先采用最近一次起报数据作为初猜场，但在时效不够或模式背景场数据缺失、晚到情况下，RISE 系统自动往前寻找和切换模式背景场。



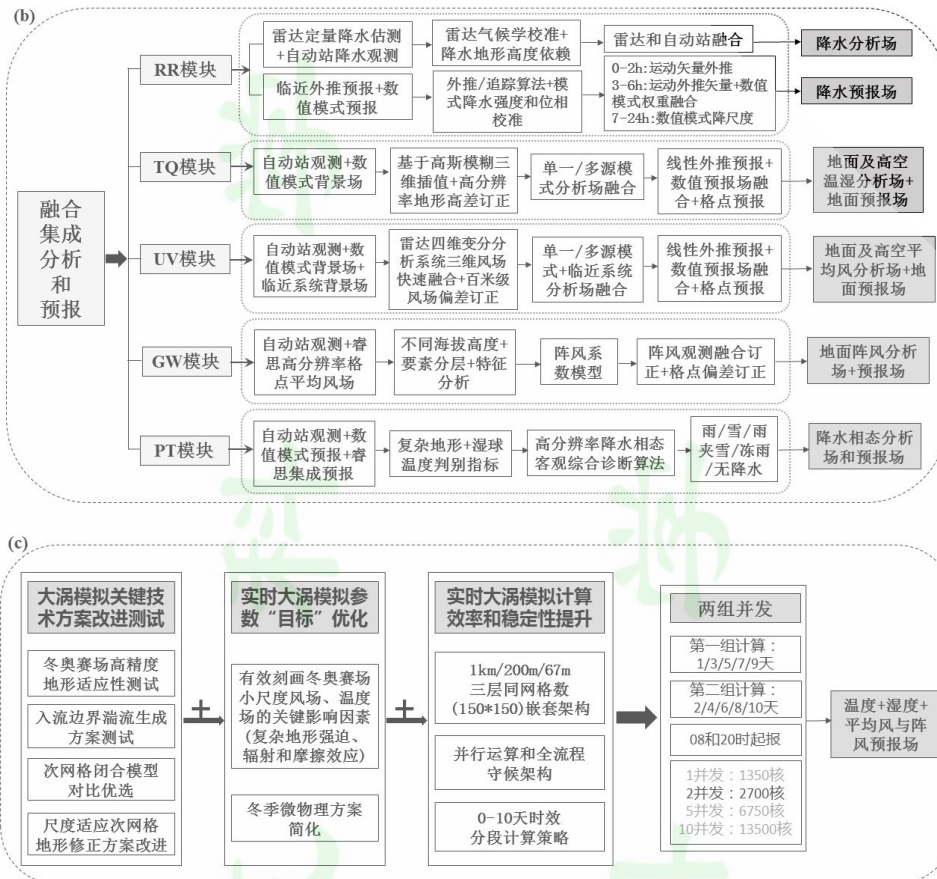


图 2 (a)RISE 系统软件架构及运行流程, (b)融合集成分析和预报技术路线, (c)实时大涡数值预报技术路线
Fig.2 (a) Software architecture and operation flow, (b) Technical route for integrated analysis and forecast, (c) Technical route for large eddy numerical prediction

2.2 客观检验方法

在评估预报产品性能时，均以自动站观测资料作为真值。在对比评估各家冬奥产品时，采用冬奥 FDP 平台第三方实时检验结果。所采用的客观检验统计量包括偏差（BIAS）、绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE）。当 BIAS 为正（负）值时，表示预报相对观测偏大（小），越接近 0 则预报性能越佳。MAE 越小表示预报与观测越接近。RMSE 除了可以反映误差大小外，还可以反映预报偏离观测的离散度，RMSE 越小则预报性能越佳（宋林烨等，2019；陈明轩等，2021）。

晴雨（雪）及降水相态预报按照不连续物理量进行二分类检验，采用准确率指标。晴雨预报检验按照 1 小时累积降雨量 $\geq 0.1\text{mm}$ 为有雨来评定（程丛兰等，2019；陈明轩等，2021）。降水相态采用邻域检验，检验类型分为雨、雨夹雪、雪、冻雨四类，其中北京地区冻雨发生几率很小。将自动站天气现象解码为对应的四类相态作为依据，若距离自动站点附近最近的格点周围 1.5 公里至少有一个格点出现天气现象后进行降水相态的客观诊断，即分别计算各类降水类型在这个邻域空间内所占百分比 $(F_{\text{雪}}/F_{\text{雨夹雪}}/F_{\text{雨}}/F_{\text{冻雨}}/F_{\text{无}})$ 来表示各类降水类型出现的概率，在每一个邻域空间内，各类降水类型出现的总概率都等于 1（Yang et al. 2021）。

3 百米尺度快速融合集成预报技术

RISE 系统各核心模块百米尺度快速集成融合分析和预报技术路线如图 2b 所示。下面将分别介绍 RISE 风场（包括平均风和阵风）、温湿、雨雪预报核心技术。除此之外，RISE 冬奥 FDP 客观产品还集成了大涡模拟产品，因此也将介绍大涡模拟实时预报核心技术。

3.1 风场融合预报技术

RISE 系统平均风以数值模式为第一初猜场，可采用中尺度模式或全球模式做背景场。RISE 平均风是指 2 分钟平均的风。先将模式风场预报数据插值到 RISE 百米级分辨率格点上，然后在模式背景场基础上通过自动站观测资料快速融合订正，得到 RISE 平均风场分析结果。由于反距离权重插值获取的观测订正并不能产生一个质量守恒场，且粗分辨率模式背景场风预报并不适合 RISE 高分辨率地形，所以采用了迭代松弛算法以满足质量守恒(Haiden et al. 2009)。背景场可采用模式三维风场，此时模式地形的地面 10-m 风并非实际地形的地面 10-m 风，而站点观测则在真实 10-m 高度处，因此须引入 f_{10} 因子来确定模式风和观测风之间的差异。背景场也可采用模式地面 10-m 风场，这是当前 RISE 系统 UV 模块采用的模式背景场。对于 RISE 平均风的预报，采用外推和模式预报的权重融合策略，即第 t_i ($i=1-24h$)

个预报时效的平均风预报结果 $X_{FORC}^{t_i WS_{2a}}(i, j)$ 计算如下：

$$X_{FORC}^{t_i WS_{2a}}(i, j) = g(t_i)X_{ANA}^{t_0}(i, j) + (1 - g(t_i))\vec{v}_{NWPB}^{t_i}(i, j) \quad \dots\dots (1)$$

式中， $X_{ANA}^{t_0}(i, j)$ 是 t_0 时刻平均风分析场， $\vec{v}_{NWPB}^{t_i}(i, j)$ 是 t_i 时刻模式地面 10-m 风背景场。当前风场权重函数 $g(t_i)$ 设为线性函数：

$$g(t_i) = \max\left(1 - \frac{t_i}{\tau_v}, 0\right) \quad \dots\dots (2)$$

式中时间尺度参数 $\tau_v = 6$ 小时，所以 RISE 平均风 0-6h 预报，随着预报时效的延长，外推（模式）权重从 1（0）线性递减（递增）到 0（1），6h 后模式权重一直保持为 1。

根据 RISE 系统技术路线可知，通过融合更优的三维风场可改进高分辨率风场分析产品性能，且除了观测融合作用，RISE 风场预报准确率还高度依赖于模式背景场所提供的风场准确性。因此，研发和集成了高时空分辨率三维风场融合技术，实现京津冀地区雷达反演分析及临近预报三维风场数据在 RISE 系统中的快速实时融合，大幅提升与局地突发强对流密切相关的边界层三维风场分析精度（杨璐等，2019）。在冬奥复杂山地，研发了百米尺度高精度风场融合预报偏差订正技术，通过消除数值预报背景场系统性偏差以进一步提升 RISE 风场预报性能，并根据不同观测站位置来判断偏差订正系数以充分考虑不同海拔高度上格点风速大小受热力、山谷逆温、复杂地形等的影响。风场偏差订正后，RISE 系统 0-24h 平均

风预报误差显著降低，风速 MAE 和 RMSE 降低率最高达 40%以上（杨璐等，2022）。

RISE 系统格点阵风预报算法依赖于 RISE 平均风预报（图 2b）。阵风是指近地面 1h 内极大风。与平均风相比，阵风变化更大，对边界层湍流、地面粗糙度和地形高度等都很敏感（Letson et al., 2018）。RISE 阵风分析场算法是：首先基于 2018-2021 年京津冀长时间序列的实况观测资料，建立阵风系数与稳定风速、风向、地形高度各要素之间的关系模型。阵风系数定义为阵风风速与时距 10 min 的平均风速之间的比值。RISE 系统每个格点初始阵风系数都设置为 1.8，作为阵风系数背景场，然后计算阵风系数背景场与站点真值的误差，采用双线性距离反比权重插值法得到 RISE 格点阵风系数差分场，将阵风系数背景场与差分场相加得到阵风系数格点场，最后得到经过自动站阵风观测资料快速融合订正后的阵风分析场。

对于 RISE 阵风预报，将经过格点偏差订正后第 t_i 时刻预报时次的 RISE 平均风预报场

$X_{FORC}^{t_i WS_{2a}}(i, j)$ 作为初猜场，耦合阵风系数格点模型 $GF(i, j)$ 获取阵风预报场，即第 t_i

（ $i=1-24h$ ）个预报时效的阵风预报结果 $X_{FORC}^{t_i WS_x}(i, j)$ 计算如下：

$$X_{FORC}^{t_i WS_x}(i, j) = X_{FORC}^{t_i WS_{2a}}(i, j)GF(i, j) \quad \dots\dots (3)$$

上述高分辨率阵风客观预报算法（杨璐等，2023）既保留了模式物理参数特征和京津冀阵风局地气候统计特征，又发挥了格点偏差订正的优势。

3.2 温湿融合预报技术

RISE 系统温度及湿度产品也以数值模式为第一初猜场。然后，根据站点观测和模式预报之间的差异，对初猜场进行快速订正，得到 RISE 温湿格点分析结果。温度背景场可采用模式地面 2-m 温度，但此时地形对温度场分布的影响将大幅减弱。当前 RISE 系统 TQ 模块采用的背景场为模式三维温湿场，由于模式地形和实际地形之间存在较大差异，尤其是分辨率越高差异越大，因此在模式数据预处理插值到 RISE 网格并进行百米尺度温湿融合预报时，需合理设计插值方案并考虑地形影响。

在模式数据预处理过程中，为了得到初猜场，把模式预报的温度相关数据三线性插值到三维 RISE 格点上，考虑到京津冀地形复杂，尤其是冬奥山区海拔高、山脉结构复杂、垂直落差很大，而这种大气状况在 3km 分辨率模式中很难体现出来，因此引入温度廓线向下外推方法，把山顶上温度初猜场由边界层温度廓线转换到 RISE 谷平面地形高度得到。温度梯度由连续 5 个 500 米高度间隔的温度梯度最大值决定。除此之外，在 RISE 冬奥山区 100 米系统中，为了解决 3km 分辨率模式插值到 RISE 格点后精细化释用问题，研发了基于高斯模糊的复杂地形三维插值方法（陈康凯等，2020）。

RISE 系统百米尺度温度融合分析的核心算法参考了 INCA 系统的算法（Haiden et al. 2009），其中最重要的处理方法是在复杂地形高分辨率温度分析时将模式输出的地面 2-m 温度预报分解为“三维模式层部分”和“二维地表层部分”，公式如下：

$$T_{NWPB} = TL_{NWPB} + DT_{NWPB} \quad \dots\dots (4)$$

这里，三维模式层部分 TL_{NWPB} 表示模式最低层的温度，二维地表层部分 DT_{NWPB} 表示两个温度之差，也即地面表层的温度盈余或亏损。自动站温度观测进入融合系统后，观测和模式预报的温度之差也做类似的分解计算。这一策略的好处是可以充分考虑昼夜温度盈亏，把有观测校准的地面层盈亏信息引入到高空三维温度场中（Haiden et al. 2009）。其次，温度格点分析引入地表指数因子 I_{SFC} ，它是一个介于 0 和 1 之间的格点数值场，用于表征地形相对表层的裸露程度，在平坦的平原和谷底处为 1，而在山脊和山峰处则为 0。 I_{SFC} 方法虽然无法完全描述真实大气温度廓线，但在一定程度上可以反映山峰山谷等不同地形对温度廓线的影响。

RISE 温度预报场通过外推临近预报方法和模式预报权重融合方法计算得到。对于第 t_i （ $i=1-24h$ ）个预报时效的温度预报结果计算如下：

$$\begin{aligned} \text{当 } t_i \leq \tau_c \text{ 时, } T_{FORC}^{t_i}(i, j) &= T_{FORC}^{t_{i-1}}(i, j) + f_T [T_{NWPB}^{t_i}(i, j) - T_{NWPB}^{t_{i-1}}(i, j)] \\ \text{当 } t_i > \tau_c \text{ 时, } T_{FORC}^{t_i}(i, j) &= g^*(t_i) T_{FORC}^{t_i}(i, j) + (1 - g^*(t_i)) T_{NWPB}^{t_i}(i, j) \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

在临近预报时段，即当 $t_i \leq \tau_c$ 时，RISE 温度格点预报 $T_{FORC}^{t_i}(i, j)$ 包括“观测”（格点分析或上一时刻格点预报）温度加上模式预报温度 T_{NWPB} 趋势变化，同时加入温度振幅因子 f_T 以考虑模式云量预报误差对温度预报的影响，这是因为大部分温度误差往往来源于云量预报误差及其造成的地表能量收支误差。而在较长预报时段，即当 $t_i > \tau_c$ 时，临近预报误差较大，此时 RISE 温度预报通过第 t_i 时刻权重为 $g^*(t_i)$ 的 RISE 外推预报结果 $T_{FORC}^{t_i}(i, j)$ 和权重为 $1 - g^*(t_i)$ 的模式预报结果 $T_{NWPB}^{t_i}(i, j)$ 相加计算得到，当前温度权重函数 $g^*(t_i)$ 设为：

$$g^*(t_i) = \exp\left(-\frac{t_i - \tau_c}{\tau_D}\right) \quad \dots\dots (6)$$

式中时间尺度参数 τ_c 依赖于静力稳定度，与逆温的持续性和强度有紧密联系。当无逆温时， τ_c 一般为 3 小时；若存在较强逆温，则 τ_c 增大可达 12 小时。RISE 系统 τ_c 设为根据每个时刻各个格点情况作动态调整，范围基本控制在 3~12 小时之间。尺度约束参数 τ_D 设置为 6 小时。RISE 湿度方案和温度类似，不再赘述。

3.3 雨雪融合预报技术

RISE 系统降水模块技术路线借鉴了 INCA 系统和 RAPIDS 系统的高时空分辨率降水融

合算法（Wong and Lai, 2006; Haiden et al. 2009）。RISE 降水分析场通过融合自动站和雷
达定量降水估测得到，不依赖于模式背景场。通过融合可以把自动站在站点上降水量观测的
准确性和雷达立体扫描在空间上的高分辨率两种优势结合起来，雷达可以探测到自动站站点
无法捕捉到的降水单体，自动站降水插值可以提供雷达探测被遮挡区域和杂波区域的地面降
水分析实况。在降水分析中，引入了自动站降雨地形高度依赖算法（Song et al. 2019），并
经过长序列自动站和雷达资料统计得到雷达定量气候校准系数（宋林烨等，2019），然后经
过空间转移二次校准使雷达定量降水估测场在每个格点上根据自动站实况做轻微的方向和
量级订正。

RISE 高分辨率降水预报包含基于降水分析场的外推预报和数值模式预报两部分。RISE
0-6h 降水预报通过将外推临近预报和高分辨率数值预报结果相结合的方法得到（程丛兰等，
2013，2019），第 t_i （ $i=1-24h$ ）个预报时效的降水预报结果计算如下：

$$P_{FORC}^{t_i}(i, j) = g^{**}(t_i)P_{NOWCAST}^{t_i}(i, j) + (1 - g^{**}(t_i))P_{NWPB}^{t_i}(i, j) \quad \dots\dots (7)$$

式中， $P_{NOWCAST}^{t_i}(i, j)$ 和 $P_{NWPB}^{t_i}(i, j)$ 分别是降水外推预报结果和数值预报结果。为了得
到连续的降水无缝隙预报结果，从临近外推预报到数值模式预报需有一个平滑过渡，该过渡
通过设定融合权重函数来实现，当前降水权重函数 $g^{**}(t_i)$ 设为：

$$g^{**}(t_i) = \max \left[\min \left(1 - \frac{t_i - \tau_{p1}}{\tau_{p2} - \tau_{p1}}, 1 \right), 0 \right] \quad \dots\dots (8)$$

式中时间尺度参数 $\tau_{p1} = 2$ 小时， $\tau_{p2} = 6$ 小时。因此 $t_i = 1-2h$ 预报外推权重为 1，随后
线性下降， $t_i = 6h$ 预报外推权重降为 0，7h 后外推（模式）权重一直保持为 0(1)。在 $P_{NWPB}^{t_i}(i, j)$
模式预报中，引入了基于快速傅立叶变换和多尺度光流变分的模式降水强度和位相校准方法
（程丛兰等，2013）。

北京地区降水主要集成在汛期 5~9 月，冬季降水较少。因此，冬季特别是冬奥会重点关
注降水相态预报。RISE 系统降水相态 PT 模块依赖于 RISE 地面温度及降水（TQ 和 RR 模
块）预报，综合考虑数值模式微物理预报及湿球温度廓线和地面观测联合订正，从而实现复
杂地形下高时空分辨率降水相态分类客观预报。该方法首先基于长时间序列京津冀国家级气
象站资料，通过统计方法分析出京津冀复杂地形下湿球温度对降水相态影响的气候特征，建
立降水相态与温度、湿球温度之间的拟合关系，揭示湿球温度是判断京津冀复杂地形下不同
降水相态的关键指标（Yang et al. 2021）。

RISE 降水相态诊断的背景场采用数值模式预报的雪、雨、冰、霰降水混合比，并通过
三线插值法插值到 RISE 网格点上，计算近地面大气层中冻结部分降水混合比在可凝结成降
水的水汽混合比中的比例而得到。然后基于降水相态与气象要素拟合关系，结合 RISE 逐 10

分钟输出的湿球温度廓线、地面温度、融化层厚度产品，快速融合自动站天气现象、地面温度、露点温度等观测进行综合诊断。在 RISE 降水相态诊断中，诊断因子包括：1) P，每个 RISE 格点逐 10 分钟降水量；2) QR，雨混合比；3) QS，雪混合比；4) QG，霰混合比；5) RV，雨下落末速度；6) SV，雪下落末速度；7) GV，霰下落末速度；8) SNF，模式预报的雪混合比占雨雪混合比的比率；9) Ta，气温；10) Tw，湿球温度；11) Zs，雪线高度；12) Z，地形高度；13) Zs - Z，融化层厚度。通过降水相态综合诊断流程 (Yang et al. 2021)，实现了 RISE 京津冀地区降水相态 (雨/雨夹雪/雪/冻雨等) 的格点分析和精细化客观预报。

3.4 大涡数值预报技术

大涡模拟是实现百米尺度数值预报的重要手段之一，早在二十世纪七十年代被引入大气边界层领域 (Deardorff, 1972)，国内研究则起步于二十世纪九十年代 (蔡旭晖和陈家宜，1995)，在模式动力框架、次网格闭合方案、物理过程参数化、与中尺度模式嵌套、边界层物质及热动力分布、大气湍流基础数据构建、污染扩散模拟等方面取得了很多进展。以冬奥延庆赛区海陀山为试验区域，刘郁珏等 (2019) 分析了地形高度算子与网格分辨率的拟合关系，指出在复杂地形区域开展风场模拟时，不同分辨率下需谨慎开启 Jiménez 方案，而修正后的 Jiménez 方案可供参考。在 37m 分辨率大涡模拟试验中，次网格湍流闭合模型对模拟结果影响很大，通过对比分析 1.5 阶 TKE 闭合、SMAG 一阶 3D 变形闭合、非线性后向散射闭合三种常用次网格湍流闭合模型在复杂地形区域的性能和计算资源消耗，结果表明 1.5TKE 和 NBA 次网格模型更适用于复杂地形区域，且 1.5TKE 计算资源消耗相对较小，不易溢出 (Liu et al. 2020)。

尽管冬奥山区大涡模拟在理论上取得了一些认知，但大涡模拟计算开销巨大，将其用于实时预报仍比较困难，因此研发冬季大涡模拟实时运行方案是冬奥实际业务应用的关键。为了进一步延长预报时效，实现北京冬奥会“一场一策”、“5 天以上预报精细化”的气象保障高要求，研发了基于天气研究预报模式 (WRF, Skamarock et al. 2019) 大涡模拟 (Moeng et al. 2007) 的百米尺度实时预报技术 (图 2c)，构建完成 67m 分辨率 RISE-Thin 系统，将三个赛区六个核心场馆 (群) (图 1b-1g) 的温、湿、风和阵风预报时效从 24 小时延长到 10 天，每天起报两次 (08、20BJT)，并将其产品集成到 RISE 系统中，满足冬奥业务应用需求。

大涡模拟在冬奥的实时运行策略主要有分段并行运算方案、微物理方案简化、实时大涡模拟预报关键物理方案和配置优化等 (中国气象局，2022)。技术方案如下：1) 以 ECMWF 全球模式预报数据为背景，同时热备运行一套 CMA-GFS 背景驱动，用 ASTER 1"约 30m 分辨率 DEM 做地形插值，以 1km、200m、67m 分辨率三层嵌套方式，构建冬奥六个室外核心场地 67 米分辨率 0-10 天实时大涡数值预报模式 RISE-Thin；2) 使用垂直速度、模式高层和声波三个常规抑制参数进行调稳提速，67m 大涡模拟实现 0.4s 稳定积分时间步长，达到分辨率“公里数”的 6 倍，提升复杂地形下大涡模拟的计算稳定性和效率；3) 构建 0-10 天

大涡数值预报分段并行运算方案，采用动力降尺度常用的时效分段降尺度加速方案，任取背景时效时刻，作为降尺度起算时刻，使用逐时效日分段降尺度，在墙钟时间 10 小时即可得到 0-10 天的 67m 预报；4）简化物理方案，测试试验反映，对于冬季山地赛场气象预报，特别是百米尺度风的预报，复杂地形影响为主，边界层效应次之，着重反映对百米以下网格尺度风和温度预报的关键影响因素，包括复杂地形、辐射、摩擦的影响；5）RISE-Thin 模式裸报产品进一步采用一元线性回归方法进行订正，结合 RISE XGBoost 算法订正产品在短临时段的优势和 RISE-Thin 线性回归算法订正产品在更长时效的优势，融合形成 0~10 天冬奥站点客观预报产品，最终在冬奥正式比赛期间通过 RISE 系统无缝集成发布。

4 冬奥应用与检验

RISE 系统产品接入了三个冬奥气象业务应用平台（多维度冬奥气象预报业务平台、冬奥气象综合可视化平台、冬奥现场气象服务平台）以及冬奥气象手机 APP。除此之外，还接入了“智慧冬奥 2022 天气预报示范计划”FDP 平台，FDP 完整的正式测试时间为 2021 年 10 月 8 日~2022 年 3 月 16 日（陈明轩等，2021；陈明轩等，2024）。在 2022 年北京冬奥会（2 月 4 日~20 日）和冬残奥会（3 月 4 日~13 日）期间，北京及周边地区出现多次大风、降温、雨雪等天气过程。因此，下面通过 2021 年 10 月 8 日~2022 年 3 月 16 日批量客观检验和 2022 年 2 月 4 日~3 月 13 日期间若干典型天气个例，对 RISE 系统预报性能进行分析。

4.1 批量检验结果

RISE 冬奥山区 100m 系统批量误差结果如表 2 所示，地面平均风分析产品平均 BIAS 为 0.12m/s，阵风分析 BIAS 为-0.19m/s，温度和相对湿度分析 BIAS 分别为 0.02°C 和 0.00%，均接近于 0。平均风、阵风、温度和湿度分析产品 MAE 则分别为 0.33m/s、0.53m/s、0.18°C、0.73%，RMSE 分别为 0.45m/s、0.84m/s、0.42°C、1.91%（表 2）。京津冀地区 RISE 分析误差比冬奥山区更小，这是因为冬奥山区海拔高、地形复杂，分析性能差于京津冀全域。总体而言，RISE 高分辨率网格分析产品误差较小，性能良好，在一定程度上可近似当作“格点实况”数据来应用。

表 2 2021 年 10 月 8 日—2022 年 3 月 16 日期间 RISE 冬奥山区 100m 系统所有 144 站平均检验结果，包括平均风、阵风、温度和相对湿度及有效观测自动站平均个数 N

Table 2 The averaged results of RISE 100m products for all 144 stations, including the average wind, gust, temperature, relative humidity and effective stations numbers during October 8, 2021 to March 16, 2022

变量	误差	分析	1h	2h	3h	6h	9h	12h	18h	24h	N
平均风 (m/s)	BIAS	0.12	0.06	0.12	0.29	0.58	0.57	0.59	0.59	0.59	130
	MAE	0.33	0.85	1.09	1.21	1.46	1.46	1.48	1.48	1.48	
	RMSE	0.45	1.20	1.49	1.62	1.89	1.90	1.92	1.93	1.93	
阵风	BIAS	-0.19	-0.24	-0.12	0.38	0.98	1.00	0.95	0.94	0.95	

	MAE	0.53	1.75	2.13	2.34	2.80	2.82	2.83	2.84	2.81	
	RMSE	0.84	2.46	2.94	3.16	3.64	3.67	3.68	3.70	3.65	
温度 (°C)	BIAS	0.02	-0.04	0.01	0.03	0.05	0.32	0.58	0.65	0.65	
	MAE	0.18	0.60	1.06	1.40	2.08	2.36	2.30	2.28	2.32	143
	RMSE	0.42	1.00	1.48	1.87	2.61	2.91	2.83	2.80	2.84	
湿度 (%)	BIAS	0.00	-0.17	-0.53	-0.87	-2.22	-3.70	-4.65	-4.86	-4.78	
	MAE	0.73	2.68	5.32	7.17	10.32	12.03	12.28	12.45	12.66	101
	RMSE	1.91	4.00	7.10	9.31	12.99	15.04	15.35	15.54	15.75	

表 2 还给出了平均预报误差及有效自动站个数结果。冬奥山区温湿风平均有效观测个数分别约为 143 个、101 个和 130 个。需指出，1-2 月天气严寒，高海拔区域自动站设备有时会因天气原因无法获取有效观测，例如温度过低风杯被冻住、夜间太阳能供电不足导致观测缺失等。从 RISE 预报误差结果分析，冬奥山区平均风、阵风、温度和湿度 3h 预报 MAE 分别为 1.21m/s、2.34m/s、1.40°C 和 7.17%，1-3h 时效平均预报误差均较小（表 2），这主要由于快速融合吸收观测信息的作用。6h 后预报误差增大，但 6-24h 误差呈现平缓增长的特征，这主要是因为观测融合订正作用减弱，模式背景场占主导，到 24h 预报平均风、阵风、温度、湿度 MAE 分别为 1.48m/s、2.81m/s、2.32°C、12.66%。京津冀 500m 系统预报误差演变特征和冬奥山区 100m 系统基本相似，但自动站温湿风有效融合个数约为 3234 个、1597 和 2544 个，并且除湿度外，平均预报误差略小于地形复杂的冬奥山区。

下面进一步分析北京、延庆、张家口赛区冬奥考核站的长序列检验结果。冬奥 FDP 考核站包括北京赛区的国家体育馆、五棵松体育馆、国家速滑馆、首都体育馆、北京观象台、首钢 1 号、2 号、4 号站，位于平原地带，海拔均低于 150 米；延庆赛区竞速 1 号、3 号、8 号，竞技 1 号、2 号、3 号站，西大庄科站、延庆站，位于复杂地形高山地区，最高海拔超过 2100 米；张家口赛区云顶 1 号、2 号、3 号、4 号、5 号、6 号站，张家口站、冬两 1 号站、跳台起点、终点站，越野 2 号、3 号站，位于复杂地形高山地区，最高海拔超过 2000 米。从图 3 可知，RISE 地面平均风预报 BIAS 在 0~0.3m/s 之间，表明预报整体比观测略偏强。但该偏强主要源自海拔较高的延庆和张家口赛区，而北京赛区平均 BIAS 小于 0，表明北京城区预报比实况略偏弱（图 3a）。对阵风而言，同样延庆和张家口赛区 BIAS 大于 0，北京赛区 BIAS 小于 0（图 3b），表明冬奥山区（北京平原区）阵风预报常较实况偏强（弱）。1h 预报误差最小，随预报时效延长误差增大。赛区平均风 1-24h 预报平均 MAE（RMSE）在 1.4m/s（1.8m/s）以下，赛区阵风 1-24h 预报平均 MAE（RMSE）在 2.5m/s（3.5m/s）以下。对比三个赛区，平均风和阵风预报误差都是北京赛区最小，张家口赛区次之，延庆赛区最大（图 3a-b）。北京赛区平均风 1-24h 预报 MAE（RMSE）在 0.9m/s（1.2m/s）以下，阵风 MAE（RMSE）则在 2.0m/s（2.5m/s）以下；延庆赛区平均风 1-24h 预报 MAE（RMSE）最大 1.8m/s（2.6m/s），阵风 MAE（RMSE）最大 3.1m/s（4.2m/s）。这主要与延庆高山赛区地形最为复杂导致风场演变复杂、预报难度相对较大有密切关系。

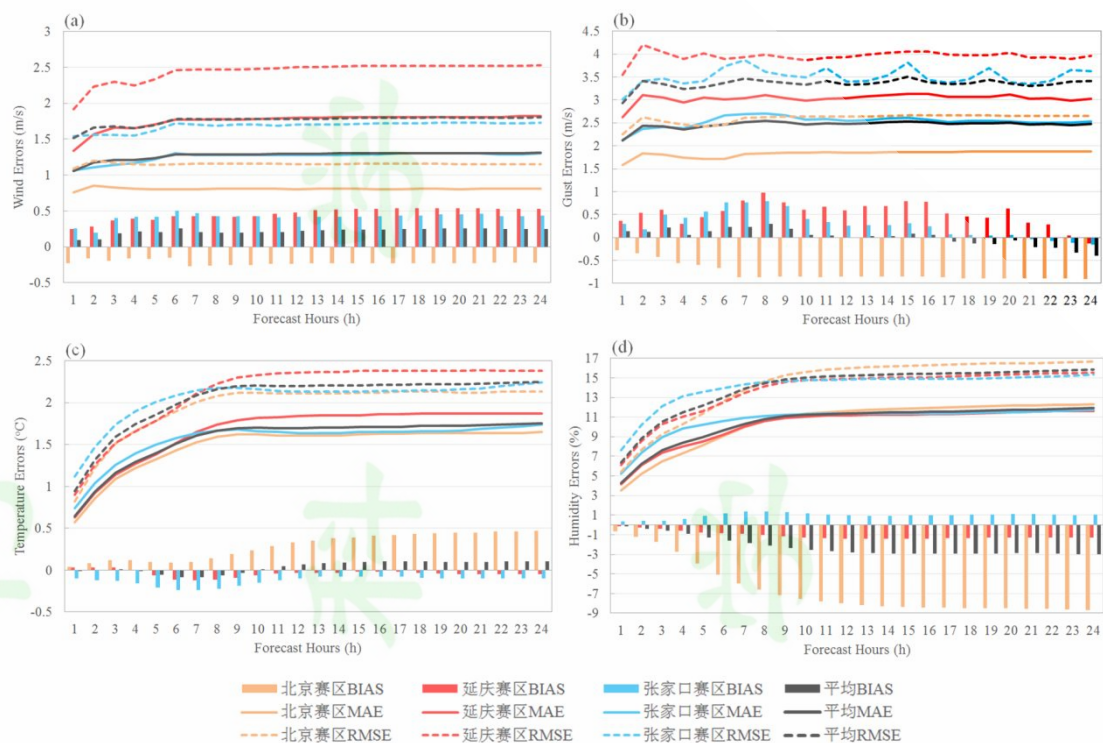


图 3 RISE 系统冬奥赛区(a)平均风、(b)阵风、(c)温度、(d)相对湿度的预报误差

Fig.3 Forecast errors of RISE system for (a) wind, (b) gust, (c) temperature, (d) relative humidity in Winter Olympic Competition areas

在北京赛区,RISE 温度预报常较观测偏高($BIAS>0$),湿度预报则较观测偏低($BIAS<0$),即平原地区的温湿预报具有偏暖偏干的偏差特性(图 3c、d)。相反,在张家口赛区,温度预报 $BIAS<0$,湿度 $BIAS>0$,表现为偏冷偏湿的预报偏差规律。延庆赛区温度预报 $BIAS$ 接近于 0,湿度 $BIAS<0$,略偏干。温度和湿度 1h 预报误差最小,6h 前随预报时效延长误差迅速增大,12h 后误差变化幅度较小。24h 预报时效内,三个赛区温度预报平均 MAE (RMSE) 在 1.7°C (2.2°C) 以下(图 3c),湿度预报平均 MAE (RMSE) 约在 12% (15%) 以下(图 3d)。三个赛区对比分析表明,不同于风场预报,温湿预报在不同赛区的差异相对较小,也即三个赛区的温湿预报性能较为类似。

为了分析 RISE 系统不同起报时次的预报性能,图 4 给出了 00:00~23:00BJT 起报的 1-24h 预报 RMSE 结果。除 22 时起报的地面风场存在一个大于 2m/s 的 RMSE 大值中心外(图 4a),对所有变量而言,临近时段 1-3h 预报误差均最小(图 4a-d),体现了 RISE 在短临预报时段的优势。温度和湿度存在明显的背景场依赖性(图 4c-d),温度 RMSE 误差大值中心出现在 05~12 时起报的未来 4h~17h 预报结果,次大值中心出现在 06~10 时起报的未来 2h~8h 预报结果,也即温度预报最差的一个起报时次是早上 08 时,这是因为 08 时前后起报所采用的模式背景场在日夜交替时(05 时前后)误差较大。湿度预报特征和温度类似(图 4c),这是因为 RISE 湿度和温度融合预报技术路线类似。风场预报也存在一定的背景场依赖性,但并不显著(图 4a),这是因为 RISE 引入了百米级风场偏差订正技术,在基于数值背景场形

成初猜场之前已经基于长期历史误差统计消除了背景场误差。不同同时次起报的温湿预报误差分布反映出的背景场依赖性和 RISE 系统温湿风技术方案有关，即在临近预报时段主要基于外推技术，而较长预报时效时主要基于外推预报和数值预报场融合，且不论权重函数设为线性函数或反指数函数，6h 后数值模式背景场的权重均占主导地位。但是，不同同时次起报的阵风预报结果表现出多个零散的 RMSE 误差大值中心（图 4b）。阵风预报误差分布特征和 RISE 系统阵风预报核心算法有关，即并不像温湿及平均风那样采用数值背景场，而是采用 RISE 平均风产品和自动站阵风观测融合，基于分析获得的阵风系数模型进行预报。

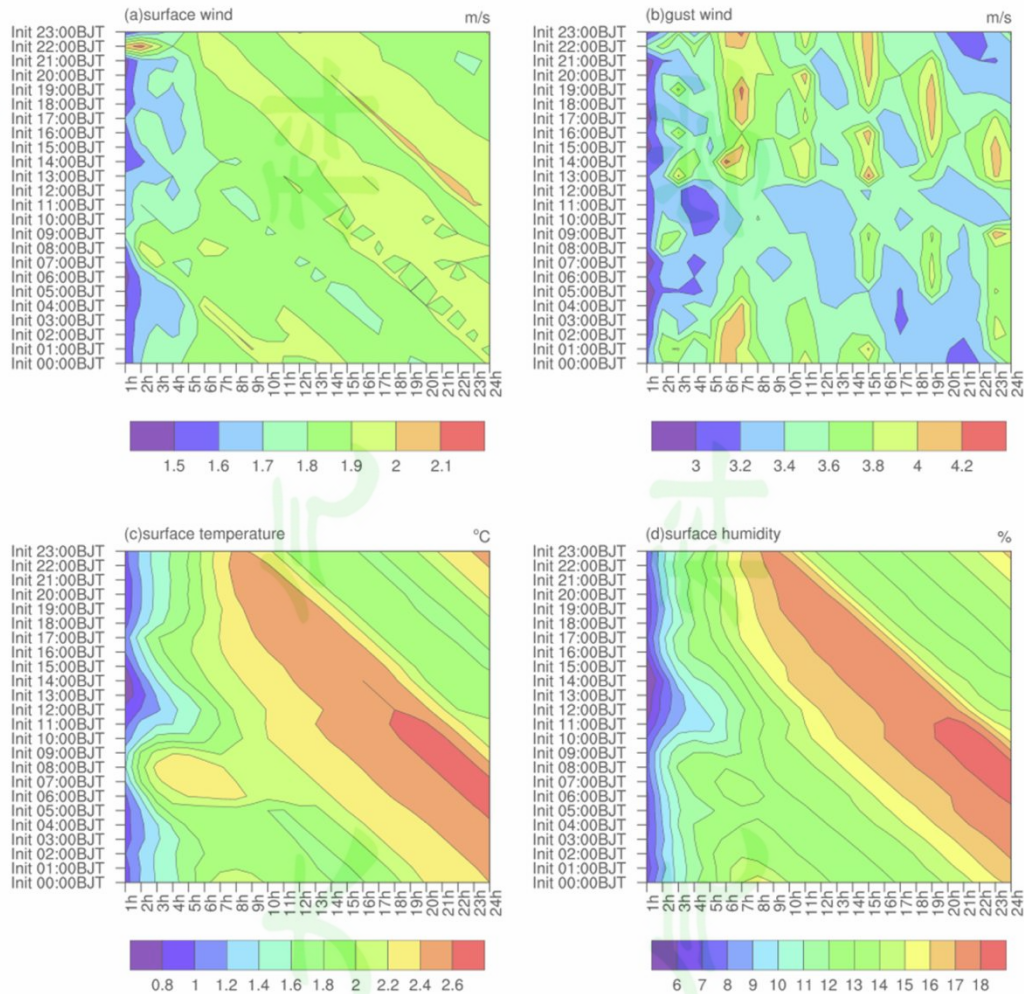


图 4 RISE 系统不同同时次起报的(a)平均风、(b)阵风、(c)温度、(d)湿度预报 RMSE 误差，纵坐标为起报时次，横坐标为每个起报时次对应的 1-24h 预报时效

Fig. 4 RMSE errors of (a) wind, (b) gust, (c) temperature and (d) humidity forecast for different initial times of RISE system. The ordinate is the initial time and the absciss is corresponding 1-24h forecast

为了进一步认识国内冬季天气整体预报水平，基于冬奥 FDP 第三方实时客观检验，图 5 和图 6 给出了每天 00 和 08 点两次起报的 RISE 产品和参加冬奥 FDP 的国内各家产品平均水平的对比结果。这里，图 5 为冬奥 FDP 格点预报，即裸报的标准等经纬网格 NetCDF 格式预报结果；图 6 为冬奥 FDP 客观预报，即通过不同客观方法订正后的标准站点 XML 格式预

报结果。需要指出，各家模式系统的起报更新频次、预报时长、预报要素均有所不同，本文
仅选取同等条件下所有满足条件的预报产品进行对比分析。

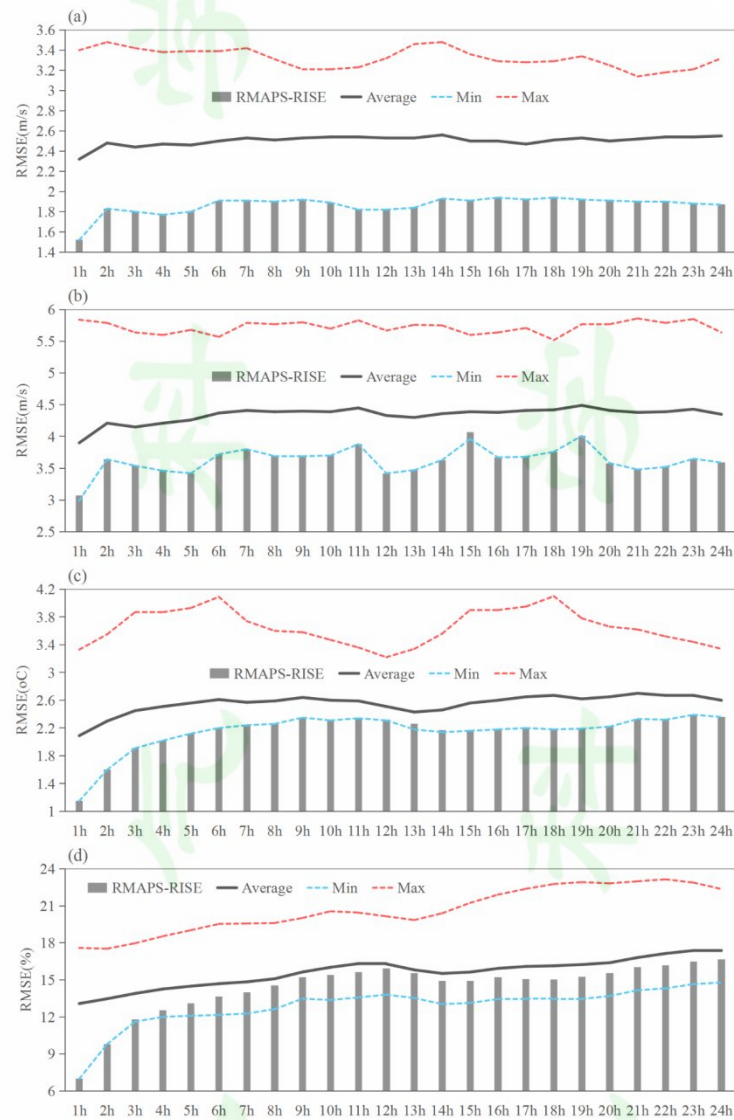


图5 2021年10月8日-2022年3月16日冬奥FDP平台对各家08和20时起报的(a)平均风、(b)阵风、(c)温度、(d)湿度1-24h格点产品检验结果。柱状为RISE系统1-24h预报RMSE，黑色实线代表各家平均水平，蓝色和红色虚线代表最小和最大误差水平。数据来自冬奥FDP第三方客观检验平台

Fig. 5 Comparison results of (a) wind, (b) gust, (c) temperature and (d) humidity for 1-24h forecast from FDP during October 8, 2021 to March 16, 2022 initialized at 08:00 to 20:00. The bar is the 1-24h forecast RMSE of RISE, the solid black line represents the average level, and the dashed blue and red lines represent the minimum and maximum forecast error level. The data is downloaded from the FDP platform

综合而言，与所有FDP参与系统预报误差相比，RMAPS-RISE系统平均风、阵风、温度和湿度的百米级分辨率1-24h格点预报准确率均处于领先水平，具体表现为RMSE误差小于国内各家FDP系统平均值（图5a-d），且风场和温度预报误差接近国内最小误差水平（图5a-c）。RMAPS-RISE系统1-3h临近预报时段具有绝对优势，这主要得益于其对

观测的快速更新融合。广东省局 GZ-3km 模式和数值预报中心 GRAPSE 模式的阵风格点预
报误差较小，而 93110 部队 KJAINWP 阵风误差相对较大；上海市局 WARMS 模式温度预报
误差较小，北京市局 RMAPS-ST 模式湿度预报误差较小，而广东省局 GZ-3km 模式湿度预
报误差则较大（图略）。从图 5 可以看出，国内当前冬季平均风、阵风、温度和湿度 24h
内格点预报 RMSE 误差平均水平在 2.6m/s、4.5m/s、2.7℃ 和 18% 以下，最佳预报性能则在
1.9m/s、4.0m/s、2.4℃ 和 15% 以下。



图 6 2021 年 10 月 8 日-2022 年 3 月 16 日冬奥 FDP 平台对各家 08 和 20 时起报的(a)平均风、(b)阵风、(c)温度、(d)湿度 0-10 天客观产品检验结果。柱状为 RISE 系统 1-240h 预报 RMSE，黑色实线代表各家平均水平，蓝色和红色虚线代表最小和最大误差水平。数据来自冬奥 FDP 第三方客观检验平台

Fig. 6 Comparison results of (a) wind, (b) gust, (c) temperature and (d) humidity for 0-10day forecast from FDP during October 8, 2021 to March 16, 2022 initialized at 08:00 to 20:00. The bar is the 1-240h forecast RMSE of RISE, the solid black line represents the average level, and the dashed blue and red lines represent the minimum and maximum forecast error level. The data is downloaded from the FDP platform.

图 6 给出了 08 和 20 时起报的 0-10 天站点客观解释应用预报产品的检验结果。RMAPS-RISE 系统平均风、阵风预报误差均相对较小，尤其是 60h 后的预报时效，集成实时大涡数值预报技术和回归订正模型的 RMAPS-RISE 客观预报误差最小（图 6a-b）。国家气象中心 NWCGRID-STNF 平均风和阵风的 1-60h 预报占绝对优势，预报误差最小，准确性最高，在冬奥会期间表现优异（图 6a-b 蓝色虚线 1-60h）。在温度预报方面，RMAPS-RISE

系统性能总体处于国内平均水平，其中大部分预报时效误差与国内各家平均水平相当，部分预报时效（例如 1h、7-9h、57-72h）小于各家平均误差，而部分预报时效（例如 3-5h、15-18h、138h 以后）误差则高于平均线（图 6c）。RMAPS-RISE 系统相对湿度预报基本优于国内各家平均水平（图 6d），但无法达到国内最优客观预报水平。大数据实验室 MOML 温度和湿度客观预报误差最小，MOML 温湿预报在各预报时段内都占据明显的优势（图 6c-d 蓝色虚线）。NWCGRID-STNF 根据临近、短期、中长期不同预报时效分别采用了卡尔曼滤波、机器学习、MOS 统计订正等技术。MOML 采用了数值模式人工智能预报订正技术（Li et al. 2019; Xia et al. 2020）。从图 6 可知，国内当前冬季平均风、阵风 10 天内站点客观预报 RMSE 误差平均水平在 2.6m/s、4.3m/s 以下，最佳预报性能则在 2.0m/s、4.0m/s 以下，与 24h 内格点裸报水平大致相当。这说明，在基于数值预报或大涡模拟预报的基础上，采用卡尔曼滤波、MOS 订正、回归订正、人工智能订正等技术，可以进一步降低站点风速预报误差。国内当前冬季温度和湿度 10 天内站点客观预报 RMSE 误差平均水平则在 5.2°C 和 23% 以下，最佳预报性能在 5.0°C 和 19% 以下。

4.2 天气个例分析

选取北京冬奥会期间大风、降温、雨雪三种不同典型天气进行个例分析。图 7 为 2022 年 2 月 4~7 日延庆赛区持续性大风过程，该过程主要受高空横槽南压及地面副冷锋过境的影响，期间山顶 A1701 站风速峰值出现在 2 月 5 日早晨，06 时最大阵风风速 27.6m/s（10 级），05 时最大平均风风速 18.3m/s（8 级），2 月 6 日 01 时阵风风速 23.3m/s（9 级）。RISE 系统 A1701 站风速分析值与观测演变基本一致（图 7a），因此 RISE 分析场结果可近似作为高分辨率“格点实况”使用，以弥补山区自动站网分布稀疏的问题。图 7b-c 进一步给出了 RISE 系统 100 米分辨率阵风实况分析场的空间分布结构，可以看出 2 月 5 日上午延庆赛区高山滑雪赛道各站处于副冷锋控制的西北气流中，风力较强（图 7b），2 月 6 日大风持续，山顶风力仍超过 17m/s，其东北侧超过 21m/s（图 7c）。平均风与阵风的时空分布、时间演变具有一定的相似性（图 7a, d, e），山顶 A1701 站盛行西北风，平均风速超过 10m/s。在山腰 A1705 站、山脚 A1708 站附近存在局地绕流，这可能与局地小尺度地形、辐射、山谷风等有关。在空间范围不足 3km×3km 范围赛道区域内，绝大部分粗分辨率（3km 乃至 1km 分辨率）模式很难刻画出风场的精细化分布和演变特征，因此 RISE 系统反演的高分辨率实况分析场资料具有较好的应用价值。

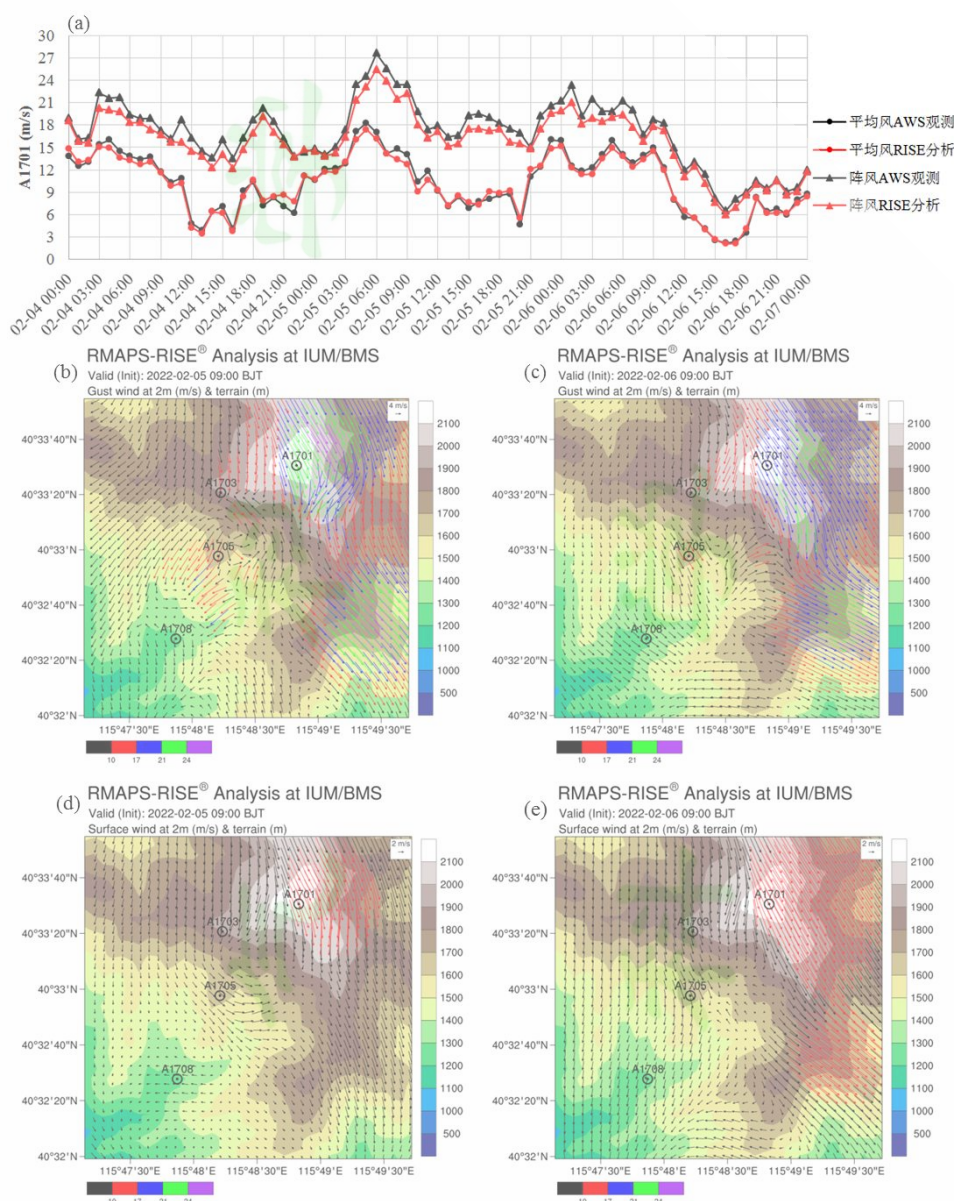


图 7 (a)2022 年 2 月 4 日 00:00BJT 至 2 月 7 日 00:00BJT 延庆赛区竞速 1 号站 (A1701) 自动站风速观测 (黑线) 及 RISE 分析结果 (红线) 的时间演变序列, (b-c)2 月 5 日和 6 日 09:00BJT 延庆赛区 RISE 近地面阵风分析场, (d-e)同(b-c)但为平均风

Fig. 7 (a) Time series of wind speed observation (black line) and RISE analysis (red line) at Jingsu No1 (A1701) station in Yanqing Competition area from 00:00BJT on February 4 to 00:00BJT on February 7, 2022. (b-c) RISE surface gust analysis field at 09:00BJT on February 5 and 6, (d-e) is the same as (b-c) but for average wind

RISE 系统对该大风过程的 1-24 小时预报结果如图 8 所示。从单站观测和预报时序对比可知, 不同时次起报的阵风与平均风预报结果在较大程度上均可以抓住此次大风过程的变化趋势, 预报结果与自动站观测较为接近 (图 8a, c)。但 RISE 预报较观测时强时弱, 也存在一定的不确定性。从延庆赛区所有冬奥考核站风速预报误差检验结果中可知, 此次持续性大风过程 RISE 系统阵风、平均风预报 MAE 平均分别小于 2m/s、3m/s, 预报 BIAS 均大于 0 (图 8b, d), 说明 RISE 大风预报比观测偏大。平均风提前 1-3h 预报误差最小, 但此次

过程阵风提前 2h 预报误差最大，临近时段 1-3h 预报误差大于 4-24h 预报误差。按原冬奥赛事安排，2 月 6 日 11:00 将举行高山滑雪滑降项目比赛，但受此次大风过程影响，实际比赛延期到了 2 月 7 日举行。

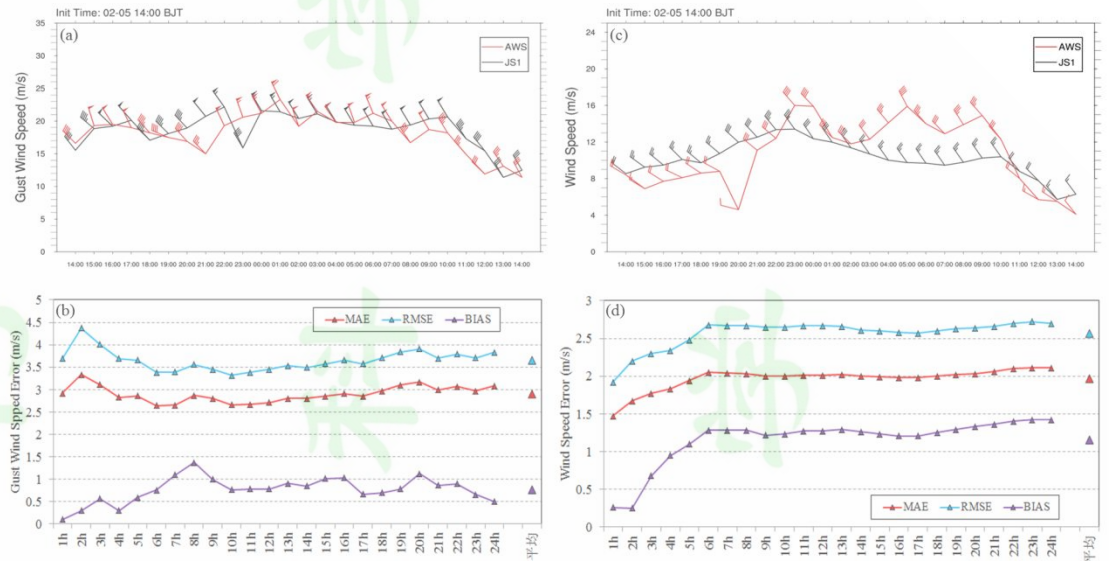


图 8 (a)竞速 1 号站 2 月 5 日 14:00BJT 起报的 RISE 1-24h 阵风预报与自动站观测时序对比, (b)2 月 4 日到 6 日大风过程 RISE 系统延庆赛区所有冬奥考核站平均预报误差, (c-d)同(a-b)但为平均风

Fig.8 (a) Time series of RISE 1-24h forecast at Jingsu No1 station initialized at 14:00BJT on February 5 and the corresponding station observation; (b) The averaged forecast error of all FDP stations in Yanqing Competition area during this strong wind event from February 4 to 6; (c-d) are the same as (a-b) but for wind

图 9 给出了 2022 年 2 月 17~19 日张家口赛区降温过程，该过程主要受高空槽的影响，自动站观测显示 17 日、18 日、19 日下午 14 时冬两 1 号站温度分别约-12℃、-13℃、-17℃，19 日凌晨 2 时最低温度-22℃，RISE 站点温度分析结果与观测时序基本吻合（图 9a）。RISE 系统百米级分辨率温度空间分布结构与局地地形、山脉结构之间的联系较为紧密，反映出温度随地形高度变化的精细化特征（图 9b-d）。从 17 日到 19 日，张家口赛区温度呈现明显的快速降温趋势（图 9b, c, d），19 日下午 15 时绝大部分区域地面温度在-18℃ 以下。

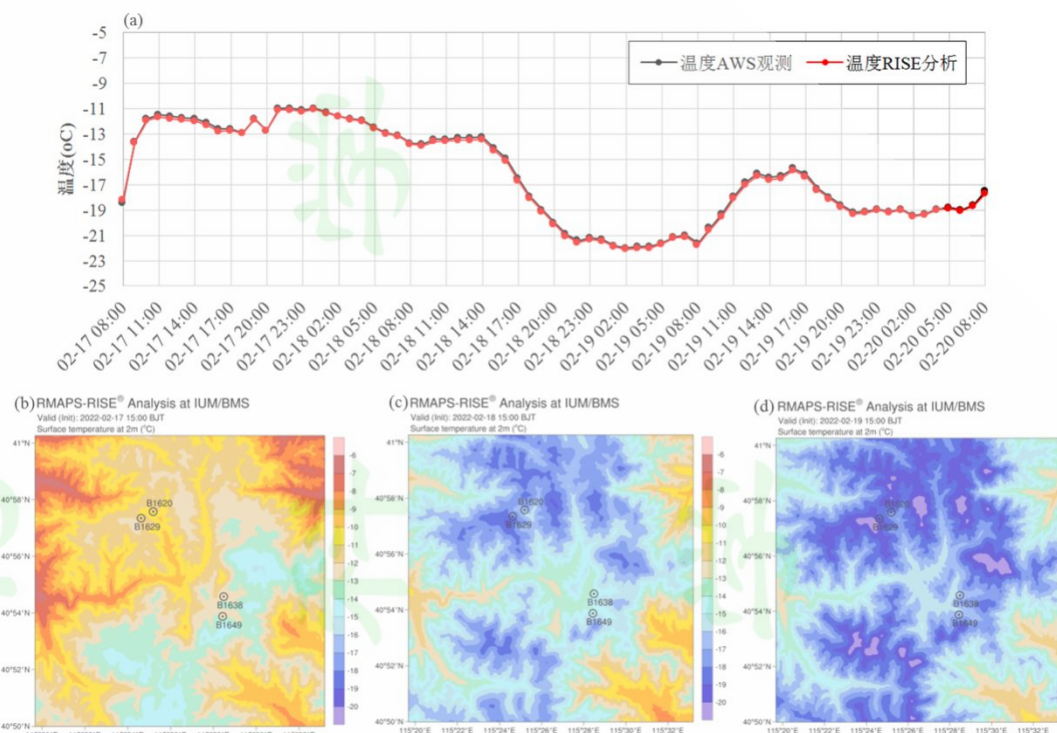


图 9 (a)2022 年 2 月 17 日 08:00BJT 至 2 月 20 日 08:00BJT 张家口赛区冬两 1 号站（B1638）自动站温度观测（黑线）及 RISE 分析结果（红线）的时序图，(b)2 月 17 日 15 时、(c)18 日 15 时、(d)19 日 15 时 RISE 地面温度分析场

Fig.9 (a) Time series of temperature observation (black line) and RISE analysis (red line) at Dongliang No1 (B1638) station in Zhangjiakou Competition area from 08:00BJT on February 17, 2022 to 08:00BJT on February 20, 2022. (b) RISE surface temperature analysis field at 15:00 on February 17, (c) February 18, (d) February 19

RISE 系统 2 月 18 日 08 时起报的站点温度演变趋势与自动站观测较接近（图 10a, b），较好地预报出了此次降温过程，但也可看出温度预报较观测都存在一定的偏差。通过计算 2 月 17~19 日张家口赛区所有冬奥考核站温度预报误差可知，此次降温过程 RISE 温度预报 MAE 和 RMSE 平均分别为 1.2°C 和 1.5°C ，误差较小（图 10c），但 BIAS 平均值超过 0.5°C ，预报偏差较大，预报温度整体高于观测（图 10c）。受此次降温过程的影响，原定于 2 月 19 日举行的冬季两项女子 12.5 公里比赛提前到了 2 月 18 日 15:00-15:45 举行。

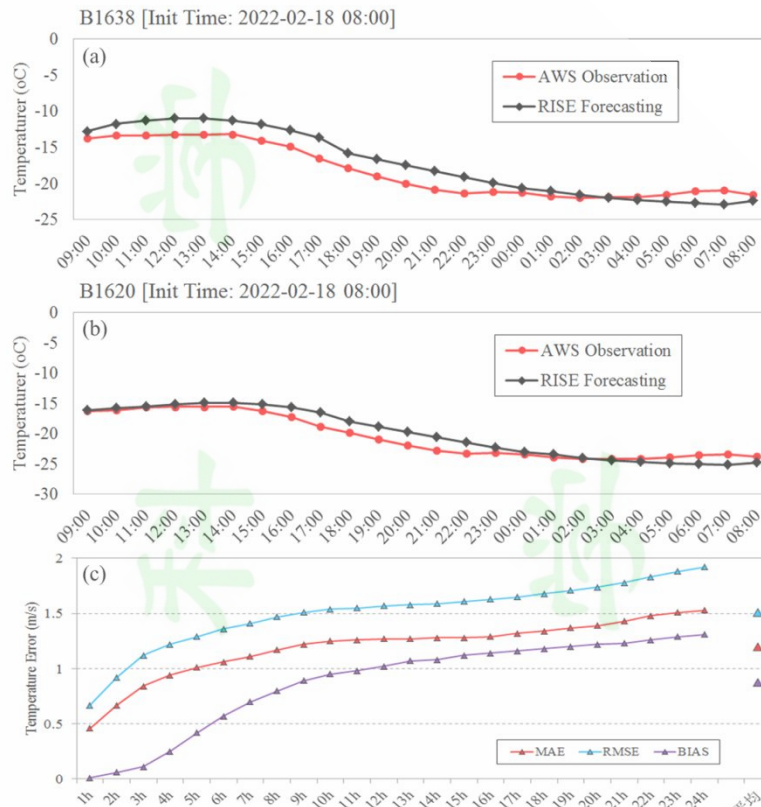


图 10 (a)冬两 1 号站和(b)云顶 1 号站 2 月 18 日 08:00BJT 起报的 RISE 1-24h 温度预报（黑线）与自动站观测（红线）时序对比, (c)2 月 17 日到 19 日降温过程 RISE 系统张家口赛区所有冬奥考核站平均预报误差

Fig.10 Time series of RISE 1-24h forecast at (a) Dongliang No1 and (b) Yunding No1 stations initialized at 08:00BJT on February 18 and the corresponding station observation; (c) The averaged forecast error of all FDP stations in Zhangjiakou Competition area during this cooling event from February 17 to 19

2022 年北京冬奥会正赛期间出现一次降雪个例，即 2 月 13~14 日，该过程主要受东移高空槽和低层偏东风的共同影响，12 日夜间京津冀地区开始出现降雪，平原地区能见度小于 1 公里，延庆赛区能见度不足 500 米，局地低于 100 米。降水相态以雪为主，北京全市出现大范围下雪天气，13 日 06 时北京门头沟出现雨夹雪。RISE 系统降水相态分析场与实况较为一致，提前 1-2h 降水相态预报场对相态识别、落区均有较好把握，提前 3-5h 预报北京东南部地区雪被误判为雨夹雪的概率较高，6-24h 预报结果均为北京市出现大范围降雪（图略）。冬残奥会期间 3 月 11~12 日也发生了一次降水相态个例事件，残奥会结束后 3 月 17~18 日出现雨雪过程（以降雨为主，伴随雪、雨夹雪），另外在冬奥 FDP 期间也发生了若干次降水相态个例事件，包括 2021 年 11 月 6~7 日、11 月 21 日。

图 11 给出了冬奥 FDP 期间 5 次降水相态个例 RISE 系统准确率统计结果。检验结果表明，RISE 降水相态分析场的雨准确率最高，为 0.83；雪准确率次之，为 0.80；雨夹雪的准确率相对最低，为 0.62。RISE 分析场准确性受融合的天气现象资料所限制，实际融合资料越多则产品准确率越高。RISE 降水相态预报准确率最高的为雨（0.80~0.91 之间），其次是雪（0.69~0.83 之间），对雨夹雪的预报准确率则较低（0.20~0.40 之间）。RISE 提前 6h 雨、

雪、雨夹雪预报准确率分别为 0.91、0.81、0.22，提前 24h 雨、雪、雨夹雪预报准确率分别为 0.89、0.83、0.20（图 11）。从邻域检验可知，雨夹雪被误诊断为雨的概率占 40%左右，雪被误诊为雨夹雪的概率占 15%左右。RISE 晴雨预报准确率平均在 0.93 以上（图略），北京赛区晴雨准确率最高，延庆赛区次之，张家口赛区晴雨准确率相对较低。但是，冬季降雨较少，样本量不足，故代表性欠缺。冬奥会主要关注冬季天气，包括风、温和降水相态，而北京地区降雨主要集中在夏季，因此 RISE 系统汛期 5-9 月降雨预报也是未来研究和应用的重点方向之一。

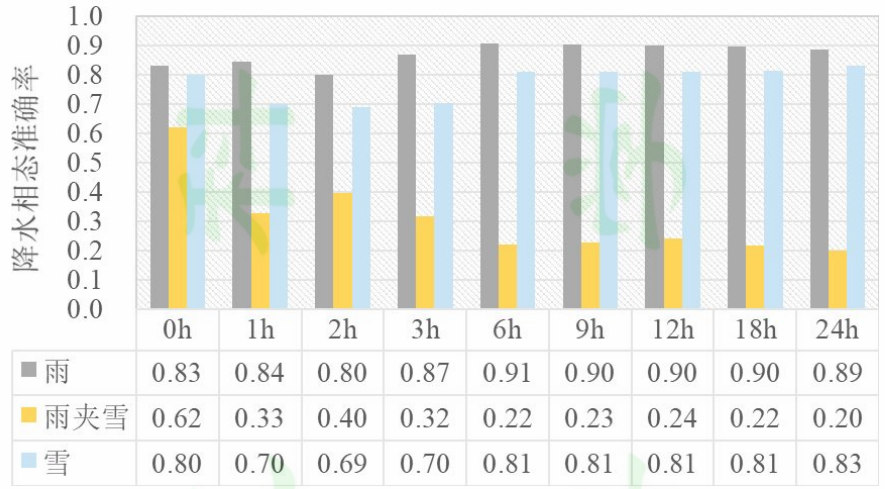


图 11 RISE 系统 5 次降水相态个例（2021 年 11 月 6-7 日、2021 年 11 月 21 日、2022 年 2 月 12-13 日、2022 年 3 月 11-12 日、2022 年 3 月 17-18 日）准确率

Fig.11 The accuracy of RISE system for five precipitation type cases (November 6-7, 2021; November 21, 2021; February 12-13, 2022; March 11-12, 2022; March 17-18, 2022)

5 结论与讨论

本文总结了北京城市气象研究院 RISE 系统研发和应用情况，介绍了百米尺度气象要素快速集成融合预报技术以及大涡模拟实时运行方案，给出了 RISE 系统产品在北京冬奥会期间的应用检验评估结果。通过实时快速融合京津冀地区 3000 多个、冬奥山地赛区 100 多个自动站观测资料，京津冀 10 部天气雷达监测资料，以及数值预报、临近预报、大涡模拟产品，RISE 系统不仅可以提供高时空分辨率温湿风、阵风、降水及降水相态等的精细化实况分析产品，而且还可提供次公里尺度和百米尺度网格化的 0-24h 短临预报产品，结合实时大涡数值预报，可提供复杂山地 0-10 天百米尺度无缝隙预报产品。应用检验结果表明，RISE 系统预报产品对冬奥赛区天气发展演变具有较好的参考意义。

本文的主要结论小结如下：

（1）基于多源资料快速融合核心思路，通过整合稠密自动气象站观测资料、天气雷达资料、数值模式预报数据、临近预报数据、大涡模拟数据，设计出可分钟级快速计算的模块化软件代码架构，开发完成了北京地区高时空分辨率快速融合无缝隙集成预报 RISE 系统，实现了在北京冬奥会及冬残奥会期间的实战应用，解决了“百米级、分钟级”精细化实时业

务预报产品几近空白的问题。

(2) 针对北京冬奥会“百米级、分钟级”精准预报需求,RISE 系统集成了高时空分辨率三维风场融合技术(杨璐等,2019)、复杂地形降尺度插值技术(陈康凯等,2020)、高精度风场偏差订正技术(杨璐等,2022)、百米级阵风客观预报算法(杨璐等,2023)、定量降水无缝隙融合预报技术(程丛兰等,2019)、雷达定量气候校准技术(宋林烨等,2019)、高分辨率降水相态分类客观预报技术(Yang et al. 2021)等,提升了北京地区温湿风、阵风、降水及降水相态格点分析和 0-24 小时预报性能。

(3) 针对北京冬奥会“一场一策”5 天以上精细化预报需求,RISE 系统进一步集成了 RISE-Thin 大涡数值模式预报数据。采用大涡模式,研发了分段并行运算、降尺度加速、微物理方案简化、关键物理方案和配置优化等技术(中国气象局,2022),解决了计算资源庞大的大涡模拟无法实时业务应用的问题,实现了冬奥六个室外核心场馆(群)温湿风及阵风的 0-10 天实时大涡数值预报。

但是,RISE 系统的百米级快速融合预报技术仍存在许多问题,亟待未来进一步研究和解决。主要问题如下:

(1) 融合的多源观测资料仍不足,尤其是高空观测。局地多源稠密观测资料是百米级融合集成预报最关键的因子之一,因此除了地面自动气象站和天气雷达组网观测,未来还需融合更多诸如卫星观测、铁塔梯度观测、廓线资料等,并进一步优化观测资料预处理和质控算法。多源观测资料的快速融合对于实现高空温湿风精细化短临预报、局地对流新生预报和预警时间提前都有重要的现实意义。

(2) 融合算法仍有很大的改进空间。例如虽然百米级风场偏差订正技术理论上也适用于百米级温度偏差订正,但实际测试结果表明效果并不理想,这可能与温度融合算法有关,未来可进一步开展研究;又例如,通过长期检验结果未来可针对不同预报时效建立降水相态动态诊断阈值,以进一步提升预报准确率。固定的线性函数和反指数权重函数仍无法达到最优的 2-6 小时融合预报效果,因此未来仍需要进一步针对不同天气形势和不同要素特征开展动态的最优函数无缝隙融合集成。

(3) 冬季大涡模拟运行方案并不直接适用于夏季。尽管基于大涡模拟的 0-10 天阵风预报产品在冬奥会实战应用中发挥了重要作用,比如 2022 年 2 月 15 日 08 时起报结果准确抓住了 16 日 12 时~14 时小风“窗口期”,为国家高山滑雪中心女子全能滑降官方训练从 08 时推迟至 12 时提供了有力支撑;但是夏季强对流等天气过程比冬季天气更为复杂(Chen et al. 2014; Qin et al. 2017),因此本文提出的大涡数值预报方案无法直接应用于夏季强对流等高影响天气的百米尺度实时应用。然而,结合强对流天气特征,正在开展的初步研究测试表明,这一技术思路未来仍有望在夏季强对流尤其是龙卷和雷暴大风的百米级实时短临预报中发挥一定作用。

百米尺度精细化融合预报技术不仅依赖于多源局地稠密观测资料的支撑,而且模式背景

场在百米级融合预报中也发挥着重要的作用（Song et al. 2023；宋林烨等，2024），因此自主可控的高时空分辨率数值模式发展仍然是未来天气预报最重要的研究方向之一（沈学顺等，2020）。另外，人工智能技术在冬奥会应用中体现出了较大的潜力，因此未来的百米尺度 RISE 系统可引入人工智能技术，在吸纳现有物理内核的基础上，建立 AI 后处理软件架构，将相关研究成果（Song et al. 2020；杨璐等，2021；曹伟华等，2022；韩念隼等，2022；张延彪等，2022；徐景峰等，2023；Liu et al. 2024）集成到 RISE 系统，实现高效稳定运行，并进一步提升产品准确性。最后，开发自动化、智能化的产品显示平台或交互式预报制作平台，有助于加强客观预报产品的落地应用，从而发挥预报员对高影响天气的主观预报优势。

致谢：感谢北京城市气象研究院的仲跻芹、卢冰、杨扬，北京市气象台的时少英、于波、荆浩，北京市气象信息中心的孙成云、缪宇鹏，华风创新研究院的王勇，河北省气象局的王玉虹，国家气象中心的邓国，以及郭瀚阳对本文工作的帮助。

参考文献（References）

- 蔡旭晖，陈家宜. 1995. 一个对流边界层大涡模式的建立与调试[J]. 大气科学, 19(4): 415-421. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1995.04.04. Cai X H, Chen J Y. 1995. A large eddy simulation model for convective boundary layer[J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 19(4): 415-421. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1995.04.04
- 曹伟华，陈明轩，高峰，等. 2019. 雷暴区域追踪矢量与雷暴单体追踪矢量融合临近预报研究[J]. 气象学报, 77(6):1015-1027. doi:10.11676/qxxb2019.064. Cao W H, Chen M X, Gao F. 2019. A vector blending study based on object-based tracking vectors and cross correlation tracking vectors[J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 77(6):1015-1027. doi:10.11676/qxxb2019.064
- 曹伟华，南刚强，陈明轩，等. 2022. 基于深度学习的京津冀地区精细尺度降水临近预报研究[J]. 气象学报, 80(4): 546-564. doi:10.11676/qxxb2022.027. Cao W H, Nan G Q, Chen M X. 2022. A study on fine scale precipitation nowcasting in Beijing-Tianjin-Hebei region based on deep learning[J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 80(4): 546-564. doi:10.11676/qxxb2022.027
- 陈葆德，王晓峰，李泓，等. 2013. 快速更新同化预报的关键技术综述[J]. 气象科技进展, 3(2): 29-35. Chen B D, Wang X F, Li H. 2013. An Overview of the Key Techniques in Rapid Refresh Assimilation and Forecast[J]. Adv Meteor Sci Technol (in Chinese), 3(2): 29-35

- 陈明轩, 高峰, 孔容, 等. 2010. 自动临近预报系统及其在北京奥运期间的应用[J]. 应用气象学报, 21(4): 395-404. Chen M X, Gao F, Kong R. 2010. Introduction of auto nowcasting system for convective storm and its performance in Beijing Olympics meteorological service[J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 21(4): 395-404
- 陈明轩, 高峰, 孙娟珍, 等. 2016. 基于 VDRAS 的快速更新雷达四维变分分析系统[J]. 应用气象学报, 27(3): 257-272. doi: 10.11898/1001-7313.20160301. Chen M X, Gao F, Sun J Z. 2016. An Analysis System Using Rapid-updating 4-D Variational Radar Data Assimilation Based on VDRAS[J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 27(3): 257-272. doi: 10.11898/1001-7313.20160301
- 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. 2021. A Review of SMART2022-FDP Progress[J]. Adv Meteor Sci Technol (in Chinese), 11(6):8-13
- 陈明轩, 杨璐, 秦睿, 等. 2024. 智慧冬奥 2022 天气预报示范计划的实施与评估[J]. 大气科学学报, 47(3):361-375. doi:10.13878/j. cnki.dqkxxb.20230627001. Chen M X, Yang L, Qin R, et al. 2024. Operation and evaluation of SMART2022-FDP[J]. Trans Atmos Sci (in Chinese). 47(3):361-375. doi:10.13878/j. cnki.dqkxxb.20230627001
- 陈德辉, 薛纪善. 2004. 数值天气预报业务模式现状与展望[J]. 气象学报, 62(5): 623-633. doi:10.11676/qxxb2004.061. Chen D H, Xue J S. 2004. An overview on recent progresses of the operational numerical weather prediction models[J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 62(5): 623-633. doi:10.11676/qxxb2004.061
- 陈静, 李晓莉. 2020. GRAPES 全球 / 区域集合预报系统 10 年发展回顾及展望[J]. 气象科技进展, 10(2): 9-18, 29. Chen J, Li X L. 2020. The review of 10 years development of the GRAPES global/regional ensemble prediction[J]. Adv Meteor Sci Technol (in Chinese), 10(2): 9-18, 29
- 陈康凯, 宋林烨, 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. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00108. Chen K K, Song L Y, YANG L. 2020. Research and application of a three-dimensional interpolation method for high-resolution temperature in complex terrain based on Gaussian fuzzy[J]. Plateau Meteor (in Chinese), 39(2): 367-377. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00108
- 程丛兰, 陈明轩, 王建捷, 等. 2013. 基于雷达外推临近预报和中尺度数值预报融合技术的短时定量降水预报试验[J]. 气象学报, 71(3): 397- 415. doi:10.11676/qxxb2013.041. Cheng C L, Chen M X, Wang J J. 2013. Short-term quantitative precipitation forecast experiments based on blending of nowcasting with numerical weather prediction[J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 71(3): 397- 415. doi:10.11676/qxxb2013.041
- 程丛兰, 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. doi:10.11676/qxxb2019.017. Cheng C L, Chen M, Chen M X. 2019. Comparative experiments on two high spatiotemporal resolution blending algorithms for quantitative precipitation nowcasting[J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 77(4): 701-714. doi:10.11676/qxxb2019.017
- 顾震潮. 1959. 我国数值预报的成就. 气象学报, 30(3): 236-242. doi:10.11676/qxxb1959.033. Gu Z C. 1959. Achievement of numerical prediction in China. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 30(3): 236-242. doi:10.11676/qxxb1959.033
- 韩念霏, 杨璐, 陈明轩, 等. 2022. 京津冀站点风温湿要素的机器学习订正方法[J]. 应用气象

学报, 33(4): 489-500. doi:10.11898/1001-7313.20220409. Han N F, Yang L, Chen M X. 2022. Machine Learning Correction of Wind, Temperature and Humidity Elements in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 33(4): 489-500. doi:10.11898/1001-7313.20220409

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. doi:10.11676/qxxb2019.005. 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 Meteor Sinica (in Chinese), 77(4): 701-714. doi:10.11676/qxxb2019.005.

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. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.04.001. Jin R H, Dai K, Zhao R X, et al. 2019. Process and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China[J]. Meteor Mon (in Chinese), 45(4): 445-457. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.04.001

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. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.005. Li J, Chen 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 (in Chinese), 46(9): 1178-1188. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.005

李泽椿. 2010. 回顾数值预报业务的建立发展历程. 北京: 中国气象报社. Li Z C. 2010. Review of History of NWP Operation. Beijing: China Meteorological News (in Chinese)

刘郁珏, 苗世光, 刘磊等. 2019. 修正 WRF 次网格地形方案及其对风速模拟的影响[J]. 应用气象学报, 30(1): 70-81. doi:10.11898/1001-7313.20190107. Liu Y J, Miao S G, Lei L, et al. 2019. Effects of a modified sub-grid-scale terrain parameterization scheme on the simulation of low-layer wind over complex terrain[J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 30(1): 70-81. doi:10.11898/1001-7313.20190107

李继萍, 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. doi:10.11676/qxxb2022.001. 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 Meteor Sinica (in Chinese), 80(1): 108-123. doi:10.11676/qxxb2022.001

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

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. doi:10.11898/1001-7313.20170101. Shen X S, Su Y, Hu J L, et al. 2017. Development and operation transformation of GRAPES global middle-range forecast system[J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 28(1): 1-10. doi:10.11898/1001-7313.20170101

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. doi:10.11676/qxxb2020.030. Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al. 2020. China's independent and innovative development of numerical weather prediction[J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 78(3): 451-476. doi:10.11676/qxxb2020.030

师春香, 潘旻, 谷军霞, 等. 2019. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J]. 气象学报,

77(4): 774-783. doi:10.11676/qxxb2019.043. Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al. 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products[J]. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 77(4): 774-783. doi:10.11676/qxxb2019.043

宋林烨, 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. doi:10.11676/qxxb2019.022. 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 Meteor Sinica (in Chinese)*, 77(3): 497-515. doi:10.11676/qxxb2019.022

宋林烨, 杨璐, 程丛兰, 等. 2024. 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[J]. *大气科学. 网络预出版*. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2306.23059. Song L Y, Yang L, Cheng C L, et al. 2024. Comparative study on the influence of different NWP model background on the 100-meter integrated temperature and wind forecasts in complex terrain[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2306.23059

陶诗言, 赵思雄, 周晓平, 等. 2003. 天气学和天气预报的研究进展[J]. *大气科学*, 27(4): 451-467. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.03. Tao S Y, Zhao S X, Zhou X P, et al. 2003. The research progress of the synoptic meteorology and synoptic forecast[J]. *Chinese J. Atmos Sci (in Chinese)*, 27(4): 451-467. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.03

王玉虹, Bica Benedikt. 2022. 不同天气背景下京津冀降水临近外推预报[J]. *应用气象学报*, 33(3): 270-281. doi:10.11898/1001-7313.20220302. Wang Y H, Bica Benedikt. 2022. Precipitation extrapolation nowcasting in Beijing-Tianjin-Hebei under different weather backgrounds[J]. *J Appl Meteor Sci (in Chinese)*, 33(3): 270-281. doi:10.11898/1001-7313.20220302

吴剑坤, 陈明轩, 秦睿, 等. 2019. 变分回波跟踪算法及其在对流临近预报中的应用试验[J]. *气象学报*, 77(6): 999-1014. doi:10.11676/qxxb2019.062. Wu J K, Chen M X, Qin R, et al. 2019. The variational echo tracking method and its application in convective storm nowcasting[J]. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 77(6): 999-1014. doi:10.11676/qxxb2019.062

徐景峰, 宋林烨, 陈明轩, 等. 2023. 冬奥会复杂山地百米尺度 10 m 风速预报的机器学习订正对比试验[J]. *大气科学*, 47(03): 805-824. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2209.22117. Xu J F, Song L Y, Chen M X, et al. 2023. Comparative machine learning-based correction experiment for a 10 m wind speed forecast at a 100 m resolution in complex mountainous areas of the Winter Olympic Games [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 47(3): 805-824. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2209.22117

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, 383pp (in Chinese)

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[J]. *气象学报*, 77(2): 243-255. doi:10.11676/qxxb2019.010. Yang L, Chen M, Chen M X, et al. 2019. Fusion of 3D high temporal and spatial resolution wind field and its application in nowcasting of severe convective weather[J]. *Acta Meteorol Sin (in Chinese)*, 77(2): 243-255. doi:10.11676/qxxb2019.010

杨璐, 南刚强, 陈明轩, 等. 2021. 基于三种机器学习方法的降水相态高分辨率格点预报模型的构建及对比分析[J]. *气象学报*, 79(6): 1022-1034. doi:10.11676/qxxb2021.059. Yang L,

832 Nan G Q, Chen M X, et al. 2021. The construction and comparison of high resolution
833 precipitation type prediction models based on three machine learning methods[J]. *Acta*
834 *Meteorol Sin* (in Chinese), 79(6): 1022-1034. doi:10.11676/qxxb2021.059

835 杨璐, 宋林烨, 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
836 预报中的应用研究[J]. *气象*, 48(2): 162-176. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.092902.

837 Yang L, Song L Y, Jing H, et al. 2022. Fusion prediction and correction technique for
838 high-resolution wind field in Winter Olympic Games area under complex terrain[J]. *Meteor*
839 *Mon* (in Chinese), 48(2): 162-176. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.092902

840 杨璐, 王晓丽, 宋林烨, 等. 2023. 基于阵风系数模型的百米级阵风客观预报算法研究[J]. *气*
841 *象学报*. 81(1): 94-109. doi:10.11676/qxxb2023.20220052. Yang L, Wang X L, Song L Y, et
842 al. 2023. An algorithm for objective forecasting of gust winds at 100m horizontal resolution
843 based on a gust coefficient model[J]. *Acta Meteorol Sin* (in Chinese), 81(1): 94-109.
844 doi:10.11676/qxxb2023.20220052

845 张治国, 崔炜, 白雪涛, 等. 2017. 第 24 界冬奥会海坨山赛区近两年冬季地面风场特征[J].
846 *干旱气象*, 35(3): 433-438. doi:10.11755/j.issn.1006-7639. Zhang Z G, Cui W, Bai X T, et al.
847 2017. Winter Ground Wind Field Characteristic in the Haituo Mountain Division for the 24th
848 Winter Olympic Games[J]. *Arid Meteor* (in Chinese), 35(3): 433-438.
849 doi:10.11755/j.issn.1006-7639

850 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.
851 1979. *Mathematical and Physical Basis of Numerical Weather Prediction* (Vol. 1). Beijing:
852 Science Press, 543pp (in Chinese)

853 曾庆存. 2017. 进一步提高气象灾害的监测、预测和防控调度能力的前景[J]. *科学通报*,
854 62(13): 1315-1323. doi: 10.1360/N972016-01427. Zeng Q C. 2017. Monitoring, prediction
855 and management of meteorological disasters[J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese),
856 62(13): 1315-1323. doi: 10.1360/N972016-01427

857 张璟, 李泓, 段晚锁, 等. 2022. 台风集合预报研究进展[J]. *大气科学学报*, 45(5): 713-727.
858 doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20211124001. Zhang J, Li Hong, Duan W S, et al. 2022. Review
859 on the research progress of typhoon ensemble forecast[J]. *Trans Atmos Sci* (in Chinese),
860 45(5): 713-727. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20211124001

861 张延彪, 宋林烨, 陈明轩, 等. 2022. 基于卷积神经网络的京津冀地区高分辨率格点预报偏差
862 订正试验[J]. *大气科学学报*, 45(6): 850-862. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220615001.

863 Zhang Y B, Song L Y, Chen M X, et al. 2022. A study of error correction for high-resolution
864 gridded forecast based on convolutional neural network in the Beijing-Tianjin-Hebei
865 region[J]. *Trans Atmos Sci* (in Chinese), 45(6): 850-862.
866 doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220615001

867 Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al. 2014. Diurnal evolution and distribution of warm-season
868 convective storms in different prevailing wind regimes over contiguous North China[J]. *J.*
869 *Geophys. Res. Atmos.*, 119: 2742-2763. doi:10.1002/2013JD021145

870 Chen M X, Quan J N, Miao S G, et al. 2018. Enhanced Weather Research and Forecasting in
871 Support of the Beijing 2022 Winter Olympic and Paralympic Games[J]. *WMO Bulletin*,
872 67(2): 58-61

873 Cheng X L, Wu L, Hu F, et al. 2012. Parameterizations of some important characteristics of
874 turbulent fluctuations and gusty wind disturbances in the atmospheric boundary layer[J]. *J*
875 *Geophys Res*, 117: D08113. doi:10.1029/2011JD017191

876 Deardorff J W. 1972. Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers[J].
877 J. Atmos. Sci., 29, 91-115

878 Engel C, Ebert E E. 2012. Gridded operational consensus forecasts of 2-m temperature over
879 Australia[J]. Wea Forecasting, 27(2): 301-322. doi:10.1175/WAF-D-11-00069.1

880 Glahn H R, Ruth D P, 2003. The new digital forecast database of the national weather service[J].
881 Bull Amer Meteor Soc, 84(2): 195-201. doi:10.1175/BAMS-84-2-195

882 Golding B W. 1998. Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts[J].
883 Meteor. Appl., 5(1):1-16

884 Haiden T, A Kann, G Pistotnik, et al., 2009. Integrated Nowcasting through Comprehensive
885 Analysis (INCA) – System description. – ZAMG report,
886 http://www.zamg.ac.at/fix/INCA_system.pdf.

887 Haiden T, A Kann, C Wittmann, et al. 2011. The integrated nowcasting through comprehensive
888 analysis (INCA) system and its validation over the Eastern Alpine region[J]. Wea Forecasting,
889 26: 166–183

890 Haiden T, Kann A, Pistotnik G. 2014. Nowcasting with INCA during SNOW-V10[J]. Pure Appl
891 Geophys, 171: 231-242. doi:10.1007/s00024-012-0547-8

892 Huang L X, Isaac G A, Sheng G. 2012. Integrating NWP forecasts and observation data to
893 improve nowcasting accuracy[J]. Wea Forecasting, 27(4): 938–953.
894 doi:10.1175/WAF-D-11-00125.1

895 Kann A, Wang Y, Atencia A, et al. 2018. Seamless probabilistic analysis and forecasting: from
896 minutes to days ahead [C] // EUG General Assembly 2018. Vienna: EGU.

897 Letson F, S C Pryor, R J Barthelmie, et al. 2018. Observed gust wind speeds in the coterminous
898 United States, and their relationship to local and regional drivers[J]. J. Wind Eng. Ind.
899 Aerodyn., 173: 199-209. doi:10.1016/j.jweia.2017.12.008

900 Li H C, Yu C, Xia J J, et al. 2019. A model output machine learning method for grid temperature
901 forecasts in the Beijing area[J]. Adv. Atmos. Sci., 36(10): 1156–1170.
902 doi:10.1007/s00376-019-9023-z

903 Liu Y J, Y B Liu, D Muñoz-Esparza, et al. 2020. Simulation of Flow Fields in Complex Terrain
904 with WRF-LES: Sensitivity Assessment of Different PBL Treatments[J]. J. Appl. Meteor.
905 Climatol. 59(9): 1-52. doi:10.1175/JAMC-D-19-0304.1

906 Liu Y Q, Yang L, Chen M X, et al. 2024. A deep learning approach for forecasting thunderstorm
907 gusts in the Beijing – Tianjin – Hebei region[J]. Adv. Atmos. Sci.,
908 <https://doi.org/10.1007/s00376-023-3255-7>

909 Moeng C H, Dudhia J, Klemp J, et al. 2007. Examining Two-Way Grid Nesting for Large Eddy
910 Simulation of the PBL Using the WRF Model[J]. Mon Wea Rev, 135(6): 2295-2311.
911 doi:10.1175/MWR3406.1

912 Nam J E, Park K, Kim M, et al. 2016. Very-short range forecasting system for 2018 Pyeongchang
913 Winter Olympic and Paralympic games[C]// Egu General Assembly Conference. EGU
914 General Assembly Conference

915 Qin R, Chen M X. 2017. Impact of a front–dryline merger on convection initiation near a
916 mountain ridge in Beijing[J]. Mon Wea Rev, 145(7): 2611–2633.
917 doi:10.1175/MWR-D-16-0369.1

918 Skamarock W C, J B Klemp, J Dudhia, et al. 2019. A Description of the Advanced Research WRF
919 Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp. doi:10.5065/1dfh-6p97

- 920 Song L Y, M X Chen, F Gao, et al. 2019. Elevation influence on rainfall and a parameterization
921 algorithm in the Beijing area[J]. J. Meteor. Res., 33(6): 1143-1156.
922 doi:10.1007/s13351-019-9072-3
- 923 Song L Y, I Schicker, P Papazek, et al. 2020. Machine Learning Approach to Summer Precipitation
924 Nowcasting over the Eastern Alps[J]. Meteorol. Z., 29(4): 289-305.
925 doi:10.1127/metz/2019/0977
- 926 Song L Y, Yang L, Cheng C L, et al. 2023. The impacts of grid spacing and station network on
927 surface analyses and forecasts in Beijing Winter Olympic complex terrain[J]. Journal of
928 Applied Meteorology and Climatology, 62(12): 1761-1781. doi:10.1175/JAMC-D-22-0187.1
- 929 Sun J Z, N A Crook. 1997. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar
930 observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated
931 data experiments[J]. J Atmos Sci, 54(12): 1642-1661
- 932 Teakles A, Mo R, Dierking C F, et al. 2014. Realizing user-relevant conceptual model for the ski
933 jump venue of the Vancouver 2010 Winter Olympics[J]. Pure Appl Geophys, 171(1/2):
934 185-207. doi:10.1007/s00024-012-0544-y
- 935 Wang Y, Meiold-Mautner I, Kann A, et al. 2017. Integrating nowcasting with crisis management
936 and risk prevention in a transnational and interdisciplinary framework[J]. Meteorol. Z., 26(5),
937 459-473. doi:10.1127/metz/2017/0843
- 938 Wong W K, Lai E S T. 2006. RAPIDS-operational blending of Nowcast and NWP QPF. 2nd
939 International Symposium on Quantitative Precipitation Forecasting and Hydrology[J],
940 Boulder, USA, 4-8 June 2006
- 941 Wilson J W, Roberts R D. 2006. Summary of convective storm initiation and evolution during
942 IHOP: Observational and modeling perspective[J]. Mon. Wea. Rev., 134: 23-47.
943 doi:10.1175/MWR3069.1
- 944 Xia J J, H C Li, Y Y Kang, et al. 2020. Machine learning-based weather support for the 2022
945 Winter Olympics[J]. Adv. Atmos. Sci., 37(9): 927-932. doi:10.1007/s00376-020-0043-5
- 946 Yang L, Chen M X, Wang X L, et al. 2021. Classification of Precipitation Type in North China
947 using Model-based Explicit Fields of Hydrometeors with Modified Thermodynamic
948 Conditions[J]. Wea Forecasting, 36: 91-107. doi:10.1175/WAF-D-20-0005.1