

2022年北京冬奥会山地气象观测系统建设与应用

■ 秦彦硕 宋巧云 梁丰 范雪波 常晨 李林 陈婧 韦涛 崔炜 张治国 张鹏 程志刚 陈羿辰

为满足2022年北京冬奥会高山滑雪等山地赛事对气象观测高时空精度和高稳定性的要求，北京市气象局组织建立了覆盖延庆赛区的三维、秒级、多要素、靶向协同冬奥气象观测系统，开展了适应山地赛场条件的观测设备技术改造，制定了冬奥气象数据格式规范、质量控制流程和应急备份措施，开发了赛事专用天气实况产品等一系列山地气象观测系统建设和应用技术研发工作，有效支撑了冬奥气象保障圆满成功，也为山地赛事气象观测业务技术提供了经验。

中图分类号：P4

文献标志码：A

DOI：10.3969/j.issn.2095-1973.2024.03.011

天气是影响冬奥会赛事运行的决定性因素之一，赛事安排与赛场天气状况密切相关，其中冬奥会金牌占比70%的雪上项目主要在地形复杂山区举行。山区的复杂地形会从动力和热力两个方面对大气产生影响，形成诸如山谷风环流、背风坡大风、地形云和降水等山区特殊高影响天气。而山区又往往是气象业务观测网的薄弱环节，站点稀少、运维困难、缺乏长序列观测数据，数值模式对山地区域的预报能力也普遍低于平原地区，这些都给冬奥会气象保障带来巨大挑战。为此，历届冬奥会主办方的气象团队均会在赛场周边补充建立精细化气象监测设备，开展加密观测试验。2010年温哥华冬奥会，加拿大环境部利用赛场周边近100个气象站、X波段雷达、测风仪等组成立体气象监测网，针对山区暴雪等敏感气象条件，部署雪密度、雪图像等多种特殊气象仪器开展冬季连续观测试验。2014年索契冬奥会，俄罗斯水文气象中心在赛场周边专门建设了38个自动站，除常规气象观测外，还布设与冬奥密切相关的能见度、雪深、辐射等特殊气象要素观测，在前期数据分析基础上，实现了分钟到小时间隔的冬奥特殊气象监测数据服务。2018年平昌冬奥会，韩国气象厅提前3年成立“气象观测网建设TF小组”，在赛场内外部署10类107台设备构建稠密立体观测网，提高赛场及周边气象探测能力。

2022年北京冬奥会是冬奥历史上唯一一届在大陆性冬季风主导的气候条件下举办的冬奥会，因此大风、低温、暖湿融雪、降水和低能见度等天气的影

响需要特别关注。北京冬奥延庆赛区位于小海陀山区域，该区域的主体山脉海陀山的山脊整体呈南北走向，海拔最高点2198 m；延庆赛区位于山南，形状如一个向南开口的大喇叭，包含国家雪车雪橇中心、国家高山滑雪中心两个竞赛场馆，面积约4.5 km²，赛道最大垂直落差超过900 m。海陀山区地形复杂、局地小气候多变，赛场核心区历史气象观测空白，对局地气象要素特征知晓几近为“零”。根据冬奥组委及国际奥委会需求，北京市气象局自2017年开始每年度赛期同期，基于延庆赛区地面气象实时观测数据开展气象条件分析及风险评估，编制中英文版《北京2022年冬奥会和冬残奥会赛区气象条件及气象风向分析报告》。因此延庆赛区气象观测网建设要提前于水、电、路、网等赛场配套基础设施建设，这些都对气象观测站网布局设计、建设运维和数据传输应用提出了巨大挑战。

北京市气象局于2017年全面启动了延庆赛区冬奥气象综合观测系统建设，每年冬季组织开展加密观测试验。历时6年，通过不断完善布局、改进技术、优化流程、强化应用，北京市气象局最终建立起多要素、多手段、多尺度的综合气象观测平台，研发形成了三维、秒级/分钟级的精细化观测产品，为北京冬奥气象保障服务提供了强有力的基础业务支撑。本文将从观测站网布局设计、观测设备技术改造、观测数据规范和质量控制、观测产品研发和赛时应用效果等方面进行阐述。

收稿日期：2022年7月15日；修回日期：2023年2月16日
第一作者：秦彦硕（1985—），Email: qys122006@126.com
通信作者：梁丰（1972—），Email: liangfeng@bj.cma.gov.cn
资助信息：国家重点研发计划（2018YFF0300101）

1 延庆赛区多尺度气象观测网设计

赛事保障方建立一个以气象为核心的科学、全面、智能的综合观测网,将有力支撑智能化、个性化气象服务。北京市气象局组织对冬奥会及冬残奥会赛期同期延庆赛区多年气象资料统计分析,结果表明对赛事可能造成影响的天气类型主要有4个,一是易受来自西伯利亚干冷空气影响下,带来偏北大风和降温天气;二是来自极地、东北或偏西冷空气影响,造成降水天气;三是受到华北地区暖湿气团影响,同时配合偏西冷空气,易出现大雪甚至暴雪天气;四是受到偏南强劲且干燥的暖空气影响下,配合晴朗天空状况,导致赛区白天气温快速升高,伴有融雪风险。因此,北京市气象局以延庆赛区高山滑雪赛道为靶心,兼顾高影响天气系统主要来向和局地复杂地形对气象要素的影响等因素,开展观测网设计,参照Orlanski对不同尺度系统定义,统筹15类61套观测设备(表1),建设满足3种尺度的立体观测网(图1),满足延庆冬奥赛区中尺度(20~50 km)、小尺度(2~20 km)和微尺度(<2 km)不同区域、不同气象要素特征的监测需求。

表1 延庆赛区多尺度气象观测设备表

观测目标	观测设备	数量	仪器所在站点	所属监测网
水凝物垂直廓线	S波段天气雷达	1	海陀山顶	中尺度
	X波段天气雷达	3	张家口怀来、怀来东花园、延庆千家店	中尺度
	K波段微雨雷达	3	怀来东花园	中尺度
	Ka波段云雷达	2	闫家坪、张山营	小尺度
	X/Ka/W波段雷达	1	张山营	小尺度
	激光云高仪	3	西大庄科、闫家坪、张山营	小尺度
	雨滴谱仪	3	西大庄科、闫家坪、张山营	小尺度
	天气现象仪	1	西大庄科	小尺度
	全天空成像仪	1	闫家坪	小尺度
	温湿廓线	微波辐射计	7	怀来东花园、延庆站、佛爷顶
			西大庄科、闫家坪、张山营	小尺度
			竞技3	微尺度
垂直风场	大气辐射干涉仪	1	西大庄科	小尺度
	风廓线雷达	4	怀来东花园、延庆站	中尺度
			闫家坪、张山营	小尺度
	激光测风雷达	4	张山营	小尺度
			竞速3、竞速6、竞技1	微尺度
地面要素	自动探空仪	1	西大庄科	小尺度
	气象观测站	26	高山滑雪赛道、雪车雪橇赛道、长虫沟、小海陀、二海陀、西大庄科	微尺度

1.1 赛区周边中尺度监测网

赛区周边中尺度监测网以延庆赛区为中心,在周边20~50 km范围内构建覆盖海陀山南侧延怀盆地及东北山区。该监测网除了延庆区地面气象站,主要涉及5个观测站点,分别为河北怀来国家基本气象站及

怀来东花园站、延庆国家基本气象站、延庆佛爷顶国家基本气象站、延庆千家店站。

该监测网重点部署天气雷达和移动垂直遥感观测设备,为监测分析赛区周边中尺度天气条件变化提供支撑。其中,4部双偏振天气雷达(1部S波段及3部X波段)组网构成了第一道天气监测防线,既可动态监测赛区周边200 km范围降水天气系统的发生发展,又可实时监测低空垂直2 km高度下的小尺度对流;布局在延庆赛区西南—东南—东北方向的6部垂直遥感设备,实现对赛区周边大气温、湿、风及水凝物垂直廓线实时监测。

1.2 赛区小尺度监测网

赛区小尺度监测网以局地小气候监测为目标,在周边2~20 Km范围内选取西大庄科、闫家坪及张山营3个地点建设综合垂直观测站,构成了自西向东第二道天气监测防线,实现对地形云、山谷风等可能对赛区造成影响的小尺度天气和局地大气特征进行连续监测。

其中,该监测网部署多波段(X/Ka/W)云雷达、云高仪、雨滴谱等13部设备对局地云和降水宏微观特征(云高、云量、云水含量等)进行全面监测,利用风廓线雷达、测风激光雷达等获取山谷入口和山谷内风场特征,利用4部微波辐射计联合对延庆赛区的温、湿、水汽廓线开展实时监测。

1.3 赛道微尺度监测网

在核心赛区半径2 km内,微尺度监测网以高山滑雪赛道风的精细观测为重点,借助铁塔站点提供的供电通讯及场地条件,沿赛道建设26个多要素地面气象站、3部测风激光雷达、1部微波辐射计,开展对赛道点、线、面、体的全景式风温湿监测。

根据冬奥组委确定的赛道站点位置,北京市气象局观测保障团队沿赛道梯度建设多要素地面气象站,用来为高山滑雪、雪车雪橇场馆气象预报服务保障提供最核心观测数据支撑。鉴于赛道各站点水平距离较近,但垂直高度相差大,观测保障团队在赛道中部布设1部微波辐射计提供赛道温湿度场资料。为实现对高山滑雪赛场三维精细风场监测,选取高中低3个点位放置3部同型号的测风激光雷达,对半径范围2 km采取三机协同PPI/RHI扫描模式进行联合观测,反演得到赛区三维风场分布。赛时协同观测扫描模式为每10 min完成一次PPI+RHI扫描,即包含10个仰角的PPI和1个方位角的RHI扫描;联合赛道地面气象站观测,可提供时间秒级、空间10 m级的高分辨率风监测数据,精细把握风的变化特征。

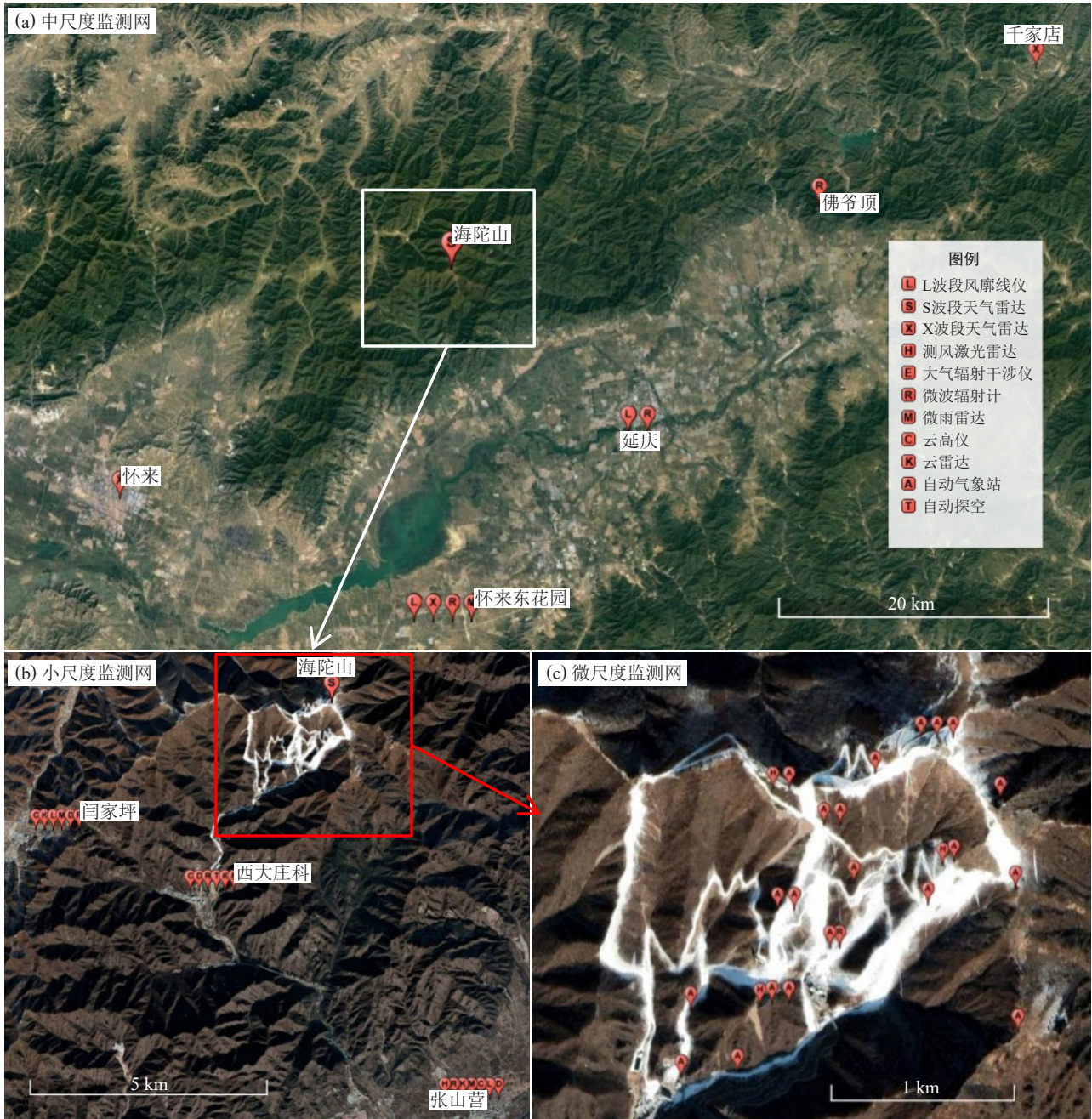


图1 延庆地区多维度立体监测网 (a和b中未包括该区域的自动气象站)

2 适应山地赛场条件的设备改造

在延庆赛区综合气象观测网建设过程中，遇到了很多困难。例如，在2020年测试赛期间，发现海陀山气象站点传统机械风在雨雪转换天气或造雪环境下易被冻结，造成核心要素风的观测数据缺失；因海陀山地区下垫面复杂，多为杂乱岩石构成的陡壁，自然环境恶劣，可用来建站的场地面积非常有限，增加要素时基础设施建设困难；当地供电、通讯基础设施薄弱，地面气象站十几种观测要素的稳定传输具有很大挑

战。为此，北京市气象局主要从以下五个方面对设备进行了改造。

2.1 同址布设加热超声风与传统机械风杯

为避免核心要素风的观测数据在机械风杯冻结时出现缺失，2021年初，观测保障团队联合设备厂家，在11个赛道站（竞速7个站、竞技3个站及西大庄科）增加布设加热超声风传感器，作为机械风杯的备份。对两种不同原理测的风观测数据进行详细分析后发现，风速处于4级以下时，二者观测数值相近，超声

风比机械风杯风速略偏小；但随着风速增大机械风与超声风差值逐步增大，平均差值一般处于2 m/s左右。经统计发现，从2021年11月—2022年3月中旬残奥会结束，赛道气象站机械风杯在冬季共计5次雨雪天气过程发生过冻结现象，其中11站次严重冻结（连续2 h及以上无数据）、8站次轻微冻结（连续无数据少于2 h或仅对测量数值造成轻微影响）。期间加热式超声风数据均运行正常，有效保障了赛事观测服务。

以2022年3月11—12日为例（图2），11日晚开始出现间歇性降雪，相对湿度上升。受降雪影响，机械风观测数据在22:50（北京时，下同）之后逐渐低于超声风风速；12日02:00左右，湿度维持在98%以上。当风速低于2 m/s之后，机械风观测数据趋于0，可推断机械风风杯冻结。在上述时段，超声风风速、风向均未受影响。

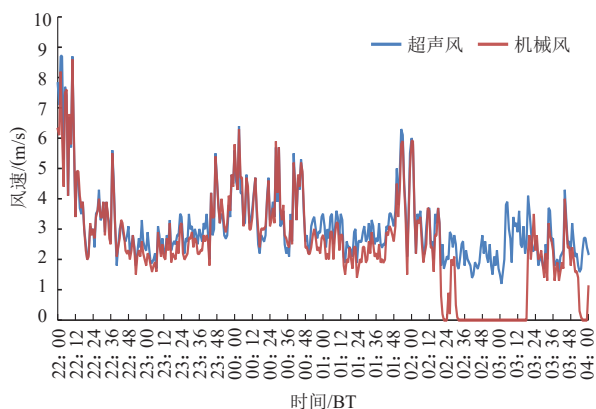


图2 2022年3月11—12日延庆赛区地面站观测的机械风与超声风

2.2 山地便携气象观测综合架

根据海陀山地形特点，突破常规观测业务中地面气象观测系统基础结构和建设方式，观测保障团队联合厂家共同设计新型山地便携气象观测综合架（图3）。一是将基础建设材料由混凝土改为钢结构，节省了15 d前期基础建设周期，提高了建设效率；二是17类传感器及配套设备实现快速抱杆组装，自动站整体占地面积从100 m²减少至16 m²，极大提高场地协调成本，便于站址迁移及后续要素扩展功能。

2.3 同站异电模式

受雨雪天气、地形等因素影响，山区冬季光照不足，因此太阳能无法支撑核心要素（温、压、湿、风）稳定供电。为解决部分站点多达17种气象观测要素的供电需求，结合气象站点、可获取的交流电（铁塔公司或北控造雪机供电系统）位置，观测保障团队采取“同站异电”模式，进行供电系统改造，分两种情况：

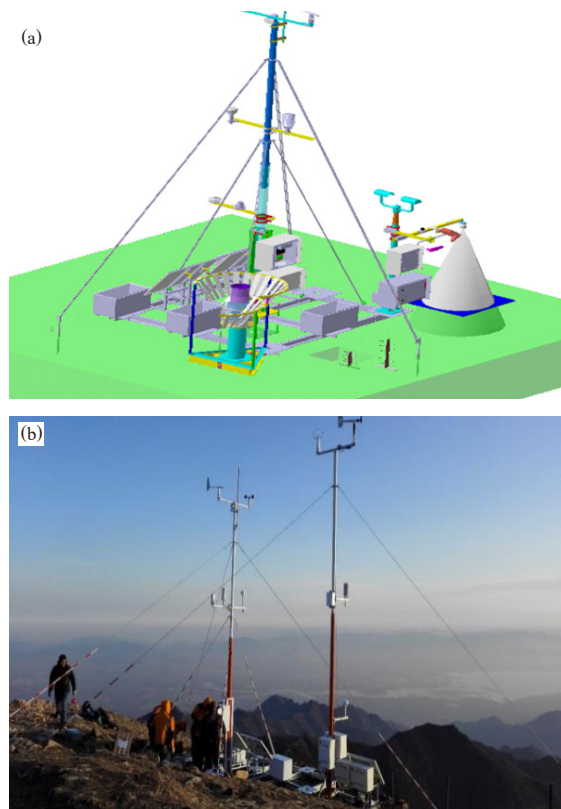


图3 延庆赛区钢架结构地面自动站模型图(a)和实景(b)

1) 对于可使用铁塔供电的站点，采取铁塔交流电及太阳能双路供电保障；2) 对于铁塔不能保障的站点，采取核心要素（温、压、湿、风）传感器独立挂载太阳能供电，其他拓展要素由北控造雪机供电系统挂载保障。在实际运行中，该模式有效确保了所有站点核心要素数据稳定传输、大部分站点所有观测要素数据实时传输；核心数据缺失问题因此得以改善。

2.4 北斗应急传输

在2014—2020年，延庆赛区基本没有4G通讯网络。在地面观测要素传输需求多、通讯不到位的前提下，为提升数据到报率，观测保障团队联合北斗设备厂家，在现有70 B的通讯传输能力下，梳理确定最关键要素清单，一方面压缩数据算法，缩短传输长度和降低分包次数；另一方面修改传输机制，完善通信采集端和中心站算法等手段，将北斗观测数据通信成功率由79.7%提高接近100%。2021年测试赛及冬奥会赛时观测数据采用北斗、4G双路通讯并行传输，保障了地面观测数据实时稳定传输。

2.5 自动站监控功能模块应用

在所有赛道站加装状态监控模块，一方面通过实时获取气象站运行状态信息、采集器自身供电电压状态、采集器存储芯片工作状态等信息，该监控模块

可提前并精准获取故障信息，提高设备维护能力；另一方面针对扩展要素多次增加、调整、格式变化等工作，观测保障团队联合厂家实现了远程程序升级、远程控制等功能，在疫情防控及交通不便的背景下，极大提高设备改造效率。

3 冬奥BUFR数据格式和数据质量控制

为满足来自冬奥组委、赛事保障及气象行业预报服务等各用户方对实时或历史气象资料服务需求，需解决一系列问题。例如，现有观测业务数据格式未涵盖冬奥新增的秒级风、分钟极大风、超声风、多种雪温等要素，造成冬奥大数据云平台及下游用户需解码多种不同格式文件；现有观测业务质量控制流程不适用于山地气象环境下的观测要素；冬奥气象公众服务网站要求赛道核心数据不中断的要求等。北京市气象局主要采取了三方面措施，具体如下。

3.1 制定冬奥BUFR数据格式规范

为实现所有冬奥观测数据格式统一、所有观测数据实时一次性传输至数据处理中心目标，北京市气象局信息技术保障团队联合国家气象信息中心、设备厂家、冬奥数据云平台开发商等单位，三次更新扩容冬奥观测数据标准编码格式（BUFR）格式，最终明确了包含17种要素48项观测数据版本，实现所有数据快速传输解码、采集后50 s内完成数据入云，同步提供远程过程调用（GRPC）、表述性状态转移（REST）接口服务，为冬奥业务系统云+端方式开发及部署提供一线支撑；并使得下游用户在此方面的工作量降低到最小化。

3.2 建立完整的质量控制流程

为提高观测数据准确性，结合高海拔山区特点，信息技术保障团队对冬奥赛区地面自动站，采用界限值检查、内部一致性检查、日值偏小检查等7种质量控制算法，明确阈值参数，对13个要素开展近实时（第二日09:00质量控制前一天分钟和小时数据）和历史两级质量控制工作。其中实时质量控制算法融入冬奥核心业务系统之一“冬奥气象综合可视化系统”，实现了对异常数据标注码服务，供预报服务人员使用参考。

3.3 采用实时数据三级备份服务策略

冬奥气象中心对冬奥气象观测站对内业务使用及对外服务名称进行了规范，对面向公众数据服务的冬奥气象观测站，按要素实行三级备份机制（代表站、备份站、实况再分析格点数据）。例如“风”要素优先使用代表站机械风、同址超声风数据备份方式，之后

依次使用备份站、实况再分析数据，确保公众服务网站有可用数据。同步开发数据阈值质量控制接口，为冬奥APP、冬奥气象服务网站提供数据接口服务，使观测备份策略在服务系统应用端可自动化触发实现。

4 冬奥专用实况产品研发

为满足冬奥组委及国际奥委会对奥林匹克数据源（Olympic Data Feed, ODF）报文服务需求，需开发符合国际习惯的天气现象实况产品；为在比赛过程中精准寻找天气窗口期，对赛事安排做出及时调整，需要精细化的风监测产品作为支撑；为支撑冬奥气象预报预警业务需求，积累赛区局地小气候变化特征经验，实时了解不同位置天气的实况，北京市气象局需要对各类观测数据进行挖掘，研发可直接用于服务的多种观测产品。

4.1 天气现象识别产品

结合各赛区、场馆位置，选取最近的延庆、朝阳、海淀、石景山4个国家级站点，利用同站址天气现象仪、降水现象仪及地面综合观测业务软件（ISOS）自动判识的视程障碍现象等多源观测数据，北京市气象局设计识别算法，并充分考虑国际习惯制定识别规则（表2），自动生成关键站点逐小时中英文天气现象信息（图4）；再汇聚气象实况要素及冬奥组委冰温、雪温要素后自动形成ODF实况报文（图5a），实时向国际奥委会的奥林匹克网站和电视频道、北京冬奥会官网等8个应用场景提供服务。全自动化的观测数据服务流程得到冬奥组委技术部高度肯定。

表2 多源观测数据判识天气现象规则

天气现象(中文)	天气现象(英文)	对应云量/%
晴	Clear(夜间)	0~24
	Sunny(白天)	
晴间多云	Mostly Clear(夜间)	25~54
	Mostly Sunny(白天)	
多云间晴	Partly Cloudy	55~74
多云	Mostly Cloudy	75~84
阴	Overcast	85~100

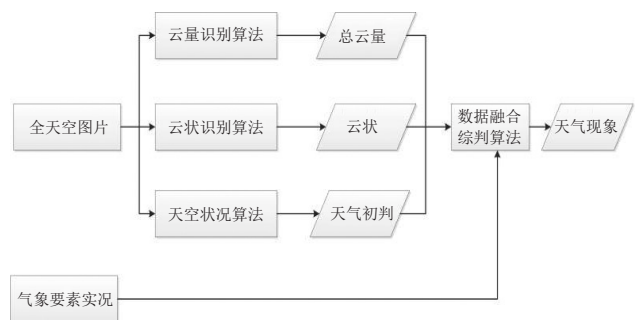


图4 天气现象判识数据处理流程

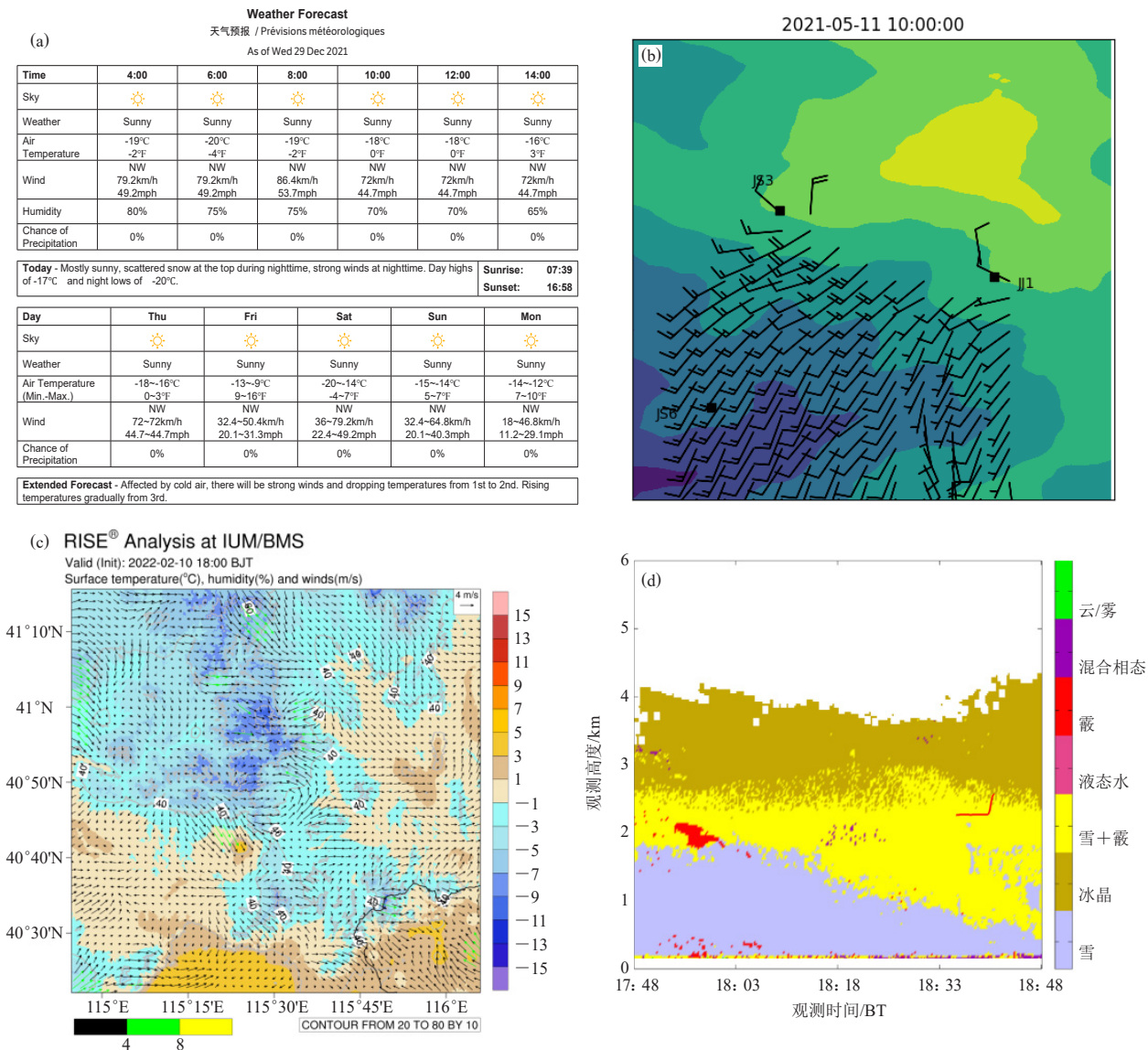


图5 观测数据及气象服务产品样例

(a) ODF报文; (b) 三维风场产品之水平二维风场; (c) 睿思100 m风温湿分析场产品; (d) 冬季云系水凝物粒子相态分类

4.2 三维风场产品

应用三部测风激光雷达实时机械协同扫描观测数据，利用奇异值分解等方法，观测保障团队研发风垂直廓线（线）、水平二维风场（面）、垂直剖面风场（面）、三维风场（体）反演算法和质量控制算法，并将代码编译实现并行计算，最大可能提高计算效率。每次协同扫描模式后3 min内，将四种协同观测产品实时提供预报团队桌面。根据预报团队需求和意见，观测保障团队采取动态流场等方式定制各产品显示方案，包括分辨率26 m单点廓线产品，分辨率100 m的水平二维风场产品（图5b）及区域内三维风场。数字及图形可视化服务为山地风场预报、直升机救援服务

提供资料支撑。

4.3 秒级风及分钟极大风监测产品

现有观测业务中极大风为小时输出值，即1 h内1个数值，该精度远不能满足冬奥赛事运行分钟级精准窗口期的寻找。因此观测保障团队联合厂家对冬奥地面气象站采集器程序进行改进，增加秒级风速风向的实时采样记录，并基于秒级风速风向计算分钟内极大风数据，即每分钟输出一组60 s内的60个数据中的最大风向风速，作为分钟极大风，实时服务赛事冬奥预报团队。

4.4 分钟级、百米级网格实况产品

为赛区预报服务提供冬奥核心区“次百米级”和

“百米级”小范围精细化实况融合分析场产品，北京市气象研究院采用复杂地形下多源稠密气象资料快速融合、自适应降尺度、大气涡流尺度运动模拟等技术，融合京津冀区域约4400个自动站逐5 min观测资料和8部S/C雷达逐6 min雷达立体扫描观测数据，自主研发京津冀区域500 m、冬奥山地赛区（含延庆赛区和张家口赛区）100 m分辨率，10 min快速融合风、温、湿要素实况分析产品（图5c），并实时接入冬奥气象APP开展服务。

4.5 降雪粒子相态识别产品

利用X波段天气雷达与Ka波段云雷达数据，开展质量控制融合分析，北京市人工影响天气中心采用X/Ka双波长雷达模糊逻辑等算法，实现对降雪云系的水凝物粒子分类，自动识别“过冷云雾、雪花、霰、雪+霰”等相态（图5d），用于人工影响天气作业中降雪云系微物理过程分析。

5 冬奥赛时应用

北京冬奥会及冬残奥会保障期间（2022年1月26日—3月13日），延庆赛区三维、秒级、多要素、靶向协同的冬奥气象观测系统提供了高质量数据服务。组网雷达系统有效监测了主要影响赛区的5次雨雪天气过程发展，不同点位的地基遥感设备实现了对赛区周边大气温、湿、风及水凝物四类垂直廓线实时观测，赛道气象站提供了高频次、要素丰富的精细化数据，为冬奥气象服务团队实现“百米级、分钟级”预报服务任务提供了强有力的支撑。

适应山地赛场条件的设备改造保障了观测设备稳定运行和数据及时传输。同站异电模式确保了赛道站点数据稳定传输，超声风与机械风同站址布设确保了5次雨雪天气过程不同站点机械风发生冻结后，超声风数据仍可不间断提供。整个赛时阶段，赛道气象站的核心要素数据到报率均在99.9%左右，数据正确率达到99.8%。

统一的冬奥数据BUFR格式、研发的7种质量控制算法及两级质量控制流程，确保了数据高质量服务的需求。一是保障了赛时所有观测数据快速传输解码、采集后50s内完成数据入云、1 min内冬奥业务系统显示。二是建立了一套自2014年10月—2022年3月共计220 GB的完整冬奥延庆地面观测数据集，逐年滚动为国际奥组委、北京冬奥组委体育部、规划部等单位提供基础气象资料服务；连续5年为中英文版《北京2022年冬奥会和冬残奥会赛区气象条件及气象风向分析报告》提供第一手气象资料。三是三级备份服务策略保

障了冬奥公众气象服务网站及冬奥智慧气象APP均无核心数据缺测现象。

冬奥各类专用实况产品的研发应用，满足了冬奥组委及国际奥组委、气象预报预警业务的各项需求。比如天气现象ODF实况产品在冬奥历史上首次实现了从数据采集、传输、整合全流程的自动化运行，体现了中国气象部门的现代化水平和信息化能力，实时向8个应用场景提供服务，得到冬奥组委技术部的高度肯定。比如地面气象观测秒级风、分钟内极大风，匹配三维风场观测产品，形成不同层次精细化的风监测产品，有力支撑了赛事天气窗口期的精准寻找，并对赛事安排做出及时调整，同时也为冬奥气象预报技术研发和保障服务提供高质量精细天气“背景”数据。

6 总结

通过从山地多尺度观测站网建设、适应山地赛场条件进行设备改造、数据流程规范、冬奥专用观测产品研发应用及赛时应用效益等方面进行介绍，北京冬奥会气象观测保障工作圆满完成主要得益于以下几方面。

1) 以重大赛事的预报服务需求为导向，充分考虑可能影响赛场天气系统来向，建立的“三维、秒级、多要素”立体靶向协同天气监测系统对延庆赛区的气象观测保障提供了高精度的背景数据支撑。

2) 强化观测软硬件自主研发，充分发挥新装备新技术科技支撑，有效保障了核心气象观测数据稳定传输。统一数据格式、建立完整质量控制流程及三级备份机制，打造了自动化信息化的全流程数据服务链条。

3) 结合冬奥组委及国际奥委会、气象行业内外等不同人群需求，秉持“观测即服务”理念，对地面、垂直多种观测资料充分挖掘、分析，研发出多种观测产品，提供定制化贴身观测产品，发挥了观测效益，保障了赛事圆满举行。

此外，整个冬奥观测系统建设保障中，也离不开协同观测保障模式。一方面要充分发挥国省市多级技术力量的协同合作能力，建立跨部门、跨军地的协调机制和顺畅高效的赛时组织运行机制。另一方面要运用企业力量，联合设备厂家组建观测设备运维保障团队，统筹一切可利用的观测设备、基础设施资源，共同完成观测保障任务。总之，举各部门之力，集气象行业之智，以最高标准、最精服务圆满完成2022年冬奥会和冬残奥会气象观测保障服务任务。

深入阅读

- 北京冬奥组委体育部, 北京2022年冬奥会和冬残奥会气象中心, 2021. 北京2022年冬奥会和冬残奥会赛区气象条件及气象风险分析报告(2017—2021版)[M]. 北京: 气象出版社.
- 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.
- 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.
- 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.
- 程志刚, 李炬, 张鑫宇, 等, 2020. 基于三台测风激光雷达的大气湍流和三维风场研究[J]. 气象学报, 78(6): 1021-1036.
- 李国平, 2016. 近25年来中国山地气象研究进展[J]. 气象科技进展, 6(3): 115-122.
- 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.
- 宋林辉, 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.
- 汤绪, 2016. 超大城市气象观测网的设计与应用[J]. 气象科技进展, 6(4): 8-17.
- 王倩倩, 权建农, 程志刚, 等, 2022. 2019年冬季北京海陀山局地环流特征及机理分析[J]. 气象学报, 80(1): 93-107.
- 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.
- 徐安伦, 李建, 2017. 大理国家气候观象台综合气象观测和研究[J]. 气象科技进展, 7(5): 8-14.
- 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.
- 张志国, 崔炜, 白雪涛, 等, 2017. 第24届冬奥会海坨山赛区近两年冬季地面风场特征[J]. 干旱气象, 35(3): 433-438.
- Chen J, Wang J, Lin R S, et al, 2021. Assessment of snowmaking conditions based on meteorological reconstruction in the Beijing-Zhangjiakou Mountain area of North China in 1978-2017[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 60(9): 1189-1205.
- Chen M X, Quan J N, Miao S G, et al, 2018. Enhanced weather research and forecasting in support of the Beijing 2022 Winter Olympic and Paralympic Games[J]. WMO Bulletin, 67(2): 58-61.
- Chen Y C, Liu X E, Bi K, et al, 2021. Hydrometeor classification of winter precipitation in Northern China based on multi-platform radar observation system[J]. Remote Sensing, 13(24): 5070.
- Joe P, Doyle C, Wallace A, et al, 2010. Weather services, science advances, and the Vancouver 2010 Olympic and Paralympic Winter Games[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 91(1): 31-36.
- Kiktev D, Joe P, Isaac G A, et al, 2017. FROST-2014: The Sochi Winter Olympics International Project[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 98(9): 1908-1929.
- Ma X C, Bi K, Chen Y B, et al, 2017. Characteristics of winter clouds and precipitation over the mountains of northern Beijing[J]. Advances in Meteorology, 2017: 3536107.
- Orlanski I, 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 56(5): 527-530.
- Whiteman C D, 2000. Mountain meteorology: fundamentals and applications[M]. New York: Oxford University Press.

(作者单位: 秦彦硕、宋巧云、梁丰, 北京市气象局; 范雪波、常晨、李林、韦涛、崔炜、张治国、张鹏, 北京市气象探测中心; 陈婧, 北京市气象信息中心; 程志刚, 北京城市气象研究院; 陈羿辰, 北京市人工影响天气中心)

(编辑: 卢冰)