

DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2026.01.010

# 基于非结构网格全球模式的南极大气数值预报模型及其应用

尹铁男<sup>1,2</sup>, 彭炜<sup>3,4\*</sup>, 赵一磊<sup>3,4</sup>, 施东生<sup>5</sup>, 杨炳良<sup>6</sup>, 马宏怡<sup>6</sup>, 张红波<sup>6</sup>

(1. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 国家能源海上风电工程与运行技术研发中心, 北京 102209; 3. 卫星海洋环境监测预警全国重点实验室(国家海洋环境预报中心), 北京 100081; 4. 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081; 5. 自然资源部南通海洋中心, 江苏 南通 226002; 6. 华能山东发电有限公司烟台发电厂, 山东 烟台 264002)

**摘要:** 基于非结构网格全球模式 MPAS-A, 研发建立了精细化南极大气数值预报模型。模型采用分辨率为  $0.25^\circ$  的 NCEP FNL 数据作为驱动, 可实现南极区域 72 h 时效、 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  分辨率的逐小时高时空分辨率气象预报。依托中山站全年地面站观测数据和中山冰雪机场夏季地面观测数据, 对 2023 年 11 月 1 日起为期一年的数值模拟结果进行检验分析。检验结果表明, 该数值预报模式在夏季(12 月—次年 2 月)的模拟效果优于冬季(3—11 月), 能较好地预报极地高压、绕极气旋等影响系统, 具备较高的可信度; 但模式对相对湿度的模拟结果偏差较大。此外, 结合中山冰雪机场地面保障和气象保障业务工作需要, 对模式结果进行释用, 开发了一系列针对航空保障的预报产品, 并为第 40 次、第 41 次南极考察期间“雪鹰 601”航空器和中山冰雪机场的运行提供气象保障服务, 获得航空作业队的认可。

**关键词:** 南极航空气象; MPAS-A; 非结构网格; 数值天气预报系统; 南极考察

**中图分类号:** P456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)01-0098-15

## 0 引言

南极作为全球气候系统的重要组成部分, 在大气循环、冰盖动态和海洋环流变化等多个领域发挥着至关重要的作用<sup>[1]</sup>, 对全球和区域气候变化具有显著影响<sup>[2]</sup>。南极大气数值模拟技术在研究下降风特征<sup>[3-4]</sup>、解析冰盖—大气能量平衡<sup>[5]</sup>、阐明对流层云分布特征<sup>[6]</sup>、分析南极近地表温度长期变化趋势<sup>[7]</sup>等方面均发挥了重要作用。

中国与南极门户国家的后勤合作已初步形成, 涵盖港口停靠、物资补给、人员交流和应急救援等领域, 但仍存在依赖性强、自主性不足等问题<sup>[8]</sup>。航空运输凭借高效快速的显著优势, 在时效性要求高的物资运输、人员调配及应急救援中发挥关键作用<sup>[9-12]</sup>。目前, 几大南极门户国家(如澳大利亚、阿根

廷、智利、南非等)正在大力推进南极航空基础设施建设, 为南极航空运输发展提供了重要支持<sup>[13]</sup>。各国依托自身数值预报技术和丰富的观测资料, 构建了有针对性的数值预报模式和航空保障体系: 美国依托国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)和国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC), 采用全球预报系统(Global Forecast System, GFS)和高分辨率快速更新系统(High-Resolution Rapid Refresh, HRRR), 融合实地观测和卫星数据, 为麦克默多站(McMurdo Station)、阿蒙森-斯科特站(Amundsen-Scott South Pole Station)等提供高精度航空气象服务; 澳大利亚通过南极局(Australian Antarctic Division, AAD)和气象局(Bureau of Meteorology)开发的高分辨率模式, 结合

收稿日期: 2025-04-24。

基金项目: 中国华能集团有限公司科技项目(HNKJ22-H132)。

作者简介: 尹铁男(1982-), 男, 工程师, 博士, 主要从事海上风力发电和可再生能源技术研究。E-mail: tn\_yin@qny.chng.com.cn

\*通信作者: 彭炜(1992-), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事全球和极地大气数值模式工作。E-mail: pengw@nmfnc.cn

凯西站(Casey Station)、戴维斯站(Davis Station)和莫森站(Mawson Station)的观测资料,为南极航空任务提供数值预报;英国南极调查局(British Antarctic Survey, BAS)则依托英国气象局(Meteorological Office, Met Office)统一模式(Unified Model)和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium - Range Weather Forecasts, ECMWF)数据,实现对罗斯拉站(Rothera Station)的航空数值天气预报;俄罗斯南极考察局(Russian Antarctic Expedition, RAE)发展了适配东方站(Vostok Station)气候特点的区域大气模式;智利阿图罗·普拉特基地(Arturo Prat Base)、阿根廷马兰比奥基地气象中心(Marambio Base Meteorology Center),结合南极半岛观测网络,采用区域高分辨率数值天气模型,开发了针对南极半岛及周边区域的航空数值预报产品;南非依托国家气象局(South African Weather Service, SAWS),使用本地化模式和卫星观测数据,为南非国家南极考察队(South African National Antarctic Expedition)和科考站的航空活动提供保障;新西兰则依托美国麦克默多站(McMurdo Station)气象中心,融合高分辨率模式及其科考站的现场观测数据,持续提升南极气象保障能力。

自2015年第32次中国南极科学考察开始,我国正式涉足南极航空运输领域,引入“雪鹰601”固定翼飞机承担南极科学考察和后勤保障任务<sup>[14]</sup>。相较于直升机,固定翼飞机具备更远航程和更大载重能力,可覆盖从海岸到内陆的广泛区域。2022—2023年,我国建成并启用了首座自主建设的南极雪道机场——中山冰雪机场(ICAO代码:ZSSW),这是我国南极航空保障能力的重要突破。该机场实现了气象保障、地面维护和运行管理等自主运行,标志着我国在南极航空保障领域迈出重要一步。南极航空不仅能够提升科研任务效率,还在应对气候变化、参与极地治理中占据战略高地;作为全球气候研究的重要力量,我国通过发展南极航空运输,强化了极地环境的综合研究能力和国际话语权<sup>[12,15]</sup>。

2022—2023年第39次南极考察期间,我国首次实现“雪鹰601”相关南极航空气象保障工作的自主化,可参考的气象数据包括中国中山站、泰山站等

科考站的观测资料、南极地区卫星云图以及ECWMF、美国南极中尺度预报系统(The Antarctic Mesoscale Prediction System, AMPS)等预报产品<sup>[16]</sup>。但此次考察中也暴露出一些局限性,尤其在中山冰雪机场及科考航线预报中存在“卡脖子”问题:一方面,国外气象预报产品的适应性难以完全满足中山冰雪机场的精细化预报需求,其时空分辨率难以充分保障航空作业任务;另一方面,长期依赖国外数据也可能受到技术封锁、数据延迟或国际关系变化的影响,进而威胁南极航空任务的安全性和稳定性。因此,提升南极航空气象预报能力、自主研发优化高分辨率数值模式、开发针对性航空保障预报产品,才能满足日益增长的南极航空保障需求。

当前南极地区大气数值模式研发面临多方面挑战,主要体现在南极环境特殊性、观测资料稀缺性、物理过程复杂性等方面;传统经纬度网格模式在极点会出现奇点,导致时间步长收缩,数值误差增大,且投影变形会导致空间梯度计算异常;此外,区域模式嵌套网格设置会导致变量在嵌套边界处突变。为解决这些问题,本文基于非结构网格全球大气模式——跨尺度预报模型(Model for Prediction Across Scales-Atmosphere, MPAS-A),开发了一套精细化南极大气数值预报模型,可实现南极区域72 h时效、 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 逐小时高时空分辨率的气象预报,并利用中国南极中山站观测数据对其模拟性能进行初步检验。结合南极航空保障需求,尤其是中山冰雪机场运行特点和现有航空运输需求,本文开发了一系列气象预报产品,旨在为提升我国南极航空气象保障能力提供新路径,同时为未来南极考察航空运输活动提供更科学的技术支持。

## 1 模式介绍和设置

本文采用MPAS-A v8.0.1,该模式由美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)和洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)联合开发,是一种全球非静力大气模式,采用基于球面质心Voronoi网格的C网格离散有限体积极力框架<sup>[17-18]</sup>。

相较于传统结构化网格模式,MPAS-A模式的优势在于:其使用非结构化球面质心多边形网格

(Spherical Centroidal Voronoi Tessellations, SCVT), 该网格支持基于点密度函数的任意区域局部加密, 可在维持全球动力场一致性的前提下, 满足局地高分辨率模拟需求(变分辨率网格示意图1); 有效解决了传统网格模式在南极点存在的奇异问题; 作为全球模式, 其积分过程无需依赖侧边界场, 仅需起报时刻的再分析数据驱动即可运行; 并行计算能力友好, 非结构网格更便于多核计算任务分配, 大幅提高运行效率。此外, MPAS-A 模式整合了多种先进的物理过程参数化方案, 具备强大的多尺度模拟能力, 已在全球气候研究、数值模拟等领域得到广泛应用<sup>[19-22]</sup>。Lui 等<sup>[19]</sup>利用变分辨率网格的 MPAS-A 模式和嵌套网格的 WRF 模式, 对登陆中国南部的历史台风个例开展模拟, 结果表明两种模式均能合理捕捉台风移动路径, 但对台风强度存在普遍低估现象; 值得注意的是, 仅依靠初始场驱动的 MPAS-A 预报模式, 其模拟性能与基于 ERA-interim 动态降尺度的 WRF 模式相当, 甚至更优。

本文采用 MPAS-A 变分辨率网格, 水平分辨率为 60~10 km(见图 1a)。该网格在全球范围采用 60 km 的较粗分辨率进行模拟, 而在研究重点区域(即南极洲)则逐渐加密到 10 km 以下, 以捕捉局地气象过程。图 1a 中等值线圈定范围表示分辨率细化至对应数值公里, 本研究采用的变分辨率网格实际最小分辨率可达 7.49 km。与传统嵌套网格区域模式(如 PolarWRF)需要依赖边界条件相比, MPAS-A 的变分辨率网格避免了边界条件不连续性问题。MPAS-A 模式的垂直坐标系采用地形追随坐标, 本

研究构建的预报系统在垂直方向共设置 50 层, 图 1b 为中山冰雪机场所在经度的垂直剖面, 展示了低层各垂直层海拔高度随纬度的变化情况。考虑到航空器飞行高度主要集中在 5 km 以下, 本文对低层模式层进行加密处理, 以提升模式在航空预报高度的模拟准确性, 模式层顶高度设置为 30 km。

模式选取的参数化方案为: 微物理过程 WSM6 方案, 长短波辐射 RRTMG 方案, 边界层过程 YSU 方案, 积云对流 Grell-Freitas 方案, 表层过程 Monin-obukhov 方案。模式初始场采用分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  美国国家环境预报中心最终运行全球预报系统(National Centers for Environmental Prediction-Final Operational Global Analysis, NCEP-FNL)再分析资料, 当前系统尚未加入观测资料同化模块, 系统每日一次冷启动, 起报时刻为 12 时(世界时, 下同), 预报时效设置为 72 h。

模式输出结果的时间分辨率为 1 h, 这一高时间分辨率能够有效满足航空气象保障对预报快速更新、精度高的需求。由于模式采用非结构网格设计, 为便于后续诊断及下游模式的数据接入, 需对原始输出数据进行必要的后处理, 包括将水平非结构网格数据插值到等经纬度网格, 以实现数据的标准化和可视化。水平插值采用邻点方案重映射方法, 即对所有实型变量, 通过重心插值法处理以保障输出数据的连续性; 对于 MPAS-A 模式中基于网格单元的变量(如本研究涉及的 10 m 风场、2 m 气温等), 插值时从目标点所在 Delaunay 三角形顶点周围的 3 个网格单元中采样; 对于基于顶点和

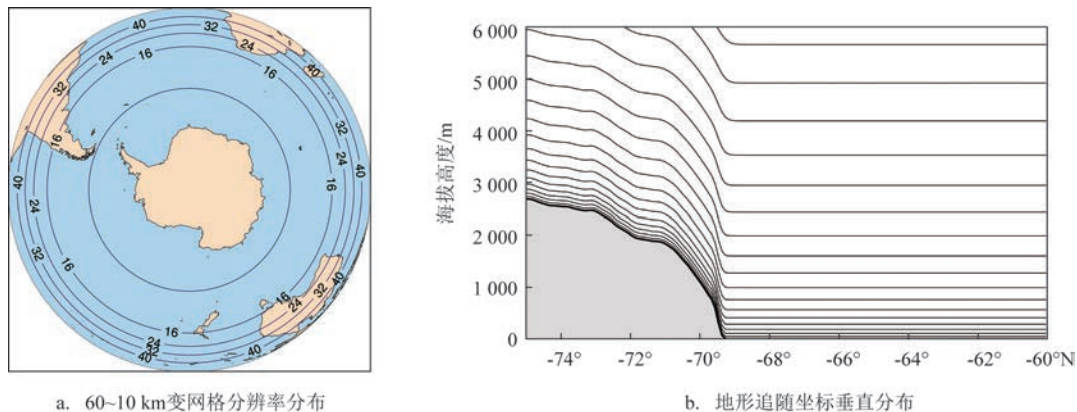


图 1 MPAS-A 模式水平和垂直坐标分布

Fig.1 Distribution of horizontal and vertical coordinates in the MPAS-A model

边的变量(如顶点科氏力参数等,本研究未涉及),则从目标点所在 Voronoi 网格单元中采样。最终,模拟结果被处理为水平分辨率 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的等经纬度网格数据;垂直方向上,将数据插值到特定的等压面(如 500 hPa、700 hPa、850 hPa、925 hPa 等),以满足不同等压面的气象分析和应用需求;同时提取特定关注区域或站点的插值数据(插值方法同上),为局地超高分辨率的应用提供数据输入。

## 2 南极航空大气数值预报系统结果初步检验

当前南极航空气象保障的实际需求主要集中在中山冰雪机场,但该机场的观测数据仅覆盖夏季(12月—次年2月)。基于此,本研究选取与机场距离相近的中国南极中山站,对模式模拟结果开展长时间序列检验,同时结合中山冰雪机场夏季观测数据开展检验。观测数据包括两部分:一是中国南极中山气象台 2023 年 11 月—2024 年 10 月的观测数据,二是中山冰雪机场 2023 年 12 月—2024 年 2 月的地面气象站观测数据。涉及的气象要素包括气温、相对湿度、气压、风速和风向。

### 2.1 基于中国南极中山站观测数据的检验

图 2 为在长时间序列下,MPAS-A 模式不同预报时效的模拟结果与实况观测数据的对比。从图 2a 中可以看出,模式在 72 h 时效内能够较好地模拟出海平面气压随时间的变化趋势,尤其在天气过程过境、气压出现明显波动的时段,模式可有效模拟出地面系统的变化;同时,随着预报时效的临近,模拟结果逐渐接近观测值。此外,模拟气压普遍高于观测值,说明模式虽能较好模拟出天气系统的移动和变化,但对低压系统(如绕极气旋、地形槽等)的强度模拟偏弱,而对高压系统(如极地高压)的强度模拟偏强。图 2b 为不同预报时效下 2 m 气温模拟结果和观测值的时间序列对比。整体来看,模式较好地再现了气温的季节性变化和日际波动特征,尤其在气温变化较为平稳的时段,预报结果与观测值较为一致。值得关注的是,在南极夏季(12月—次年2月)期间,模拟气温虽符合观测的波动趋势,但普遍低于实测温度。这一偏差可能与夏季中山站区的下垫面变化相关:夏季冰雪消融导致下垫面从冰雪变为砂石,进而引起下垫面反照率、陆面热量通量和粗糙度的变化,从而造成模式结果和观测值

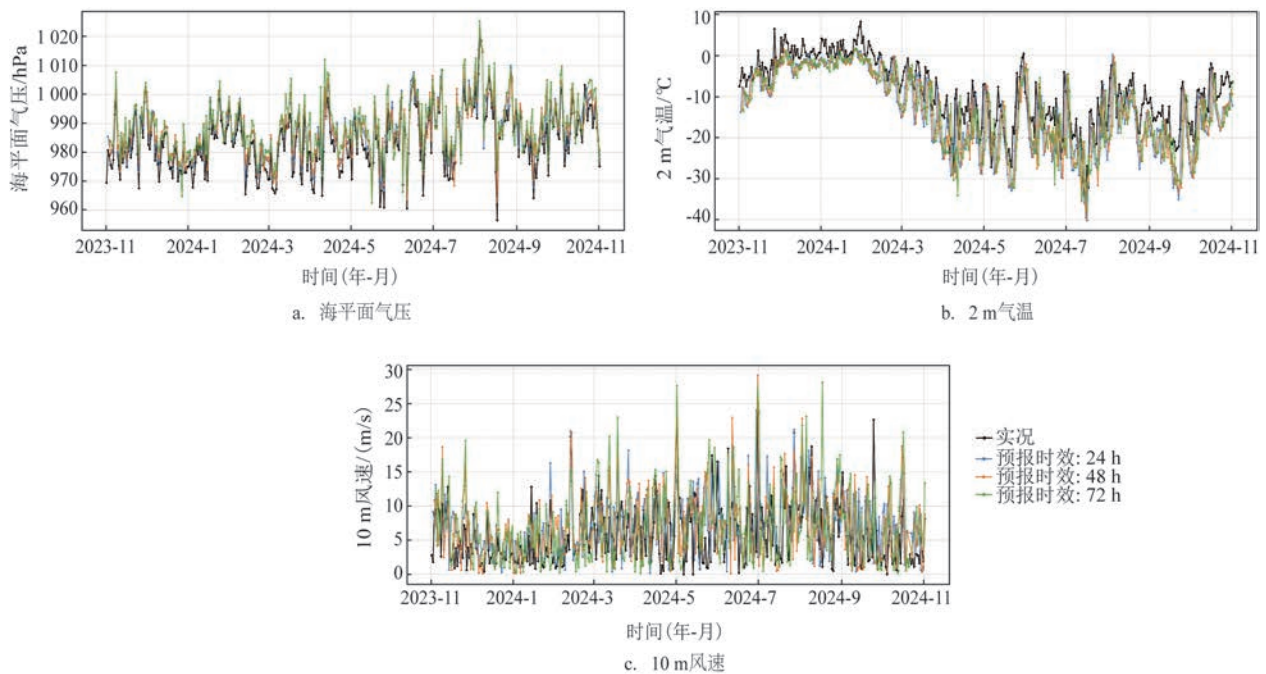


图 2 模式在不同预报时效下中山站模拟结果和观测的时序分布情况

Fig.2 Time series comparisons of model simulations versus observations at Zhongshan Station for different forecast lead hours

的差异。图2c展示了不同时效下10 m高度风速模拟结果与观测数据的时间序列对比。总体来看,模式能较好地再现风速的时变特征,能够捕捉风速的主要变化趋势,尤其在较低风速时段,模式模拟与观测值较为一致。然而,在较大风速过程中,模式误差相对较大,尤其是72 h预报时效下,模式对个别强风事件的风速模拟存在一定程度的高估。

为定量分析模式模拟的准确率,本文按月份计算了各变量在不同预报时效下的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)与平均误差(Mean Error, ME),结果见图3、图4。从图中可以看出,2 m气温方面,模式的模拟性能在夏季(12月—次年2月)明显优于冬季(3—11月),夏季72 h预报的RMSE最大为4.09 °C,且随预报时效的延长,误差增幅不明显;而3月起气温RMSE突然增大,即使24 h预报的误差也达到6.06 °C,且RMSE随预报时效的延长明显增大。结合ME的统计结果,模式对气温出现低估,存在一定的系统性偏差。海平面气压方面,24 h预报时效下,其RMSE最小值为1.32 hPa

(12月)、最大值为2.84 hPa(8月),相关系数稳定在0.98以上,其中1月相关系数为0.991;72 h预报时效下, RMSE最小值为3.54 hPa(1月)、最大值为6.92 hPa(5月)。由折线图可以看出,该变量RMSE随月份变化波动不明显,但冬季误差略大于夏季,且误差随预报时效延长而增大。结合ME结果,模式对海平面气压存在高估情况,这与前文所述模式对天气系统强度模拟偏弱的结论一致。10 m风速的误差计算和分析结论相似,夏季(12月—次年2月)各预报时效下的RMSE均最小,冬季(3—11月)误差偏大。24 h预报时效下,风速RMSE最小值为2.22 m/s(12月)、最大值为7.02 m/s(6月);结合ME统计结果,模式对风速整体表现为高估。这里需要注意的是2 m相对湿度(见图3b),模式结果和实况存在较大的偏差,24 h预报时效下, RMSE最小值为16.42%(4月)、最大值为25.8%(12月);结合ME的统计结果,模式对相对湿度存在明显高估和系统性偏差,这可能是由于模式物理过程参数化方案的设置导致的。

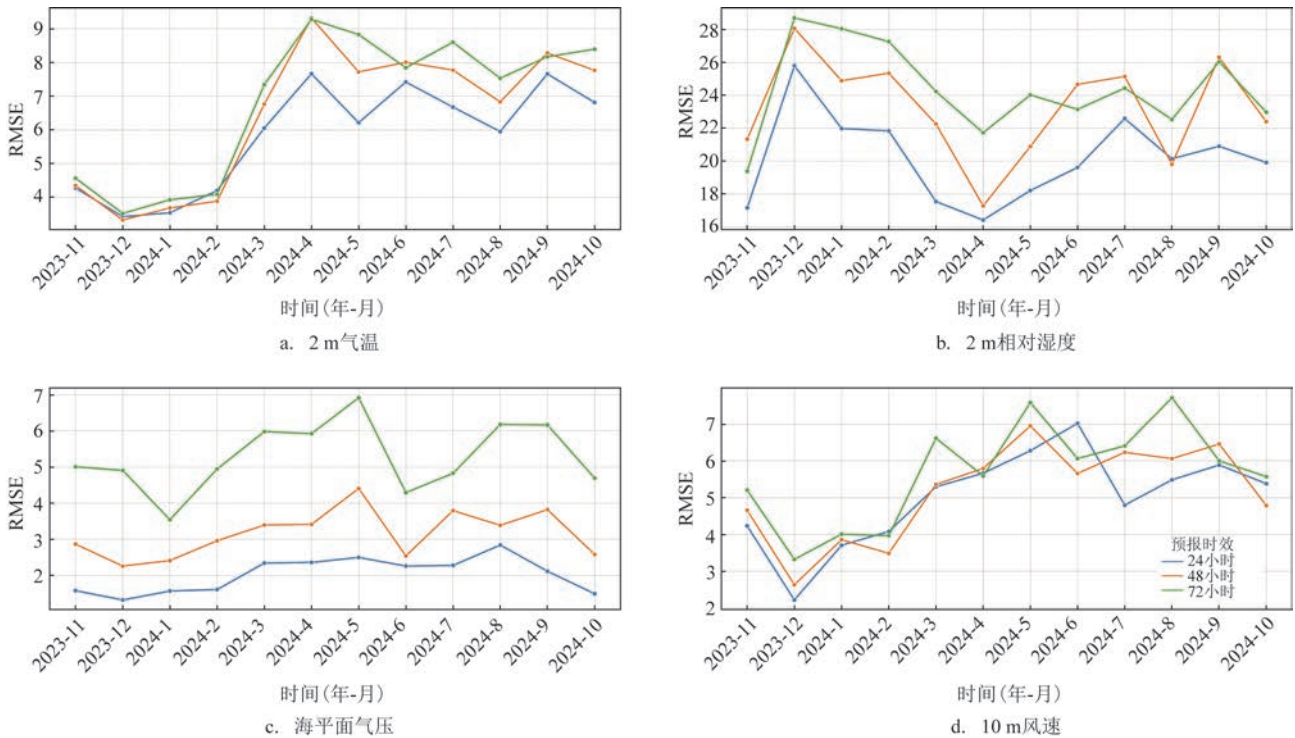


图3 不同预报时效下中山站各变量模式结果和实况的均方根误差随月份的变化

Fig.3 Monthly variations of Root Mean Square Error between model results and observations at Zhongshan Station across different forecast lead hours

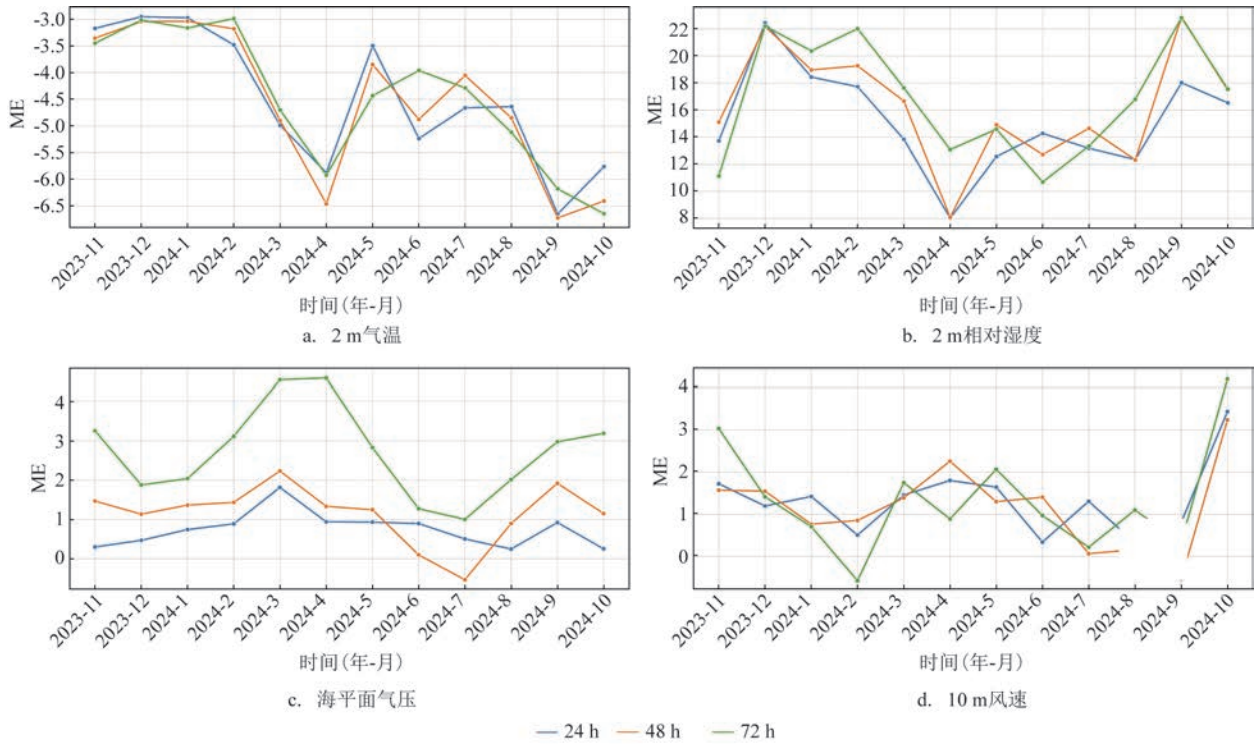


图4 不同预报时效下中山站各变量模式结果和实况的平均误差随月份的变化

Fig.4 Monthly variations of Mean Error between model results and observations at Zhongshan Station across different forecast lead hours

图5a—5c分别反映了24 h、48 h和72 h预报时效下,模式模拟风速和实测风速的散点分布特征。理想状态下,数据点若沿对角线( $y=x$ )分布,表示模式模拟值与观测值完全一致;实际数据点的离散程度和分布特征反映了模式的系统性偏差和误差特征。图中颜色表示某一区间内数据点的相对频率,红色区域表示该风速范围内模式与观测的匹配度较高、数据点集中,蓝色区域表示数据较分散、匹配度较低。从图中可以看出,风速数据的高频分布区域集中于低风速段(小于4 m/s),这也是模式和观测数据的主要分布范围;且模式对低风速的模拟存在系统性高估,这种高估效应反而随预报时效的延长而减小。从离散度来看,随着预报时效的增加,数据点的偏差程度和离散性均有所上升。总体而言,模式模拟风速和实测风速对应关系较好,但在低风速范围存在一定的高估,这可能与模式下垫面分辨率较低、无法较好地描述地形对风场的抑制作用有关,同时也受物理过程参数化方案的影响,具体原因值得在后续研究中深入研究和改进。

由于在风速较小时,风向易受局地湍流、观测

误差等因素影响而表现出较强不稳定性,因此在统计风向误差时,仅选取4级及以上风(风速 $\geq 5.5$  m/s)的样本进行分析,以减少低风速下随机波动对整体评估结果的影响。图6展示了模式对主导风向的模拟能力,分别对应24 h、48 h和72 h预报时效的散点分布。从图可见,绝大多数数据点集中在 $90^\circ$ 附近,表明主导风向为偏东风且相对稳定,该风向也是模式结果与观测值一致性较高的区域。随着预报时效的延长,数据点离散程度略有增加,说明模式在较长预报时效下,风向模拟误差有所增大,总体来看,模式能够很好地再现风向分布特征。

为评估模式对极端事件的统计特征,量化观测与模拟数据的差异,本文分别对2 m气温、海平面气压、10 m风速进行广义极值(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)分布统计和概率密度函数(Probability Density Function, PDF)分析,结果见图7—9。各图分别对应24 h、48 h和72 h预报时效,蓝色柱状、红色柱状分别表示观测数据、模式模拟数据的极端变量概率密度分布;同时采用GEV分布对观测数据(蓝色实线)、模拟结果(红色虚线)进行拟

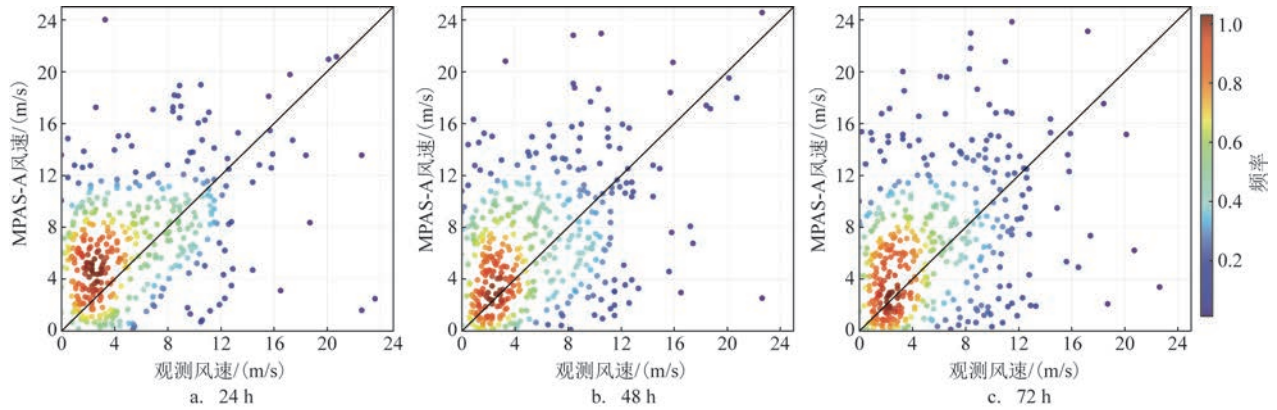


图5 中山站模式10 m风速和观测风速在不同预报时效下的散点概率分布

Fig.5 Probability density distributions of model results versus observation on 10-m wind speeds at Zhongshan Station across different forecast lead hours

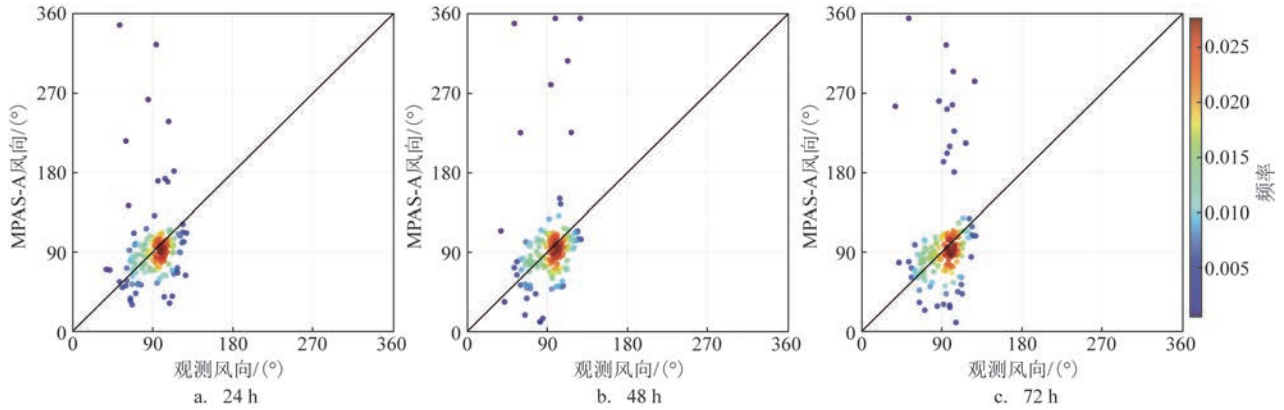


图6 中山站模式风向结果(4级及以上风速)和观测风向在不同预报时效下的散点概率分布

Fig.6 Probability density distributions of model results versus observation on 10-m wind direction (whose wind speeds >= Beaufort Force 4) at Zhongshan Station across different forecast lead hours

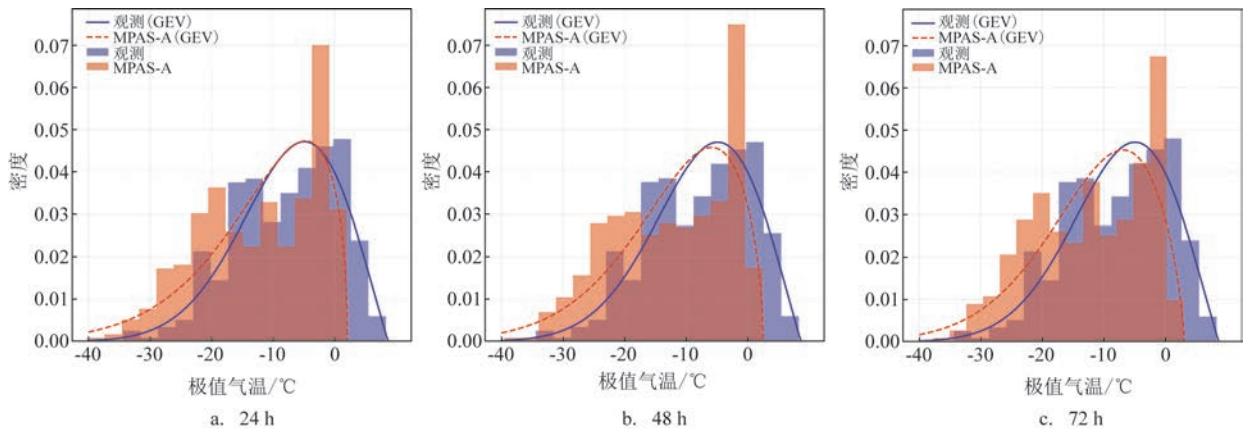


图7 中山站2 m气温的广义极值分布统计和概率密度函数分布

Fig.7 Parametric Generalized Extreme Value Distribution fits and non-parametric Probability Density Function estimates for 2-m air temperature at Zhongshan Station

合。从2 m气温分析图中可以看出(见图7),模式对气温概率分布的整体模拟趋势和观测数据基本一致,但GEV拟合曲线显示,模式对低温极端值存在一定程度的高估,即模拟气温普遍明显偏低,尤其在48 h和72 h预报时效下,低温极端事件的模拟分布较观测数据更加集中,且概率密度最大值对应的气温值也低于观测值。

从海平面气压分析图中可以看出(见图8),模式对海平面气压的模拟结果和观测接近,这也与图2的结果保持一致,进一步证明模式对气压的模拟能力较好。从概率分布直方图中可以看出,在24 h预报时效内,在气压概率峰值以下,模拟气压值较观测值偏低;但在概率峰值以上,模式结果和观测

值较一致。在48 h和72 h预报时效下,模式对海平面气压的模拟结果普遍较观测偏大。这表明,模式虽然可以较好地捕捉到天气系统的分布规律,但对其强度的模拟存在一定差异,普遍低估了低压系统的强度。

从10 m风速的PDF和GEV拟合结果可见,观测风速的概率峰值主要集中在0~4 m/s,在高速(>15 m/s)范围,概率密度快速下降,表明研究区域极端大风事件的发生概率较低。模式对风速概率分布的整体模拟趋势和观测值相似,但在低风速(0~4 m/s)范围内,模拟结果略有低估,且模拟风速的概率峰值对应风速约为6 m/s,较观测值偏高;在较高风速(10~15 m/s)范围,模式结果的概率密度普遍

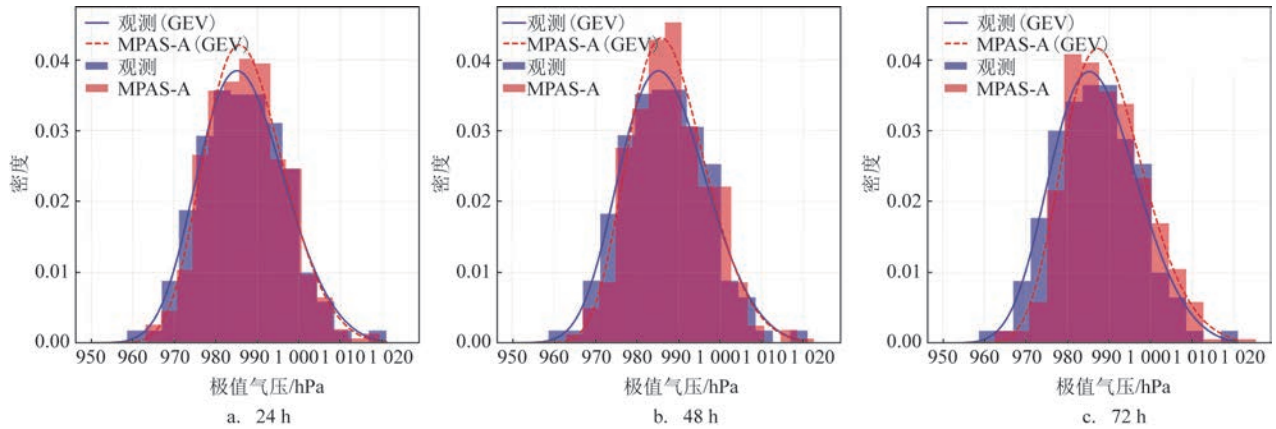


图8 中山站海平面气压的广义极值分布统计和概率密度函数分布

Fig.8 Parametric Generalized Extreme Value Distribution fits and non-parametric Probability Density Function estimates for sea level pressure at Zhongshan Station

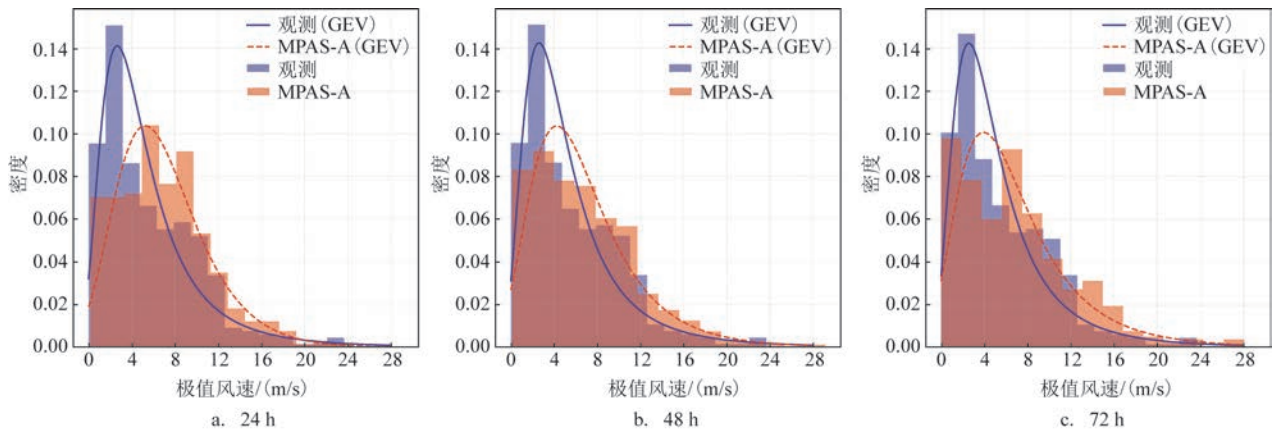


图9 中山站10 m风速的广义极值分布统计和概率密度函数分布

Fig.9 Parametric Generalized Extreme Value Distribution fits and non-parametric Probability Density Function estimates for 10-m wind speed at Zhongshan Station

高于观测值,表现为对风速的普遍高估。这一偏差可能和中山站区域的地形影响有关,而模式多用的地形数据精细程度不足,导致10 m风速模拟结果偏大。

### 2.2 基于中国南极中山冰雪机场观测数据的检验

图10和图2意义相同,只是观测数据为中山冰雪机场地面自动气象站的观测数据,且由于观测资料有限,图10中时间序列较短,只展示了2023年12月—2024年2月中山冰雪机场的海平面气压、2 m气温和10 m风速的观测值与不同时效预报结果的时间序列对比。从图10a中可以看出,数值模式预报的海平面气压和实测数据之间具有较高的一致性,尤其是在气压突升或突降的过程中,预报曲线可以较好地模拟出海平面气压的变化趋势。根据误差统计结果,24 h预报时效下12月、1月、2月的RMSE分别为2.42 hPa、2.38 hPa、3.15 hPa,模拟结果较观测值呈负偏差;各月RMSE随预报时效的增长略有增加,但整体一致性较好,进一步证实模式可以有效捕捉天气系统过境过程,有效模拟出地面天气形势。从2 m气温的时间序列分布图中可以看出(见图10b),预报结果基本能够再现温度的整体变化趋势,但不同于中山站夏季的模拟结果,模式

在中山冰雪机场模拟的气温和观测值接近或略高于观测值。从误差统计结果也可以发现,24 h预报时效下12月、1月、2月的气温RMSE分别为1.09 °C、1.81 °C、2.71 °C,ME分别为-0.22 °C、0.05 °C、0.27 °C。2月,随着南极逐渐进入冬季,强天气过程开始频繁出现,当有明显冷空气侵入时,中山冰雪机场有显著的降温过程,但模式模拟的气温梯度较小,即模式对冬季冷空气降温过程的模拟能力一般。此外,对比不同预报时效的曲线可以看出,气温变化(如降温过程)存在一定滞后性,且随着预报时效的增长,这种滞后性越发明显。从10 m风速的时间序列分布图可以看出(见图10c),模式模拟的风速波动性较观测数据小,即在有系统性过程(如绕极气旋)影响时,模式能捕捉到该过程,但对高速极值的预报能力有限,模式结果和观测结果之间的误差较大。在实际保障过程中,需要预报员结合实况观测对模式结果进行订正,后续可通过机器学习(如XGBoost算法)对风速的预报结果进行订正。

由于南极风速对航空器的起落具有直接影响,因此对中山冰雪机场模式10 m风和观测风在不同预报时效下的散点概率分布进行可视化分析(见图11、12),图中各要素意义和图5、6相同,此处不再赘

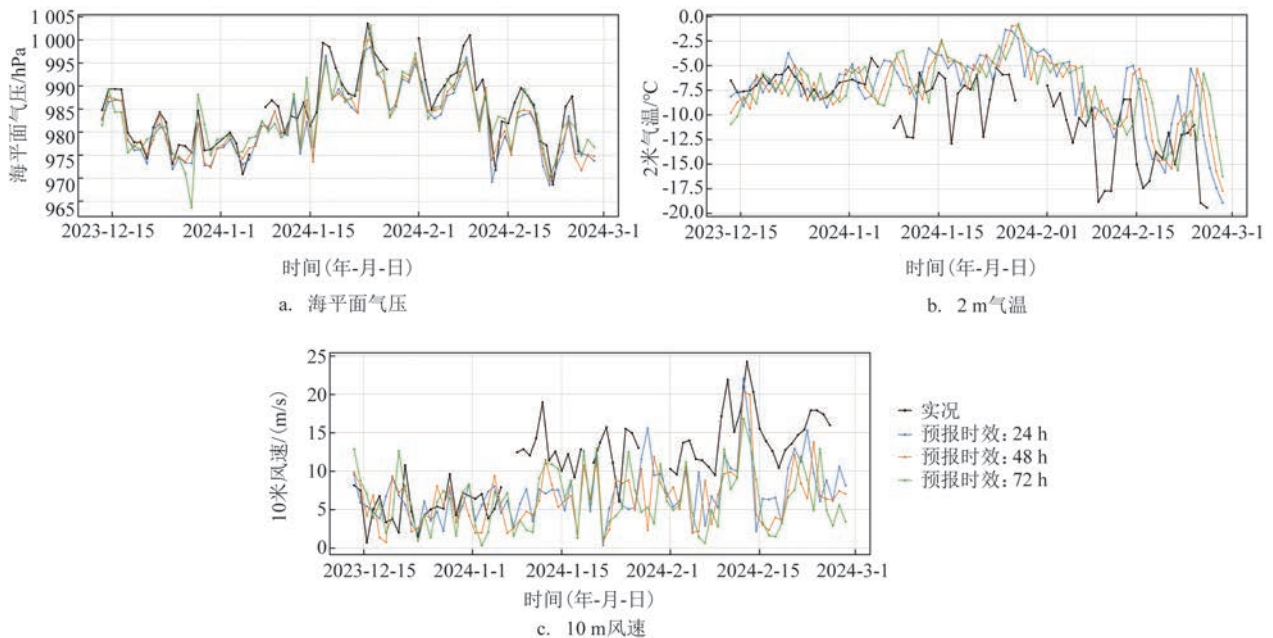


图10 模式不同预报时效下在中山冰雪机场的模拟结果和观测的时序分布

Fig.10 Time series comparisons of model simulations versus observations at Zhongshan Skiway for different forecast lead hours

述。从图 11 中可以看出,不同于中山站的风速特征,中山冰雪机场风速出现的高频区域位于中等风速(4~8 m/s)范围,模式对该区间风速的模拟略有低估,且这种低估随着预报时效的增加而加剧。图 12 展示了风速达到 4 级及以上( $\geq 5.5$  m/s)时风向的散点概率分布情况,绝大部分数据点集中在  $70^\circ \sim 110^\circ$  附近,说明模式对主导风向的模拟能力强,但随着预报时效的增加,风向误差的离散程度略有增加。总体来说,模式模拟的风速、风向和实测数据有较好的对应关系,能很好再现风场分布特征,但对强风过程和风向变化敏感区域的模拟精度仍有待改进。

### 3 模式结果在南极航空保障中的释用

南极航空运行具有极高的复杂性和风险性,受极端气象条件、复杂地形及气候变化的影响,气象保障在航空任务中起着决定性作用。特别是针对中山冰雪机场的航空保障需求<sup>[16]</sup>,气象预报产品需要高度精准,涵盖多尺度和多要素的气象信息,以支持飞行计划制定、起降条件评估以及飞行安全保障。结合第 39、40 次中国南极考察中山冰雪机场的航空气象保障需求,参考 AMPS 的产品形式,本文对南极航空大气数值预报系统结果进行精细化释用。图 13 展示的是一次绕极气旋过程影响中山冰

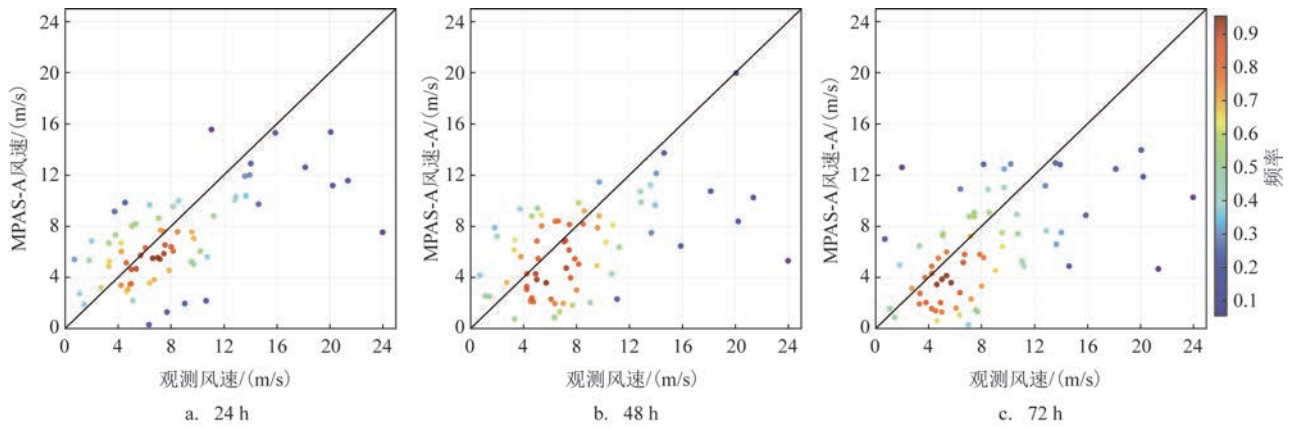


图 11 中山冰雪机场模式 10 m 风速和观测风速在不同预报时效下的散点概率分布

Fig.11 Probability density distributions of model results versus observation on 10-m wind speeds at Zhongshan Skiway across different forecast lead hours

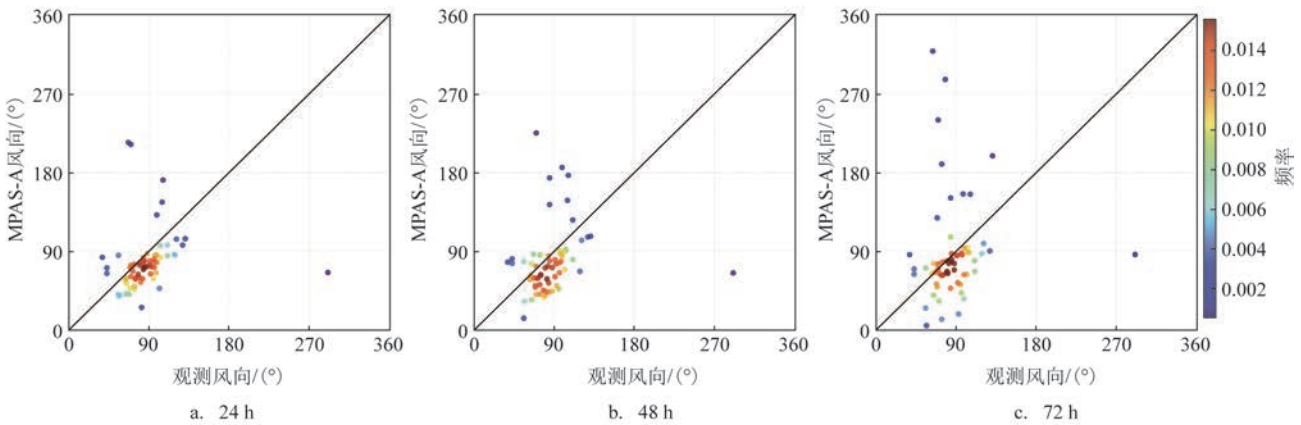


图 12 中山冰雪机场模式风向结果(4级及以上风速)和观测风向在不同预报时效下的散点概率分布

Fig.12 Probability density distributions of model results versus observation on 10-m wind direction (wind speeds  $\geq$  Beaufort Force 4) at Zhongshan Skiway across different forecast lead hours

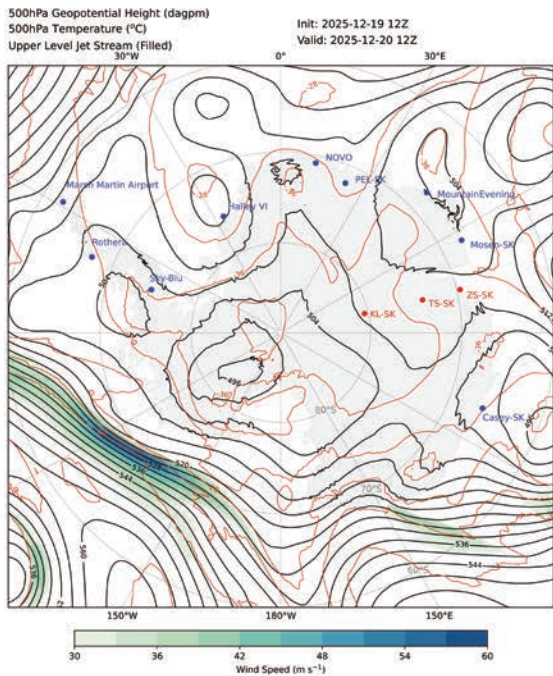
雪机场的天气个例。

南极地区高空形势场和急流产品(见图 13a):描述大气高空环流形势和高空急流特征,辅助保障人员判断高空天气形势、冷暖平流及变化趋势,同时为长距离飞行航线规划提供依据。

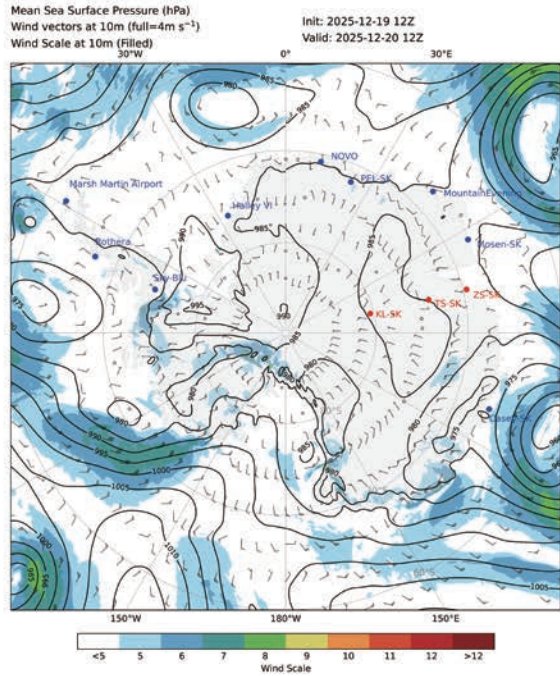
地面气压场和风场产品(见图 13b):描述大气地面形势和风场特征,直观给出关键机场的影响系统(如极地高压、地形槽、绕极气旋等)、5级以上大

风分布及其变化趋势,同时为关键机场起降窗口选择和地面运行调度提供依据。

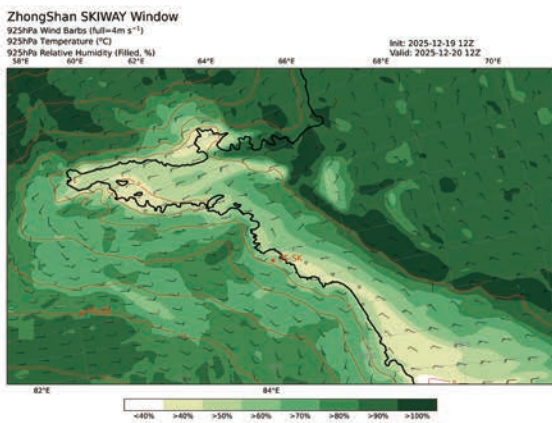
中低层普里兹湾温湿度场产品(见图 13c、13d):中低层大气的温湿度特征是飞行中至关重要的信息,其中 700~925 hPa 的水汽分布和风场信息能较直观地指示关键机场和飞行区域的中低云位置、厚度和移动情况,间接反应能见度、对比度甚至降水情况;水汽和温度形势可以评估飞机积冰风



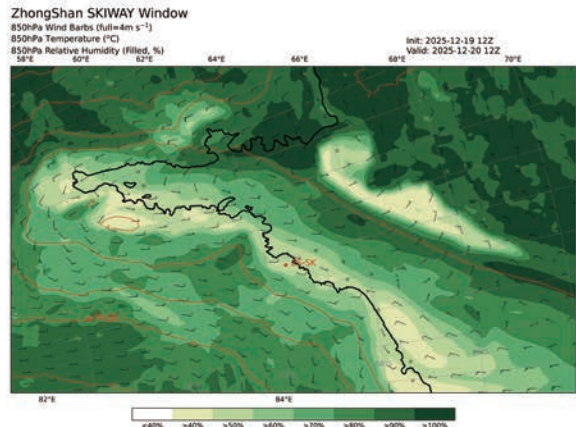
a. 南极地区高空形势场和急流产品



b. 南极地区地面气压场和风场产品



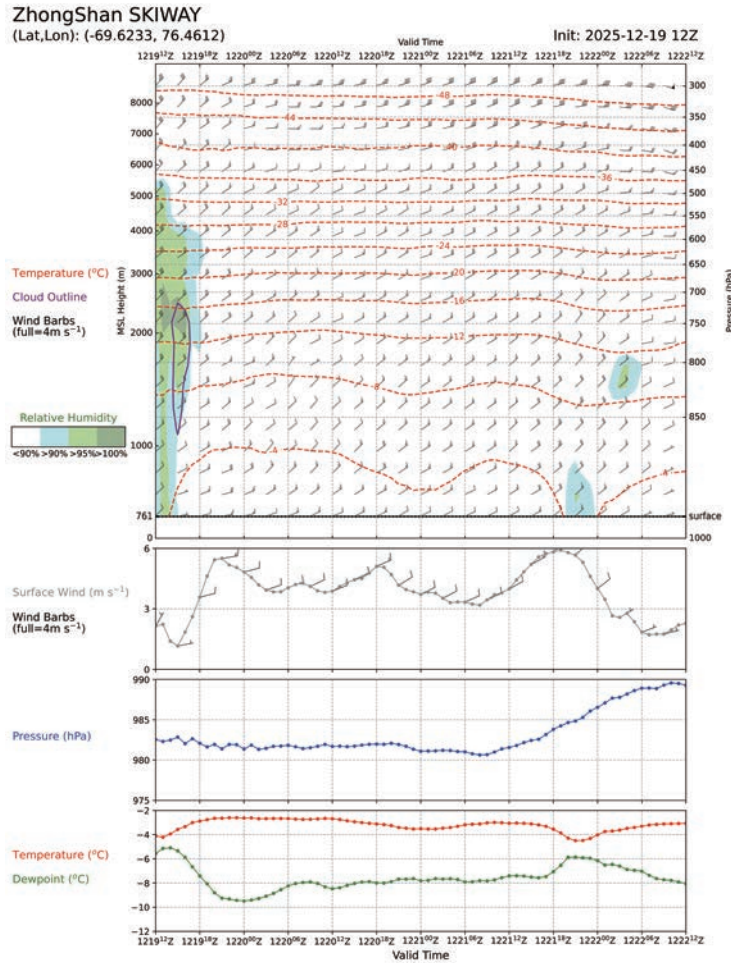
c. 925 hPa普里兹湾温湿度场产品



d. 850 hPa普里兹湾温湿度场产品

图 13 针对南极航空保障的模式结果释用产品

Fig.13 Operational applications of postprocessed model outputs for aviation support in Antarctica



e. 关键机场的气象要素预报产品

图 13 (续)

Fig.13 (Continued)

险,为航空器爬升和下降阶段决策提供依据,同时为航空调查、直升机保障等低空飞行的航线规划和飞行风险提示提供支持。

关键机场的气象要素预报产品(见图 13e):包含关键机场单点的风场、温湿度场垂直廓线时间序列,以及地面风场、气压、温度和露点温度时间序列。从预报图中可以直观看到关键机场上空水汽分布、主导气流等情况。

针对航空气象保障开发的图形产品,能够显著提升南极航空气象保障业务能力。通过高低空图形产品可掌握高低空环流形势,单点的图形产品可以更直观呈现起降机场的天气变化趋势;结合高分辨率数值天气预报模式与定制化图形产品,可以提供更准确的气象信息,进而提升南极航空气象预报

能力。截至 2025 年 3 月,本文研发的预报模式和预报产品已为第 40 次和第 41 次南极考察航空作业队的固定翼飞机“雪鹰 601”飞行保障提供业务支撑。

### 4 总结与讨论

本文以南极航空气象保障的业务需求为出发点和落脚点,基于非结构网格全球模式 MPAS-A 研发建立了精细化南极大气数值预报模式。不同于传统网格,该模式采用球面质心的六边形网格,实现从全球尺度到区域尺度的连续过渡,避免嵌套网格配置带来的边界误差,同时消除极区误差,提高并行计算能力。目前该系统已实现业务化运行,每日启动 1 次,可完成南极范围内  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  分辨率、

72 h时效的逐小时高时空分辨率气象预报,并开发了一系列针对航空保障的预报产品。为评估模式结果的准确性和可靠性,本研究采用中国南极中山站(全年)和中山冰雪机场(夏季)的地面气象站观测资料,对模式结果开展检验分析,从定性和定量角度评估模式的预报能力。检验结果表明,模式具有较强的天气过程捕捉能力,对地面天气形势的模拟效果较好,能准确描述海平面气压和2 m气温的整体演变趋势和变化特征,基本可捕捉大风过程,但普遍低估风速极大值。针对中山冰雪机场的航空气象保障需求,本文对模式结果进行释用,开发了针对点(重点关注机场)和面(高低空形势场等)的图片、数据产品。这些产品已为第40次和第41次南极考察中固定翼飞机“雪鹰601”的飞行作业和中山冰雪机场的地面运行提供业务化气象保障,并得到南极考察队和航空作业队的认可。

极地气候独特、天气变化快、地形条件复杂、气象观测数据有限,是当前国际极地数值天气预报模式面临的普遍挑战<sup>[23]</sup>。在南极航空气象保障业务中发现,即使空间距离仅10 km的两个站点,同一时间的天气状况也会相差甚远。因此,提高数值模式的分辨率、提升模式地形数据的精细程度,对发展南极地区数值预报模式十分必要。此外,南极地区下垫面的特殊性和季节差异,以及其独特的气象环境和复杂的物理过程,都对数值天气预报模式提出了更高要求,现有物理过程参数化方案大多基于中纬度地区的观测与研究,直接应用于南极地区模拟可能会引起较大偏差。因此,开展非常规变量(如辐射等)的诊断分析、优化物理过程参数化方案、对模式结果进行高度修正,对完善南极地区数值预报模式十分必要。南极地区观测资料匮乏,实时接收南极各站点自动气象站数据、探空数据和卫星遥感数据更是艰难,因此通过资料同化提升模式初始场质量的难度较大。本研究计划未来利用已累计多年的观测资料,通过机器学习等智能方法对模式预报结果进行订正,以期提高模式预报准确性。最后,随着南极航空气象业务保障需求的日益增长,保障产品应进一步完善和丰富,如关注特定机场上空水平风场的垂直切变、优化航线上风场和云系的预报、改进云在保障产品中的表现形式等,为南极航空气象业务保障工作提供更为强大的支撑。

**致谢:**感谢中国气象科学研究院提供中国南极中山站地面气象站观测资料,感谢中国极地研究中心提供中国南极中山冰雪机场地面气象站观测资料。

#### 参考文献:

- [1] SCREEN J A, BRACEGIRDLE T J, SIMMONDS I. Polar climate change as manifest in atmospheric circulation[J]. *Current Climate Change Reports*, 2018, 4(4): 383-395.
- [2] TURNER J, BINDSCHADLER R, CONVEY P, et al. Antarctic climate change and the environment[M]. Cambridge, Scientific Committee on Antarctic Research, 2009.
- [3] 孙启振, 张林, 张占海, 等. 南极中山站夏季下降风数值模拟个例研究[J]. *海洋学报*, 2016, 38(3): 71-81.  
SUN Q Z, ZHANG L, ZHANG Z H, et al. Numerical simulation of summer katabatic wind at Zhongshan Station, Antarctica: a case study[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(3): 71-81.
- [4] 华洋, 王泓, 李煜斌, 等. 南极中山站夏季低层大气气温湿特征研究[J]. *高原气象*, 2025, 44(2): 311-322.  
HUA Y, WANG H, LI Y B, et al. Research on the characteristics of wind, temperature, and humidity in the lower atmosphere at Zhongshan station in Antarctica in summer[J]. *Plateau Meteorology*, 2025, 44(2): 311-322.
- [5] 杨堤益, 丁明虎, 邹小伟. 南极冰盖地表能量平衡的研究进展[J]. *极地研究*, 2021, 33(1): 99-114.  
YANG D Y, DING M H, ZOU X W. Advances in the study of surface energy balance on the Antarctic ice sheet[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2021, 33(1): 99-114.
- [6] BROMWICH D H, NICOLAS J P, HINES K M, et al. Tropospheric clouds in Antarctica[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(1): RG1004.
- [7] NICOLAS J P, BROMWICH D H. New reconstruction of Antarctic near-surface temperatures: multidecadal trends and reliability of global reanalyses[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(21): 8070-8093.
- [8] 单琰焱, 刘明. 新时期中国与南极门户国家的后勤合作及对策建议[J]. *太平洋学报*, 2023, 31(2): 81-94.  
SHAN Y Y, LIU M. Logistics cooperation between China and Antarctic gateway states in the new era and China's Strategies[J]. *Pacific Journal*, 2023, 31(2): 81-94.
- [9] BUDD L, ISON S. Air transport management[M]. New York: Routledge, 2017.
- [10] SCAMBOS T A, BELL R E, ALLEY R B, et al. How much, how fast?: a science review and outlook for research on the instability of Antarctica's Thwaites Glacier in the 21st century[J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 153: 16-34.
- [11] RODRIGUE J P. The geography of transport systems[M]. 5th ed. London: Routledge, 2020.
- [12] ZHANG L L, YANG J, ZANG J J, et al. Reforming China's polar science and technology system[J]. *Interdisciplinary Science*

- Reviews, 2019, 44(3-4): 387-401.
- [13] 肖紫寒, 艾松涛, 张汝诚. 南极航空网络现状及展望[J]. 极地研究, 2025, 37(2): 363-375.  
XIAO Z H, AI S T, ZHANG R C. Current status and prospects of Antarctic aviation network[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2025, 37(2): 363-375.
- [14] CUI X B, GREENBAUM J S, BEEM L H, et al. The first fixed-wing aircraft for Chinese Antarctic expeditions: Airframe, modifications, scientific instrumentation and applications[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2018, 23(1): 1-13.
- [15] 孙波, 唐学远, 肖恩照, 等. 南极机场冰雪跑道工程技术发展现状与展望[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 161-168.  
SUN B, TANG X Y, XIAO E Z, et al. Ice and snow runway engineering in the Antarctica: current status and prospect[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2021, 23(2): 161-168.
- [16] 赵一磊, 魏立新, 刘凯. 中国首次南极航空气象保障工作回顾及展望[J]. 海洋预报, 2024, 41(4): 110-117.  
ZHAO Y L, WEI L X, LIU K. Review and outlook of the first Chinese Antarctic aviation meteorological service[J]. Marine Forecasts, 2024, 41(4): 110-117.
- [17] THUBURN J, RINGLER T D, SKAMAROCK W C, et al. Numerical representation of geostrophic modes on arbitrarily structured C-grids[J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(22): 8321-8335.
- [18] RINGLER T D, THUBURN J, KLEMP J B, et al. A unified approach to energy conservation and potential vorticity dynamics for arbitrarily-structured C-grids[J]. Journal of Computational Physics, 2010, 229(9): 3065-3090.
- [19] LUI Y S, TSE L K S, TAM C Y, et al. Performance of MPAS-A and WRF in predicting and simulating western North Pacific tropical cyclone tracks and intensities[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 143(1): 505-520.
- [20] DONKIN P T, ABIODUN B J. Capability and sensitivity of MPAS-A in simulating tropical cyclones over the South-West Indian Ocean[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2023, 9(1): 527-542.
- [21] PENG W, ZHANG Y F, WANG Y, et al. A global coupled atmosphere-wave model system based on C-coupler2. Part I: model description[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2718: 012025.
- [22] PENG W, LI X, HAO S, et al. A global coupled atmosphere-wave model system based on C-Coupler2. Part II : preliminary results [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2718: 012026.
- [23] 孙启振, 丁卓铭, 沈辉, 等. 我国极地数值天气预报系统的初步建立与应用[J]. 海洋预报, 2017, 34(4): 1-10.  
SUN Q Z, DING Z M, SHEN H, et al. Polar numerical weather prediction system: preliminary establishment and application[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(4): 1-10.

## An Antarctic atmospheric numerical prediction model and its applications based on a global unstructured-grid framework

YIN Tienan<sup>1,2</sup>, PENG Wei<sup>3,4\*</sup>, ZHAO Yilei<sup>3,4</sup>, SHI Dongsheng<sup>5</sup>, YANG Bingliang<sup>6</sup>, MA Hongyi<sup>6</sup>, ZHANG Hongbo<sup>6</sup>

(1. China Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China; 2. National Energy R&D Center of Offshore Wind Power Engineering and Operation, Beijing 102209, China; 3. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 4. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 5. Nantong Ocean Center, Ministry of Natural Resources, Nantong 226002, China; 6. Huaneng Shandong Power Generation Co., Ltd. Yantai Power Plant, Yantai 264002, China)

**Abstract:** Based on the global non-hydrostatic Model for Prediction Across Scales-Atmosphere (MPAS-A) with an unstructured grid framework, this study developed a refined atmospheric numerical prediction system for Antarctica. Driven by the NCEP Final (FNL) Operational Global Analysis data at  $0.25^\circ$  resolution, the system achieves 72-hour forecasts over Antarctica with a high spatiotemporal resolution ( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  grid spacing, hourly). Validation covering a one-year simulation starting from 1 November 2023 was conducted against year-round surface observational data from Zhongshan Station and summertime observational data from Zhongshan Skiway. The model demonstrates superior performance in summer (December-February) compared to winter (March-November). It reliably predicts critical polar meteorological systems with high credibility, including polar high-pressure systems and circumpolar cyclones. Larger biases persist in the simulated relative humidity

compared to observations. For operational aviation support at Zhongshan Skiway, this study developed specialized forecasting products based on post-processing model outputs. With operational effectiveness acknowledged by aviation teams, these products have provided critical meteorological support for flight operations of "Snow Eagle 601" aircraft during the 40th and 41st Chinese Antarctic Research Expeditions.

**Key words:** Antarctic aviation meteorology; MPAS-A; unstructured grids; numerical weather prediction system; Chinese Antarctic Research Expeditions