

刘郁珏, 苗世光, 黄倩倩, 等, 2023. 睿图-大涡系统支撑北京冬奥会气象服务保障的评估分析[J]. 气象, 49(6): 733-744. Liu Y J, Miao S G, Huang Q Q, et al, 2023. Evaluation and analysis of meteorological service for Beijing Winter Olympic Games supported by RMAPS-LES prediction system[J]. Meteor Mon, 49(6): 733-744 (in Chinese).

睿图-大涡系统支撑北京冬奥会气象服务保障的评估分析*

刘郁珏 苗世光 黄倩倩 李玉焕 张亦洲

北京城市气象研究院, 北京 100089

提 要: 为满足北京冬奥组委对气象预报提出的“百米级、分钟级”精细化需求, 针对延庆和张家口赛区分别构建了由中尺度气象模式与大涡模拟耦合的百米微尺度预报系统“睿图-大涡”(RMAPS-LES), 并对其 2020—2022 年赛事月份(2—3 月)预报效果进行了对比检验。结果表明, 微尺度 RMAPS-LES 相对于中尺度模式 CMA-BJ 对站点风、温表现出了较高的预报技巧。冬奥全站点三年平均的逐时 2 m 温度、10 m 风速、瞬时风向的绝对误差分别为 1.85℃、2.11 m·s⁻¹、44.43°, 较 CMA-BJ 分别降低了 28%、23.6%、30.33%。RMAPS-LES 具有详细刻画大气微尺度湍流运动的优势, 其风速脉动值概率密度分布接近正态分布, 与观测相近。研究还发现, 在动力降尺度时, 不同尺度模拟区域之间需采用过渡技术以加速大涡模拟区域内湍流的快速生成。RMAPS-LES 采用了基于网格位温随机扰动的湍流生成方案, 能有效缩短过渡区, 快速达到能量平衡。其技术路线对风电厂微观选址、精细气象环境评估等预报精度要求较高的气象保障服务亦有借鉴意义。

关键词: 北京冬奥会, 高分辨率预报, 大涡模拟, 复杂地形, 跨尺度模拟

中图分类号: P404, P435

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.041701

Evaluation and Analysis of Meteorological Service for Beijing Winter Olympic Games Supported by RMAPS-LES Prediction System

LIU Yujue MIAO Shiguang HUANG Qianqian LI Yuhuan ZHANG Yizhou

Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: In this study, to meet the fine meteorological service requirements proposed by the Organizing Committee for the Beijing Winter Olympic Games, a real-time forecasting system with 100 m horizontal grid spacing RMAPS-LES which was coupled with mesoscale meteorological model and large eddy simulation was especially built for the Yanqing and Zhangjiakou competition zones. Based on the observation data of Winter Olympics zones and the 3 km×3 km horizontal grid spacing from “CMA-BJ” mesoscale forecast system, the RMAPS-LES results of the competition months (February to March) from 2020 to 2022 are compared and verified at different space-time scales. The results show that the high-resolution microscale RMAPS-LES has a higher prediction in forecasting wind and temperature than the CMA-BJ mesoscale model. The mean absolute error (MAE) of average hourly 2 m temperature of all stations in the three years for the Winter Olympic Games is 1.85℃, which is 28% less than the CMA-BJ model, the MAE of the hourly average 10 m wind speed is 2.11 m·s⁻¹, which is 23.6% less and the instantaneous wind

* 国家重点研发计划(2022YFC3004105)、国家自然科学基金项目(41705006、42275201 和 41905015)和北京市自然科学基金项目(8222050)共同资助

2022 年 10 月 25 日收稿; 2023 年 4 月 18 日收修定稿

第一作者: 刘郁珏, 主要从事大气湍流观测与模拟研究. E-mail: yjliu@ium.cn

通讯作者: 苗世光, 主要从事城市气象监测预报领域的科学研究及其在城市运行、城市规划建设中的应用工作. E-mail: sgmiao@ium.cn

direction MAE is 44.43° , 30.33% lower. Relative to the CMA-BJ model, RMAPS-LES has the advantage of obtaining high-frequency data that can describe the atmospheric microscale turbulent motion in detail. The verification results indicate that the probability density distribution of wind speed fluctuation is basically close to the normal distribution, nearing the observations. It is also found that when dynamic down-scaling is used, the inflow turbulence generation method needs to be used for different-scale simulation to accelerate the rapid generation of atmospheric turbulence in the large eddy simulation region. The RMAPS-LES uses the turbulence generation scheme based on random disturbance of grid potential temperature, which can substantially reduce the transitional zone and achieve fully developed turbulence. The technical route of RMAPS-LES can also be widely used in the wind power generators selection, forest fires, outdoor activities, and other scenes that have high requirements for fine local meteorological forecasts.

Key words: Beijing Winter Olympic Games, high-resolution prediction, large eddy simulation, complex terrain, cross-scale simulation

引 言

历届冬季奥林匹克运动会赛区通常处于复杂山地,其近地面气象条件(尤其是风场)因地形起伏而呈现高非均匀性,因此气象观测和预报的难度极大(李磊等,2010;Liu et al,2011;李炬等,2020)。复杂地形精细天气预报也是近年来国内外预报技术的难点和重要发展趋势(Fernando et al,2019)。2022年第24届北京冬季奥运会(简称北京冬奥会)延庆和张家口赛区位于复杂山地,且赛区海拔落差极大(李嘉睿等,2022;胡艺等,2022)。此外,北京冬奥会还是世界上首次在大陆性气候城市举办的冬奥会,组委会对气象预报精细化服务提出了“百米级、分钟级”天气预报的要求。以上这些因素均给赛事气象保障工作带来了巨大挑战(邓国等,2022;杨璐等,2022;孔凡超等,2022)。

目前,最常使用的数值天气预报模式为中尺度(1~10 km)区域模式(Chow et al,2013),拥有丰富的物理参数化方案,能很好地预测中尺度天气事件,获得气象场平均状态。但由于网格距较粗,难以满足复杂地形气象精细化数值预报需求。一方面,由于复杂山地区域大气运动的特征尺度均较小(Cuxart,2015),如坡风的水平尺度约为100 m、垂直尺度仅为10 m。因此,中尺度模式已不能分辨出任何有关坡风的特征,而坡风具有很强的日变化特征,对任何户外雪上运动都产生极大影响。另一方面,中尺度模式一般采用雷诺平均来处理 Navier-Stokes 方程,不具备捕捉小尺度大气湍流运动的能力(Milovac et al,2016)。大涡模拟(large eddy simulation,

LES)不同于雷诺平均,它对大尺度三维结构的湍流进行直接求解,仅对小尺度湍流进行参数化,因此能捕捉湍流运动的主要能量(Lilly,1966;Deardorff,1972;张兆顺等,2005;Cuxart,2015)。以往由于计算资源有限,LES通常仅限于开展理想试验(Moeng and Sullivan,1994;Chow et al,2005;Mirocha et al,2010;刘梦娟等,2018)。近年来,随着计算资源迅速发展,将中尺度模式与大涡模拟耦合,通过多重嵌套动力降尺度方法对真实天气开展高分辨率模拟已成为可能。如Liu et al(2011)构建了六重嵌套的WRF-LES耦合模型(最里层水平网格距达 $123\text{ m}\times 123\text{ m}$),Talbot et al(2012)和Rai et al(2017)将水平网格距分别提高至 $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ 和 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$,Muñoz-Esparza et al(2017)进一步提高至 $8\text{ m}\times 8\text{ m}$ 。刘郁珏等(2018)和Liu et al(2020)基于WRF-LES对北京冬奥延庆赛区开展了 $37\text{ m}\times 37\text{ m}$ 的数值模拟试验。以上研究仅考察了中尺度气象与大涡模拟耦合模式对单个天气个例的模拟性能,尚未将其作为实时预报工具。

本文针对北京冬奥会延庆和张家口两个赛区,分别构建了 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 水平网格距的实时预报系统“睿图-大涡”(Rapid-Refresh Multi-Scale Analysis and Prediction System-Large Eddy Simulation,RMAPS-LES),并对2020—2022年赛事月份(2—3月)的实时预报效果进行了检验、评估。

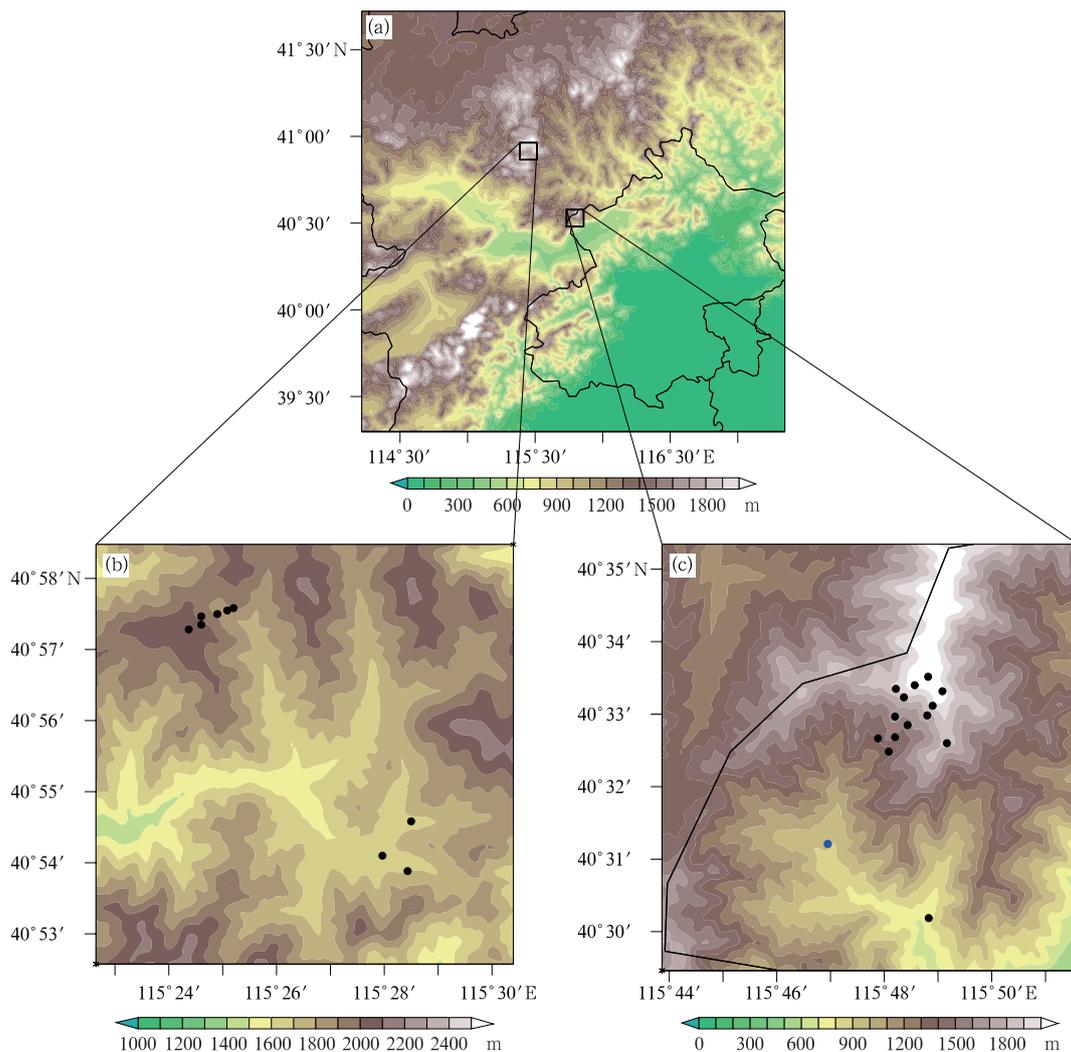
1 睿图-大涡系统简介

RMAPS-LES核心框架为V3.9.1.1版本的WRF模式(Skamarock et al,2008),采用两重嵌套

(图 1): 一个中尺度区域(d01), 水平网格距为 $1.1 \text{ km} \times 1.1 \text{ km}$, 涵盖北京市大部分范围(图 1a); 一个微尺度区域(d02), 水平分辨率为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, 分别涵盖了张家口(图 1b)、延庆(图 1c)赛区。d01 与 d02 之间水平网格距采用了较常规(1:3)更大的嵌套比(1:11), 可避免网格距落入 $100 \text{ m} \sim 1 \text{ km}$ 的“灰区”尺度(Wyngaard, 2004; Zhou et al, 2014)。为加速 LES 模拟区域入流边界附近大气湍流的快速产生, 在 d02 边界网格采用了基于位温扰动方法的入流边界湍流生成方案(详见 3.5 节)。

RMAPS-LES 引入 30 m 分辨率高精度地理信息数据集, 地形高程数据采用了 SRTM1 (Shuttle

Radar Topography Mission 1s, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>), 地表覆盖类型数据为 GlobeLand30-2010 (<http://www.globalland30.com/>)。相比中尺度模式常用的 900 m 分辨率 USGS_30s (United States Geological Survey 30 s, <http://www.usgs.gov/>), SRTM1 能呈现更精细山地沟壑样貌, 经与实测海拔高度对比, SRTM1 较 USGS_30s 平均误差减小了 64.7 m 。刘郁珏等(2018)分别使用了以上两套地形高程数据对延庆赛区风场开展了数值模拟(网格距均为 $37 \text{ m} \times 37 \text{ m}$), 结果显示 SRTM1 试验可详细刻画地表不均一特征, 呈现更精细的复杂山地风场结构。



注: 填色为海拔高度; 圆点均为自动气象站, 其中蓝色圆点为带有超声风速仪的西大庄科站。

图 1 睿图-大涡系统嵌套区域

(a)d01, (b)张家口赛区 d02, (c)延庆赛区 d02

Fig. 1 Computational (a) domain d01, (b) domain d02 of Zhangjiakou Competition Zone and (c) domain d02 of Yanqing Competition Zone for RMAPS-LES

初始场和侧边界条件来自北京城市气象研究院建立的中国气象局北京区域快速更新多尺度观测资料同化分析及中尺度数值预报系统(简称 CMA-BJ)的 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 水平网格距逐 3 h 预报场(全继萍等, 2022)。CMA-BJ 基于 WRF 和 WRFDA(WRF data assimilation), 同化了探空、地面和飞机报等常规资料以及北京地区自动站和全国地区的地基资料, 还同化了京津冀区域 7 部雷达径向风和 29 部雷达组网拼图资料; 模式其他设置情况请参见杨扬等(2021)和全继萍等(2022)。RMAPS-LES 水平、垂直方向网格数、积分步长、物理参数化方案等模式设置如表 1。垂直层设置了下密上疏的 37 层, 其中 1 km 以下有 17 层。RMAPS-LES 每日开展 2 个时次的预报, 起报时间分别为 05 时(北京时, 下同)和 17 时, 每次预报时长为 24 h。

表 1 RMAPS-LES 基本设置情况及参数化方案

Table 1 Set-up of RMAPS-LES and schemes used in model simulations

模式设置	d01	d02
水平网格数	247×247	111×111
水平网格距/m	1100	100
垂直层数/层	37	37
模式层顶/hPa	50	50
积分步长 $\Delta t/s$	6	0.3
边界层方案	YSU	LES
次网格地形修正方案	Jiménez 修正 (参见刘郁珏等, 2019)	无
湍流次网格方案	无	1.5 TKE
入流边界湍流生成方案	无	有
云微物理方案	New Thompson	New Thompson
近地层方案	Revised MM5	Revised MM5
辐射方案	RRTMG	RRTMG
陆面方案	Noah	Noah
积云方案	Kain-Fritsch	无

2 预报结果检验方法

以 RMAPS-LES d02 区域 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 网格

距预报结果和 CMA-BJ $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 网格距预报结果为检验对象, 检验时长为三年赛事期间两个起报时次(05 时、17 时)的 24 h 预报。检验气象要素为站点逐小时的 2 m 温度、10 m 的风速和整点瞬时风向。检验站点为张家口赛区的 11 个自动气象观测站(图 1b 圆点)和延庆赛区的 13 个自动气象观测站(图 1c 圆点)。空间上将 RMAPS-LES 和 CMA-BJ 预报结果采用最近距离格点的方法插值到对应自动气象站点。由于 RMAPS-LES 与观测为逐 10 min 预报, 而 CMA-BJ 为逐 1 h 预报, 为便于比较, 将 RMAPS-LES 与观测的风速和温度采取整点向前一小时的滑动平均处理, RMAPS-LES 与观测的风向取整点瞬时值。以观测为“真值”, 分别计算 05 时和 17 时起报的平均误差(mean error, ME)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、均方根误差(root mean square error, RMSE)和命中率(hit rate, HR), 再计算整体平均值。计算 HR 时, 2 m 温度、10 m 风速和风向的阈值分别为 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $3\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 45° 。延庆赛区西大庄科站(图 1c, 蓝色圆点)超声风速仪 10 Hz 数据用于评估湍流的模拟效果。

3 预报结果检验评估

3.1 2 m 温度检验分析

表 2 给出了 2020—2022 年赛事月份(2—3 月) CMA-BJ 和 RMAPS-LES 两个起报时次的 2 m 温度 24 h 预报平均检验结果, 包含延庆、张家口两个赛区全体 24 个站点。整体来看, RMAPS-LES 对 2 m 温度的预报性能表现较为稳定, 三年平均 MAE 为 $1.85\text{ }^\circ\text{C}$, 在 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 以内, 已较好地达到了冬奥气象保障对 2 m 温度预报精度的需求。从 ME 来看, CMA-BJ 对赛区 2 m 温度的预报整体略有高估, 相反 RMAPS-LES 则略有低估。RMAPS-LES 对 2 m

表 2 2020—2022 年赛事月份延庆、张家口两个赛区逐时 2 m 温度预报检验结果

Table 2 Verification of hourly 2 m temperature forecasts for Yanqing and Zhangjiakou Winter Olympic Games zones in the competition months from 2020 to 2022

统计量	CMA-BJ				RMAPS-LES			
	2020 年	2021 年	2022 年	平均	2020 年	2021 年	2022 年	平均
ME/ $^\circ\text{C}$	0.20	0.53	0.42	0.38	-0.58	-0.17	-0.45	-0.40
MAE/ $^\circ\text{C}$	2.72	2.04	2.96	2.57	1.57	1.53	2.46	1.85
RMSE/ $^\circ\text{C}$	2.73	2.68	2.79	2.72	2.18	2.13	2.26	2.16
HR/%	58	60	57	58	73	74	71	73

温度的 MAE 较 CMA-BJ 有较明显的减小(减小 28%;以 CMA-BJ 为基准,下同),其他检验结果也均显示出了较好的预报技巧(RMSE 减小 21%,HR 提高 25%)。

图 2 给出了 CMA-BJ 与 RMAPS-LES 的 MAE、RMSE、HR 日变化曲线。RMAPS-LES 在全天时段内都表现出了明显优势,对 2 m 温度预报准确性有大幅提升。两个模式各检验要素日变化曲线不仅在整体趋势上相近,且在波峰、波谷等波动特征上也非常近似,均为 01—08 时预报效果较好,12—23 时预报效果略差。在真实大气边界层内大气湍流运动特征尺度的日变化中,白天较大的湍流可以发展到水平尺度 100~1000 m,而夜间水平尺度仅有 1~100 m。理论上,夜间 RMAPS-LES 的 100 m 水平网格距已不足以分辨大多数湍流,夜间应该表现出较白天更差的预报效果,而检验结果却呈现相反的结论。对照中尺度 CMA-BJ 的日变化曲线可知,在小时尺度上,RMAPS-LES 对 2 m 温度的预报准确

性实际在很大程度上仍取决于作为初始场和边界条件的中尺度模式性能,其次才是微尺度模式自身对更小尺度湍流运动的模拟能力。

在单个站点检验中还发现,中尺度模式 2 m 温度预报误差与该站点海拔高度呈现出很强的相关性。图 3 给出了各站点三年平均预报误差与站点海拔高度的散点图及拟合曲线。CMA-BJ 较 RMAPS-LES 在高海拔地区有较明显的高估,在低海拔地区有明显的低估。而 RMAPS-LES 由于使用了更精细的地形高程数据和更高分辨率的水平网格距,从而部分消除了由模式地形高度误差带来的温度预报系统性误差,这也是高分辨率模式在复杂地形下的显著优势。

图 4 为 2 m 温度预报误差在不同观测温度区间分布的箱线图,温度区间为 2℃ 间隔。图 4a 为各站点观测 2 m 温度的分布情况。从图 4a 中可知,全体观测站点 2 m 温度大致呈现正态分布特征,其中在 -13~-11℃ 区间内样本数最多,占总体样本的

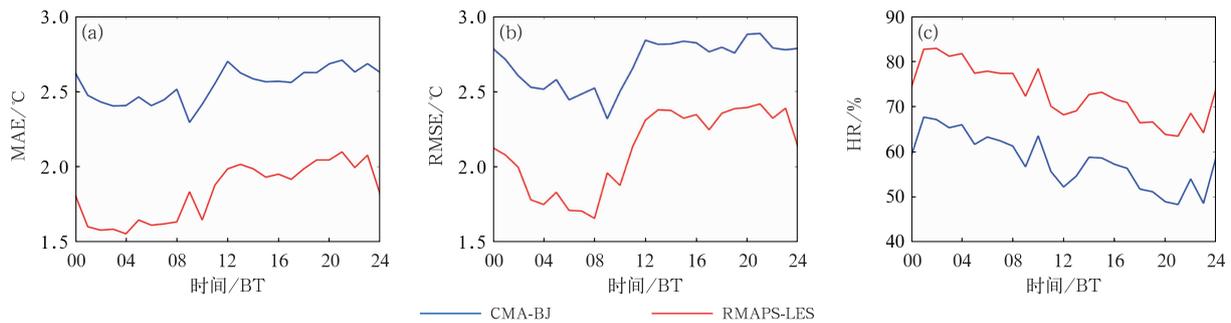


图 2 2020—2022 年赛事月份 2 m 温度(a)MAE,(b)RMSE,(c)HR 日变化曲线

Fig. 2 Daily variation curves of (a) MAE, (b) RMSE, (c) HR of hourly 2 m temperature prediction in the competition months from 2020 to 2022

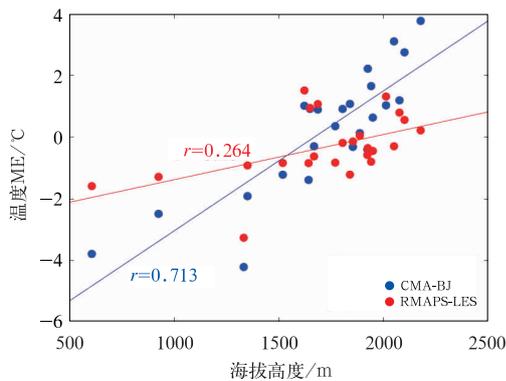


图 3 2 m 温度预报 ME 随海拔高度变化

Fig. 3 ME of predicted 2 m temperature varies with altitude

12%。两个模式在样本数占比较多的温度区间预报效果均较好,而向两侧低温及高温区间则出现了越来越明显的高估及低估。其中,RMAPS-LES 预报误差中位数整体更接近 0℃,且接近 0℃ 的区间跨度更广(-19~-9℃)。同时,RMAPS-LES 预报误差的离散度更小,表现出较强的稳定性。这种较集中的误差分布特点,也为基于机器学习的订正后处理提供了很好的规律。

3.2 10 m 风速检验分析

表 3 给出了 2020—2022 年赛事月份(2—3 月) CMA-BJ 和 RMAPS-LES 在两个起报时次的 10 m

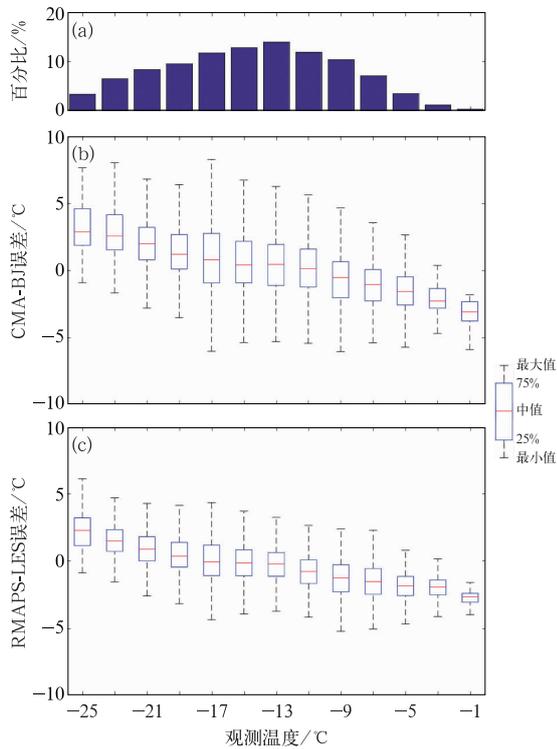


图 4 不同 2 m 观测温度的(a)分布区间, (b)CMA-BJ 预报误差、(c)RMAPS-LES 预报误差箱线图

Fig. 4 In each (a) observed 2 m temperature bins, (b, c) boxplots of predicted 2 m temperature errors for (b) CMA-BJ and (c) RMAPS-LES

风速 24 h 预报的检验结果。RMAPS-LES 对 10 m 风速的预报效果较为稳定, 每年平均 HR 均在 70% 以上(三年均值提高 19.7%), 三年平均的 MAE 为 $2.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (减小 23.6%)、RMSE 为 $2.65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (减小 25.1%), 基本满足预报精度需求。

从 ME 检验结果来看, CMA-BJ 在 2020 年对冬奥赛区 10 m 风速仍呈低估的特点, 符合中尺度模式由于次网格地形效应而呈现在海拔较高地区对近地面风速低估的系统性误差现象(刘郁珏等, 2018); 但 2021 年、2022 年 ME 开始变为正偏差, 其对风速由低估转为高估, 且幅度较大(2021 年较 2020 年, ME 增大 $3.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。主要原因在于冬奥赛场对部分赛道进行了防风建设, 减小了站点观测风速值, 进而使预报风速明显高估。

图 5 给出了 10 m 风速 MAE、RMSE、HR 日变化曲线。其日变化特征与 2 m 温度检验结果有相同之处: ①较 CMA-BJ, RMAPS-LES 在全天时段内都表现出了明显优势; ②两者日变化曲线不仅在整体趋势上相近, 在波动特征上也非常近似; ③两者在 01—12 时预报效果较好, 而在 12—23 时预报效果略差。④与微尺度模式自身模拟性能相反, RMAPS-LES 受中尺度模式制约, 夜间反而呈现更好的检验效果。不同之处在于, RMAPS-LES 模式检验要素日变化曲线波动更大, 这是由于其逐时 10 m 风速

表 3 2020—2022 年赛事月份, 延庆、张家口两个赛区逐时 10 m 风速预报检验结果

Table 3 Verification of hourly 10 m wind speed forecasts for Yanqing and Zhangjiakou Winter Olympic Games zones in the competition months from 2020 to 2022

统计量	CMA-BJ				RMAPS-LES			
	2020 年	2021 年	2022 年	平均	2020 年	2021 年	2022 年	平均
ME/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	-1.42	2.03	0.95	0.52	1.03	2.33	1.92	1.76
MAE/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.95	2.44	2.88	2.76	2.17	1.75	2.41	2.11
RMSE/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3.76	3.21	3.66	3.54	2.66	2.45	2.84	2.65
HR/%	58	65	60	61	71	76	72	73

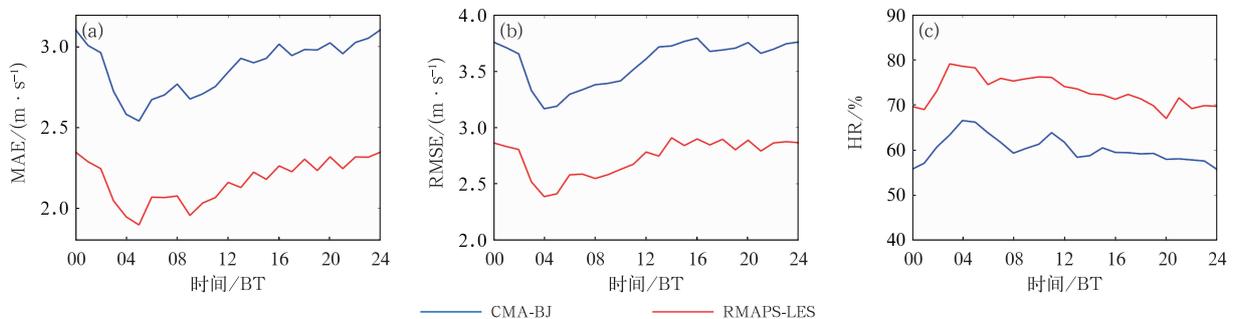


图 5 2020—2022 年赛事月份 10 m 风速(a)MAE, (b)RMSE, (c)HR 日变化曲线

Fig. 5 Daily variation curves of (a) MAE, (b) RMSE, (c) HR of 10 m wind speed prediction in the competition months from 2020 to 2022

时间序列不如 CMA-BJ 平滑,包含了更多分钟级阵风信息。

图 6 给出两个模式 10 m 风速预报误差在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 间隔阶梯观测风速区间的分布。从观测值可以看出,大部分风速分布在 $0 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 占全体样本的 70% 左右。风速分布呈典型正偏态分布特征(李军等, 2012)。CMA-BJ 在 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的预报效果较好, ME 中位数也在 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近。风速小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 预报风速略有高估; 随着风速增大, 预报呈显著低估现象, 风速大于 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 误差中位数达 $-11.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; CMA-BJ 对站点强风的预报能力较弱。相比之下, RMAPS-LES 在不同风速区间内, 误差中位数均较 CMA-BJ 更接近 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。除 $10 \sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速预报略有低估外, 其他区间内的预报均为高估, 包括强风区间。一方面表明模式存在系统性误差, 未来应从物理过程角度进行优化改进; 另一方面也表明其在强风预报方面较中尺度模式具有明显优势。

3.3 10 m 风向检验分析

表 4 给出了瞬时 10 m 风向检验结果。两个赛区主要以 $270^\circ \sim 360^\circ$ 象限的西风至北风的直流天气型为主(Jenkinson and Collison, 1977; 刘郁珏等, 2022), CMA-BJ 对背景场风向有较好的预报效果。相对于 CMA-BJ, RMAPS-LES 与观测更为接近, 各检验统计结果均偏好, 三年平均 MAE 为 44.43° (降低 30.33%)、RMSE 为 57.61° (降低 20.80%)、HR 为 68% (提高 28.30%)。图 7 给出了风向预报误差的玫瑰图, 可以更清楚地看到, 不仅在西风、北风的背景场风向象限内, 而且在与背景风场相反的东北、东南风向象限内, RMAPS-LES 预报误差大于 80° 的占比显著减少。

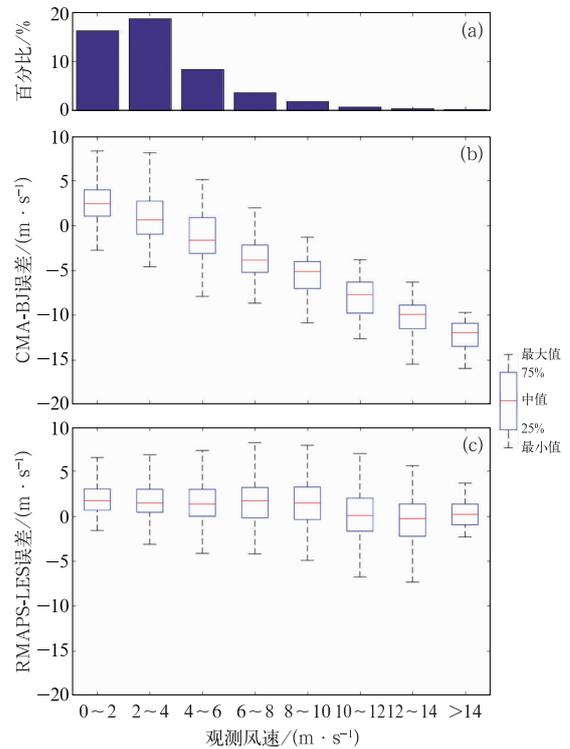


图 6 不同 10 m 观测风速(a)区间分布, (b)CMA-BJ 预报误差、(c)RMAPS-LES 预报误差箱线图

Fig. 6 In each (a) observed 10 m wind speed bins, (b, c) boxplots of predicted 10 m wind speed errors for (b) CMA-BJ and (c) RMAPS-LES

3.4 风速脉动概率密度分布检验分析

RMAPS-LES 对近地面风速预报的另一个较大优势在于能获得更高时间分辨率数据, 可详细刻画大气中较小部分湍流运动。在实际冬奥会服务中, 站点风速产品为逐 10 min 预报, 但前文对 10 m 风速的检验结果均基于逐 1 h 风速, 原因在于: ①为便于与中尺度模式 CMA-BJ 进行对比。②采用传统 ME、MAE、RMSE 等检验要素对高频数据进行

表 4 2020—2022 年赛事月份, 延庆、张家口两个赛区瞬时 10 m 风向检验结果

统计量	CMA-BJ				RMAPS-LES			
	2020 年	2021 年	2022 年	平均	2020 年	2021 年	2022 年	平均
ME/(°)	9.36	1.08	4.64	5.03	6.76	4.97	7.54	6.42
MAE/(°)	55.28	49.32	63.77	56.12	43.59	37.32	52.37	44.43
RMSE/(°)	73.52	63.65	81.04	72.74	58.32	50.85	63.67	57.61
HR/%	52	62	45	53	69	74	61	68

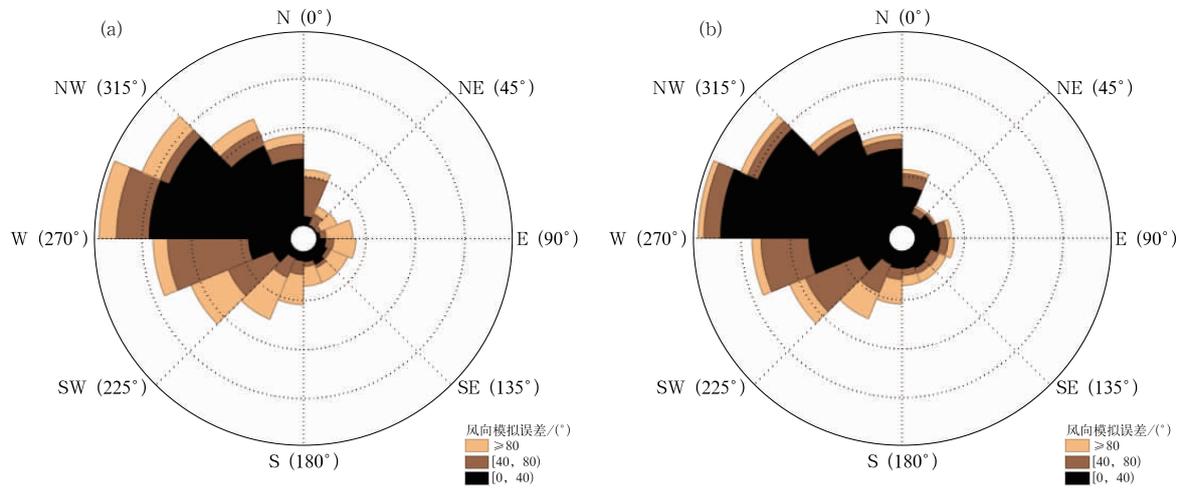


图 7 2020—2022 年赛事月份瞬时 10 m 风向的(a)CMA-BJ, (b)RMAPS-LES 预报误差玫瑰图
Fig. 7 Rose diagram of predicted instantaneous 10 m wind direction errors for (a) CMA-BJ and (b) RMAPS-LES in the competition months from 2020 to 2022

评估的方法并不准确。例如,逐 10 min 预报的风速在振幅上量级与观测相同,但在周期上略有提前或滞后,都将产生非常大的标准差。③ 10 min 间隔仍不足以评估 RMAPS-LES 对微尺度大气运动模拟

效果。因此,本小节采用风速脉动值的概率密度分布来表征湍流的预报效果。

图 8 显示了 2020—2021 年赛事月份(2—3 月) 10—16 时,延庆赛区西大庄科站(图 1c 蓝色圆点)

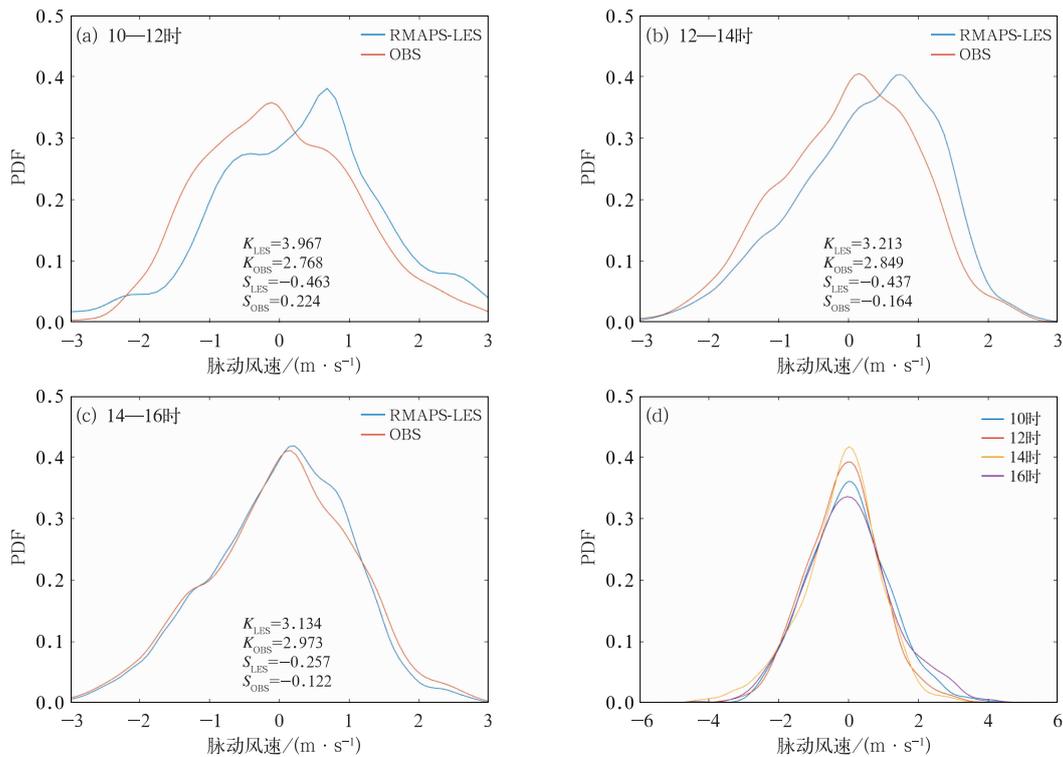


图 8 2020—2021 年赛事月份(a)10—12 时, (b)12—14 时, (c)14—16 时西大庄科站及 (d)d02 全区风速脉动概率密度(PDF)分布

Fig. 8 Probability distribution function (PDF) of wind speed perturbations at (a—c) Xidazhuangke Station at (a) 10:00—12:00 BT, (b) 12:00—14:00 BT, (c) 14:00—16:00 BT and (d) the d02 area in the competition months from 2020 to 2021

RMAPS-LES 预报和超声风速仪观测数据计算获得的风速脉动部分的概率密度分布情况。预报为每个积分步长输出的 10 m 风速,观测为 3 m 高度 10 Hz 风速,两者均重采样至 1 Hz。为消除中尺度变化信息,观测和预报的风速脉动值均为瞬时风速减去各自 30 min 平均风速值。从高阶矩偏度 S 可以看出,观测的风速脉动较预报更接近正态分布(S 接近 0),变化的幅度更广。RMAPS-LES 在 10—14 时阶段呈现负偏态($S < 0$),左侧有一条长尾,离散度较强,右侧极值较大且概率也大。随着时间增加,观测与预报的 S 值差异变小,接近正态分布。从峰度 K 可知,RMAPS-LES 预报较观测在三个时间段更大。 K 值越大,代表风速的短时变化越大,说明下沉气流和上升气流具有更大的垂直速度。10—12 时阶段 K 最大,随时间推移至 16 时, K 值逐渐减小,且观测与预报也更为接近,说明两者的平均值和标准差相差不大。而早期(10—12 时)出现的差异,则代表预报与实际的湍流位置有较大不同,导致站点处于湍流的相对位置也不同(上升区或下沉区),进而有不同的垂直速度分布。此时 RMAPS-LES 高估了该站点的垂直运动速度,在此基础上叠加中尺度平均风速后,导致预报的短时风速将出现高估。另外,所有时间段的概率密度分布差异也显示出湍流参数化方案存在缺陷。

通过图 8a~8c 可知,在 30 min 以内,风速可具有非常大的变化幅度。但单点还不能代表空间可变性,特别是在复杂山地环境下。图 8d 则进一步给出了四个瞬时时刻下代表空间风速脉动值的概率密度分布,其空间风速脉动值为 d02 各格点风速瞬时值减去全区平均风速。结果表明 RMAPS-LES 预报风速的空间波动幅度随着时间推移而减小,代表大气混合越来越充分均匀。四个时刻的风速脉动概率密度分布均呈负偏态,这意味着风速脉动在空间上是不对称的,可能是受复杂地形、数值参数化方案的共同影响。峰度分布也随着时间而变化,峰度值的变化与水平方向的湍流增加有关。14 时尖峰峰值最大,其次是 12 时。

3.5 入流边界湍流生成方案

虽然动力降尺度为多尺度之间过渡提高了便捷的方式,但 Mirocha et al(2014)和 Muñoz-Esparza et al(2014;2015)在研究中发现,由中尺度模式气象场驱动微尺度区域模拟时,在平稳的中尺度入流条

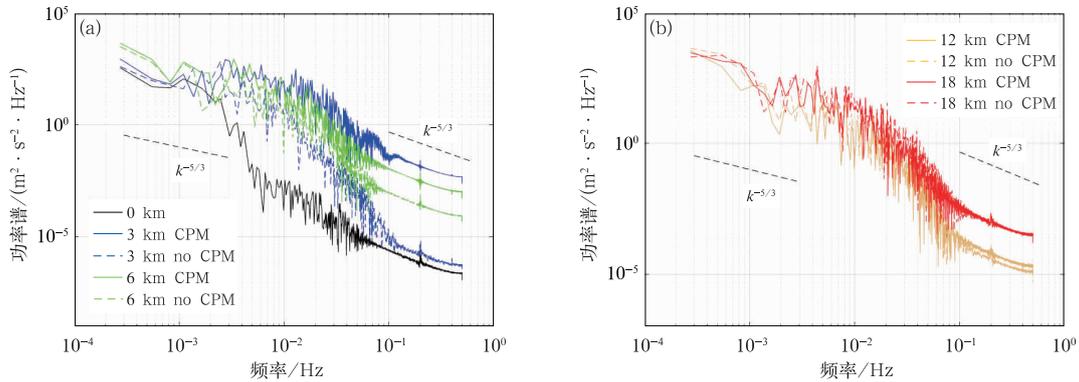
件中,湍流并不能立刻产生,而需经过很长的过渡区域才能逐步激发。这种湍流生成不足(湍流发展过渡状态)的现象将直接影响模拟的湍流强度,还将间接影响模拟大气边界层垂直结构,反而削弱了网格分辨率提高的优势。RMAPS-LES 采用了由 Muñoz-Esparza et al(2014)提出的基于位温场随机扰动的入流边界湍流生成方案(cell perturbation method,CPM),在 LES 模拟区域的入流边界附近的 8 个×8 个网格中对位温场进行有限振幅的随机扰动。在大气边界层中,适当的热扰动将原本不存在任何湍流运动的中尺度边界条件有效地触发出微尺度的三维大气运动,可加速由过渡状态到完全发展的湍流状态,且计算成本低,只需确定两个无量纲参数:扰动埃克特数(Ec)和扰动时间尺度(Γ)。其计算公式如下:

$$Ec = U_G^2 / (c_p \bar{\theta}_{PM}) \quad (1)$$

$$\Gamma = t_P U_1 / d_C \quad (2)$$

式中: U_G 为地转风, c_p 为恒压比热容, $\bar{\theta}_{PM}$ 为位温随机扰动的最大振幅,扰动范围即为 $[-\bar{\theta}_{PM}, \bar{\theta}_{PM}]$, t_P 是施加热扰动的持续时间, U_1 为中尺度模式第一层垂直层的水平风速 u 分量, d_C 为水平网格对角线。研究发现, Ec 为 0.2 时,可以最快地产生强迫一致的湍流,快速过渡发展为条纹状旋涡。扰动时间 Γ 最佳为 1,确保在下次扰动之前,气流可以平流出单个网格。

通过计算 d02 区域内不同位置的风速功率谱量化评估预报的大气湍流发展情况。图 9 给出了一个典型的晴天西风(入流边界在西侧)个例湍流发展最旺盛时段,距离延庆赛区 d02 区域西侧入流边界 0、3、6、12、18 km 处,水平风速 u 分量沿 y 轴方向(x 轴方向取 10 格点)平均的功率谱。虽然功率谱计算结果不能精确给出划分中、小尺度结构的具体频率位置,但其分布特征还是可以较清楚地显示不同尺度之间的过渡带。通常湍流能谱包含有斜率 $k = -5/3$ 的中尺度区,斜率为 $k = -1$ 的含能区和斜率为 $k = -5/3$ 的惯性子区。图 9a 给出了不同的谱分布特征,黑色实线为来自 d01 的边界条件($x = 0$ km),其功率谱有较大一部分区域的斜率为 $k = -1$,而明显缺少了代表小尺度运动的惯性子区,说明作为边界条件的中尺度来流完全缺乏小尺度运动信息。与采用了 CPM 的方案相比,距离西侧入流边界 6 km 以内,未采用 CPM 的 u 功率谱显示出巨大的能量赤字(图 9a)。随着距离的不断增加,到



注:实线(虚线)为启用(未启用)CPM方案。

图 9 2020 年 3 月 10 日 14 时延庆赛区 d02 区域入流边界(a)0、3、6 km, (b)12、18 km 处,模式第一层($z=20$ m)风速分量 u 沿 y 轴平均的功率谱

Fig. 9 Energy spectra of u along the y direction with/without (solid line/dashed line) CPM scheme at (a) 0, 3, 6 km, (b) 12, 18 km locations from the inflow boundary at the first model level ($z=20$ m) of d02 of Yanqing Competition Zone at 14:00 BT 10 March 2020

12 km 处(图 9b),未采用 CPM 时, u 功率谱在微尺度区域仍然显示存在一定的赤字。这是由于上游来流仍偏向于平滑的连贯波动,湍流发展不充分导致的。到 18 km 处,湍流发展才基本达到平衡,是否采用 CPM 方案,两者 u 功率谱不同尺度分布特征区别不大。这个距离几乎横跨了整个 d02 模拟区域,贯穿了整个延庆赛区。延庆赛区 d02 区域为复杂山地,地形非均一性也会加强湍流的生成;若为平坦地形,微尺度大气运动赤字区域将更加扩大。湍流生成方案很大程度上减少了过渡带范围,从而节约了计算资源。这也进一步说明,在动力降尺度时,不同尺度的模拟区域之间采用湍流生成方案是非常必要的。

4 结论与展望

本文介绍了针对 2022 年北京冬奥会的 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 水平网格距微尺度预报系统“睿图-大涡”,并针对 2020—2022 年赛事月份实时预报效果与观测及 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 中尺度模式 CMA-BJ 进行了对比检验,得到以下结论:

(1)从全体冬奥站点逐时风、温检验结果来看,微尺度 RMAPS-LES 相对于中尺度 CMA-BJ 更接近观测,展现出较好的预报技巧,尤其在极端低温和极大风速情况下表现出较大优势,基本可满足预报需求。但 RMAPS-LES 对站点逐时风、温预报性能

仍主要取决于作为初始场和边界条件的中尺度模式预报效果,其次才是微尺度模式自身对高分辨率及更小尺度湍流运动的模拟能力。

(2)RMAPS-LES 能达到更高的时间分辨率,详细刻画大气中较小部分湍流运动特征。从风速脉动的概率密度分布情况来看,其在 10—12 时与观测表现出较大差异,呈现负偏态($S<0$)和较大的 K 值。随时间推移,午后逐渐接近正态分布, K 值也减小至与观测相似,表明与观测的平均值和标准差较为接近。

(3)入流边界条件在微尺度区域显示出巨大的能量赤字,未开启 CPM 方案时,受其影响至 12 km 处,大气湍流仍存在一定的不充分发展,到 18 km 处,才基本达到平衡。因此不同尺度模拟区域之间采用湍流生成方案以加速湍流的快速充分生成是非常必要的。

高分辨率数值预报是近几届冬奥会气象预测保障的关键核心技术。 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 水平网格距的 RMAPS-LES 赛区实时预报系统,面向北京冬奥会“百米级、分钟级”的气象服务保障需求,并可为其他高分辨率预报、模拟研究提供一种可行思路。未来,在风电厂微观选址、精细气象环境评估、森林火险、野外大型活动等气象保障服务中,也具有较好应用前景。

参考文献

邓国,戴玲玲,周玉淑,等,2022. CMA 高分辨区域集合预报系统支

- 撑北京冬奥会气象服务保障的评估分析[J]. 气象, 48(2):129-148. Deng G, Dai L L, Zhou Y S, et al, 2022. Evaluation and analysis of meteorological service for Beijing Winter Olympic Games supported by CMA High-Resolution Regional Ensemble Prediction System[J]. Meteor Mon, 48(2): 129-148 (in Chinese).
- 胡艺, 符娇兰, 陶亦为, 等, 2022. 冬奥会延庆赛区气象要素分布特征分析[J]. 气象, 48(2):177-189. Hu Y, Fu J L, Tao Y W, et al, 2022. Characteristics of meteorological elements over Yanqing Area during Winter Olympic Games[J]. Meteor Mon, 48(2): 177-189 (in Chinese).
- 孔凡超, 李江波, 王颖, 2021. 北京冬奥会云顶赛场微波辐射计反演大气温湿廓线分析[J]. 气象, 47(9):1062-1072. Kong F C, Li J B, Wang Y, 2021. Analysis on atmospheric profiles retrieved by microwave radiometer at Genting Venue of Beijing Olympic Winter Games[J]. Meteor Mon, 47(9):1062-1072 (in Chinese).
- 李嘉睿, 符娇兰, 陶亦为, 等, 2022. 冬奥会张家口赛区气温与风的特征分析[J]. 气象, 48(2):149-161. Li J R, Fu J L, Tao Y W, et al, 2022. Temperature and wind characteristic analysis in Zhangjiakou Olympic Area for the Winter Olympic Games[J]. Meteor Mon, 48(2):149-161 (in Chinese).
- 李炬, 程志刚, 张京江, 等, 2020. 小海坨山冬奥赛场气象观测试验及初步结果分析[J]. 气象, 46(9):1178-1188. Li J, Cheng Z G, Zhang J J, et al, 2020. Meteorological field experiment and preliminary analysis result in the Winter Olympic venue in Xiaohaituo Mountain[J]. Meteor Mon, 46(9):1178-1188 (in Chinese).
- 李军, 胡非, 王丙兰, 等, 2012. 风速的 Weibull 分布参数[J]. 太阳能学报, 33(10):1667-1671. Li J, Hu F, Wang B L, et al, 2012. Weibull parameters for wind speed[J]. Acta Energ Sol Sin, 33(10):1667-1671 (in Chinese).
- 李磊, 张立杰, 张宁, 等, 2010. FLUENT 在复杂地形风场精细模拟中的应用研究[J]. 高原气象, 29(3):621-628. Li L, Zhang L J, Zhang N, et al, 2010. Application of FLUENT on the fine-scale simulation of the wind field over complex terrain[J]. Plateau Meteor, 29(3):621-628 (in Chinese).
- 刘梦娟, 张旭, 陈葆德, 2018. 边界层参数化方案在“灰色区域”尺度下的适用性评估[J]. 大气科学, 42(1):52-69. Liu M J, Zhang X, Chen B D, 2018. Assessment of the suitability of planetary boundary layer schemes at “grey zone” resolutions[J]. Chin J Atmos Sci, 42(1):52-69 (in Chinese).
- 刘郁珏, 黄倩倩, 张涵斌, 等, 2022. 基于大涡模拟的冬奥赛区风环境精细化评估[J]. 应用气象学报, 33(2):129-141. Liu Y J, Huang Q Q, Zhang H B, et al, 2022. Refined assessment of wind environment over Winter Olympic competition zone based on large eddy simulation[J]. J Appl Meteor Sci, 33(2):129-141 (in Chinese).
- 刘郁珏, 苗世光, 胡非, 等, 2018. 冬奥会小海坨山赛区边界层风场大涡模拟研究[J]. 高原气象, 37(5):1388-1401. Liu Y J, Miao S G, Hu F, et al, 2018. Large eddy simulation of flow field over the Xiaohaituo Mountain division for the 24th Winter Olympic Games[J]. Plateau Meteor, 37(5):1388-1401 (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. Liu Y J, Miao S G, Liu 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, 30(1):70-81 (in Chinese).
- 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 Meteor Sin, 80(1):108-123 (in Chinese).
- 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]. Meteor Mon, 48(2):162-176 (in Chinese).
- 杨扬, 卢冰, 王薇, 等, 2021. 基于 WRF 的积云对流参数化方案对中国夏季降水预报的影响研究[J]. 气象学报, 79(4):612-625. Yang Y, Lu B, Wang W, et al, 2021. Impacts of cumulus parameterization schemes on the summertime precipitation forecast in China based on the WRF model[J]. Acta Meteor Sin, 79(4):612-625 (in Chinese).
- 张兆顺, 崔桂香, 许春晓, 2005. 湍流理论与模拟[M]. 北京:清华大学出版社. Zhang Z S, Cui G X, Xu C X, 2005. Theory and Modeling of Turbulence[M]. Beijing: Tsinghua University Press (in Chinese).
- Chow K F, Street R L, Xue M, et al, 2005. Explicit filtering and reconstruction turbulence modeling for large-eddy simulation of neutral boundary layer flow[J]. J Atmos Sci, 62(7):2058-2077.
- Chow F K, Wekker S F J D, Snyder B J, 2013. Mountain Weather Research and Forecasting[M]. Netherlands: Springer.
- Cuxart J, 2015. When Can a High-resolution simulation over complex terrain be called LES? [J]. Front Earth Sci, 3:87.
- Deardorff J W, 1972. Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers[J]. J Atmos Sci, 29(1):91-115.
- Fernando H J S, Mann J, Palma J M L M, et al, 2019. The Perdigão: peering into microscale details of mountain winds[J]. Bull Am Meteor Soc, 100(5):799-819.
- Jenkinson A F, Collison F P, 1977. An initial climatology of gales over the North Sea[C]// Synoptic Climatology Branch Memorandum, No. 62. Bracknell: Meteorological Office:1-18.
- Lilly D K, 1966. On the application of the eddy viscosity concept in the inertial sub-range of turbulence[R]. Boulder: National Center for Atmospheric Research.
- Liu Y B, Warner T, Liu Y W, et al, 2011. Simultaneous nested modeling from the synoptic scale to the LES scale for wind energy applications[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 99(4):308-319.
- Liu Y J, Liu Y B, Muñoz-Esparza D, et al, 2020. Simulation of flow fields in complex terrain with WRF-LES: sensitivity assessment

- of different PBL treatments[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 59(9): 1481-1501.
- Milovac J, Branch O L, Bauer H S, et al, 2016. High-resolution WRF model simulations of critical land surface-atmosphere interactions within arid and temperate climates (WRFCLIM) [C] // High Performance Computing in Science and Engineering. Stuttgart: Springer; 607-622.
- Mirocha J, Kosović B, Kirkil G, 2014. Resolved turbulence characteristics in large-eddy simulations nested within mesoscale simulations using the weather research and forecasting model[J]. *Mon Wea Rev*, 142(2): 806-831.
- Mirocha J D, Lundquist J K, Kosović B, 2010. Implementation of a nonlinear subfilter turbulence stress model for large-eddy simulation in the advanced research WRF model[J]. *Mon Wea Rev*, 138(11): 4212-4228.
- Moeng C H, Sullivan P P, 1994. A comparison of shear- and buoyancy-driven planetary boundary layer flows[J]. *J Atmos Sci*, 51(7): 999-1022.
- Muñoz-Esparza D, Kosović B, Mirocha J, et al, 2014. Bridging the transition from mesoscale to microscale turbulence in numerical weather prediction models[J]. *Boundary Layer Meteor*, 153(3): 409-440.
- Muñoz-Esparza D, Kosović B, van Beeck J, et al, 2015. A stochastic perturbation method to generate inflow turbulence in large-eddy simulation models; application to neutrally stratified atmospheric boundary layers[J]. *Phys Fluids*, 27(3): 035102.
- Muñoz-Esparza D, Lundquist J K, Sauer J A, et al, 2017. Coupled mesoscale-LES modeling of a diurnal cycle during the CWEX-13 field campaign; from weather to boundary-layer eddies[J]. *J Adv Model Earth Syst*, 9(3): 1572-1594.
- Rai R K, Berg L K, Kosović B, et al, 2017. Comparison of measured and numerically simulated turbulence statistics in a convective boundary layer over complex terrain[J]. *Boundary Layer Meteor*, 163(1): 69-89.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al, 2008. A description of the advanced research WRF version 3[R]. Boulder: University Corporation for Atmospheric Research.
- Talbot C, Bou-Zeid E, Smith J, 2012. Nested mesoscale large-eddy simulations with WRF: performance in real test cases[J]. *J Hydrometeorol*, 13(5): 1421-1441.
- Wyngaard J C, 2004. Toward numerical modeling in the “terra incognita”[J]. *J Atmos Sci*, 61(14): 1816-1826.
- Zhou B W, Simon J S, Chow F K, 2014. The convective boundary layer in the terra incognita[J]. *J Atmos Sci*, 71(7): 2545-2563.

(本文责编:戴洋)