

漆梁波,2025. 重大活动气象保障中的预报难点回顾及展望[J]. 气象,51(11):1417-1432. Qi L B,2025. Review and outlook on challenges in meteorological service for major events[J]. Meteor Mon,51(11):1417-1432(in Chinese).

# 重大活动气象保障中的预报难点回顾及展望<sup>\*</sup>

漆梁波

上海中心气象台, 上海 200030

**提 要:** 文章回顾了近 20 年我国重大活动的气象保障工作, 将其分为三种类型: 定时定点常规天气预报、定时定点特殊天气预报、海外重大活动专项预报, 探讨满足各类气象保障需求的预报服务难点之所在, 并对未来重大活动气象保障及其预报支撑体系进行展望。主要结论包括: 常规的定时定点天气要素预报场景中, 预报难点主要集中在对流生消或有无弱降水的把握上, 短期时段内, 数值模式提供的天气形势预报仍是重要的决策依据, 高分辨数值模式产品的辅助则是必不可少的, 而短时或临近时段, 齐备的观测资料和预报团队的综合分析能力则更为重要; 定时定点特殊要素预报场景中, 现阶段由于观测覆盖度不足、数值模式预报能力欠佳、针对性的客观预报方法缺少, 无论是短期还是短时临近时段, 预报团队结合观测和天气形势分析的预报经验是保障服务成功的关键, 这一点在海外现场服务保障中尤为明显。未来, 随着观测系统覆盖度增加、数值模式精准预报能力提升和包括 AI 在内的针对性的客观预报方法研发, 特殊要素预报场景将逐渐转变为常规要素预报场景, 预报团队的主导作用也会逐渐过渡到短时或临近阶段。为应对未来各类重大活动气象保障的需求, 需加强三维全要素观测系统建设, 提升数值模式精准化预报能力, 推进针对性的客观预报技术研发, 并加强预报团队能力建设。

**关键词:** 重大活动气象保障, 预报难点, 回顾, 展望, 预报团队

中图分类号: P457, P456, P459

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.032401

## Review and Outlook on Challenges in Meteorological Service for Major Events

QI Liangbo

Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

**Abstract:** This paper reviews the meteorological service work for major events in China over the past two decades, categorizing it into three types: conventional “fixed-time and fixed-location” forecast, special “fixed-time and fixed-location” forecast, and special forecast for major overseas event. It explores the difficulties and challenges in providing forecasting services for different types of meteorological service needs, and provides prospects for future meteorological service and its forecasting support system for major events. The main conclusions are as follows. In conventional “fixed-time and fixed-location” weather element forecasting scenarios, the forecast challenges primarily focus on convection generation and dissipation or the occurrence of weak precipitation. Over short-term periods, the weather situation forecast provided by numerical models remains an important basis for decision-making, and the service from high-resolution numerical model products is indispensable. However, in short-time forecasting or nowcasting, the observation data and the comprehensive analytical capabilities of forecasters are more important. Due to inadequate observational coverage, limited forecast capabilities of numerical models and the lack of targeted objective forecast methods, in special “fixed-time and fixed-location” forecast scenarios involving clouds,

\* 国家重点研发计划(2018YFC1507601)资助

2024 年 10 月 22 日收稿; 2025 年 8 月 6 日收修定稿

第一作者:漆梁波,主要从事天气预报及相关技术研究. E-mail:32822638@qq.com

localized winds, and localized visibility, the experience of forecasters, combined with observations and weather situation analysis, is crucial for successful service, especially in overseas on-site service support, regardless of whether it is short-time or nowcasting. With the increased observational system coverage, the improved accurate forecast capabilities of numerical models, and the development of targeted objective forecast methods including AI, the special element forecasting scenarios will gradually transition into conventional element forecast scenarios, and the leading role of the forecasting team will also gradually shift to short-time forecasting or nowcasting. To meet the meteorological service needs for various major events in the future, it is necessary to strengthen the construction of a three-dimensional full-element observation system, enhance the accurate forecasting capabilities of numerical models, promote the development of targeted objective forecasting technologies, and build a forecasting team with continuous self-learning, high generalization abilities, and strong communication skills.

**Key words:** meteorological service for major events, forecast challenge, review, outlook, forecasting team

## 引 言

现代天气预报自诞生之日起,就被赋予在重大活动中承担重要角色,甚至严格地讲,是重大活动需求催生了现代天气预报。1853—1855 年克里米亚战争中的一场黑海风暴,导致英法联军舰队损失惨重,战后法国建立了世界上第一个气象站网,开始为公众和重大军事活动提供天气预报服务。第二次世界大战中著名的“诺曼底登陆”战役,气象保障为登陆作战的突然性和最终成功奠定了基础(Persson, 2020)。中央气象台最早的重大活动气象保障是 1949 年为“开国大典”的气象服务,在资料极度缺乏的情况下,新中国第一代预报员的优秀代表章淹先生作出了成功的预报,圆满保障了活动举行。之后的我国各类重大活动中,中国气象局均提供专门的气象保障,包括 1972 年美国总统尼克松访华期间的天气预报服务,多次获得党和国家领导人的表扬和认可(端义宏, 2010)。1990 年北京亚运会是我国改革开放之后举办的最重大的国际体育盛会,中国气象局(当时名称为国家气象局)专门成立“第十一届亚运会气象服务中心”,这也是针对重大活动气象保障首次成立专门中心。1987 年起,组织了近 200 人开展相关的预报和服务科研攻关,在观测系统建设方面也做了大量工作,包括新建自动站、雷达站升级维护、地面和高空站加密观测等。由于准备充分,组织周密,服务保障取得圆满成功(林之光, 1996)。另一个具有里程碑特色的气象保障任务是 1993 年在上海举办的东亚运动会。在那次运动会上,中国气象局首次在大型活动气象保障中实施人工影响天气

作业试验,保障了开幕式期间各种表演(包括跳伞)的顺利进行(林之光, 1996)。进入 21 世纪之后,我国举办的各种重大活动开始增多,对气象服务保障的要求也在提高。2001 年,上海举办亚洲太平洋经济合作组织首脑会议,上海市气象局利用区域数值模式产品,首次试发“上海市定时定量定点天气预报”(上海市地方志编纂委员会, 2021),这一理念也为后续我国重大活动气象保障提供了新思路,即重大活动气象保障的服务产品应当满足特定用户在特定地点、特定时间的特定需求。

随着经济社会发展和技术进步,重大活动气象保障的需求也不断变化,对观测、预报和服务的精密性、精准性和精细程度要求也更高。近年来,数值模式能力提升和客观释用技术的发展,尤其是 AI 相关技术的应用,使得常规要素预报的精准程度明显提升,预报员的工作重点逐渐向重大天气气候事件预报预测和重大活动保障服务过渡,工作内容从传统地面要素预报向三维立体全要素预报以及影响预报和风险预警转变。因此,重大活动保障将是未来很长一段时间预报员的重点任务之一。重大活动保障中,除了晴雨、温度、湿度、风等常规要素的预报,还经常会涉及“三维立体全要素预报”需求,这些需求对预报员以及整个预报支撑体系都提出了更高要求。本文仅从预报员的角度,就近 20 年重大活动气象保障的预报服务难点进行分析、回顾和总结,以便为预报员同仁未来开展类似的预报服务保障提供参考。实际业务中的“重大活动保障”涵盖内容很广,除了大型社会性公开活动,还包括重大工程建设项目建设气象保障、各类地质灾害的救援气象保障、各类突发或重大事件的应急气象保障等。限于篇幅和

文献记录获取的难易程度,本文所指的“重大活动保障”主要是各类大型社会性公开活动。

## 1 近 20 年重大活动气象保障中的预报服务难点分析

自 2005 年以来,大型社会性公开活动有很多,主要包括综合性国际活动、国内重大社会活动、海外重大服务保障等,限于篇幅和文献记录获取的难易程度,未能列出每一项重大活动,表 1 仅列出一部分代表性任务。

由表 1 可见,在国内举办的重大活动气象保障服务可大致分为两类:一种是定时定点的常规天气预报,主要关心:灾害性天气有无、晴雨状况、气温、风等;另一种是定时定点的特殊天气预报,主要涉及局地风、雾及云要素等。除了上述两类,还有一类特殊的重大活动气象保障,就是近年来开始不断增多的海外重大活动专项预报,这类“新兴”的服务通常在观测、数值模式、客观方法等方面的支持略显不足,预报难度较前两类更大。以下将针对这三类服务需求,分别进行预报难点的回顾。

表 1 2005 年以来重大代表性活动及其气象保障难点

Table 1 Major representative events and their meteorological service difficulties since 2005

| 时间             | 活动名称               | 地点    | 活动类别     | 气象保障难点                        |
|----------------|--------------------|-------|----------|-------------------------------|
| 2006 年 6 月     | 上海合作组织峰会           | 上海    | 综合性国际活动  | 常规定时定点天气及要素                   |
| 2008 年 3—5 月   | 奥运圣火珠峰传递           | 日喀则   | 综合性国际活动  | 高海拔地区常规定时定点天气及要素              |
| 2008 年 8 月     | 第 29 届夏季奥运会        | 北京    | 综合性国际活动  | 常规定时定点定量天气及要素、近岸风             |
| 2010 年 5—10 月  | 第 41 届世界博览会        | 上海    | 综合性国际活动  | 常规定时定点天气及要素                   |
| 2010 年 11 月    | 第 11 届亚运会          | 广州    | 综合性国际活动  | 常规定时定点天气及要素、近岸风               |
| 2014 年 8 月     | 第二届青年奥运会           | 南京    | 综合性国际活动  | 常规定时定点天气及要素                   |
| 2016 年 9 月     | G20 杭州峰会           | 杭州    | 综合性国际活动  | 常规定时定点天气及要素                   |
| 2017 年 5 月     | 国产大飞机首飞            | 上海    | 国内重大社会活动 | 常规定时定点天气及要素、定时定点云特征           |
| 2018 年 6 月     | 上海合作组织青岛峰会         | 青岛    | 综合性国际活动  | 常规定时定点天气及要素、近岸能见度             |
| 2019 年 9—10 月  | 国庆 70 周年阅兵         | 北京    | 国内重大社会活动 | 常规定时定点天气及要素、定时定点云特征           |
| 2019 年 10 月    | 第七届世界军人运动会         | 武汉    | 综合性国际活动  | 常规定时定点天气及要素、定时定点云特征           |
| 2021 年 6—7 月   | 中国共产党成立 100 周年庆祝活动 | 北京    | 国内重大社会活动 | 常规定时定点天气及要素                   |
| 2022 年 2 月     | 第 24 届冬季奥运会        | 北京    | 综合性国际活动  | 常规定时定点天气及要素、复杂山地<br>定时定点天气及要素 |
| 2023 年 7—8 月   | 第 31 届世界大学生夏季运动会   | 成都    | 综合性国际活动  | 常规定时定点天气及要素                   |
| 2023 年 9—10 月  | 第 19 届亚运会          | 杭州    | 综合性国际活动  | 常规定时定点天气及要素                   |
| 2023 年 11—12 月 | 第 17 届太平洋运动会       | 所罗门群岛 | 海外重大活动   | 常规定时定点天气及要素                   |

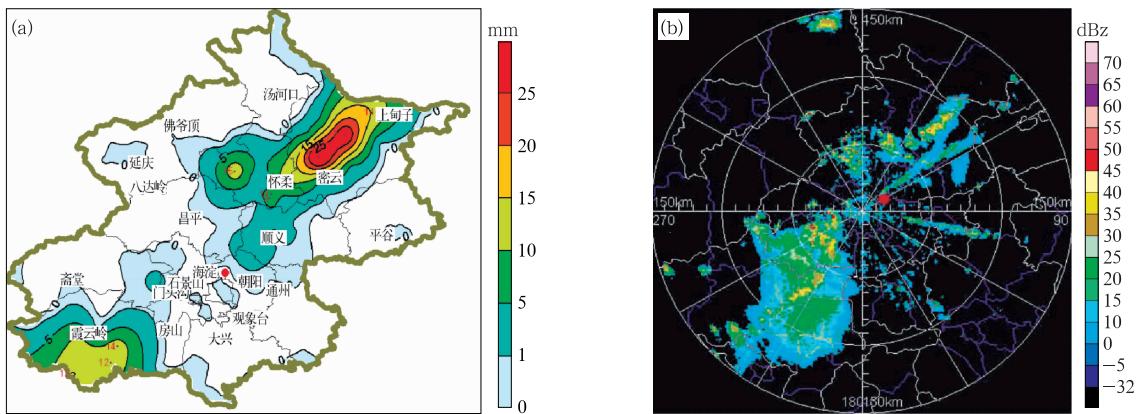
### 1.1 定时定点常规天气预报

定时定点的常规天气预报是重大活动保障的主要需求,最重要的保障任务还是活动期间的重要庆典仪式,这些庆典仪式大多在户外举行,受气象因素影响大,气象保障难度大。

2008 年 5 月 8 日,中国登山队 19 名队员成功登上珠峰之巅并进行了奥运火炬接力,首次实现了奥运圣火在世界之巅的传递。珠峰海拔高、气候恶劣、观测资料稀少,而不同高度的降雪、能见度、风和气温对整个登顶和传递活动的安排(包括全球电视转播)都有很大影响。中国气象局提前一年进行了观测设备布局和保障演练(何立富等,2010;张志刚

等,2011),现场保障团队根据前期积累的观测、数值模式给出的天气形势和预报经验,确定 5 月 8 日和 9 日的气象条件较合适登顶和传递活动,最终成功保障该重大活动的圆满成功(代华光等,2021)。

2008 年 8 月,在北京举办的夏季奥运会开幕式当天,北京东北部和西南部均出现雷阵雨天气,并达到大雨量级,甚至在开幕式前后的时间段,开幕式举办场馆(国家体育场)西南约 30 km 处仍有对流云团活动(图 1,文中时间均为北京时)。但西南部的回波向城区靠近的过程中消散,未对开幕式活动造成不利影响。董林等(2008)对北京奥运会开幕式天气预报难点进行了总结,认为“降水是否下山”是阻碍北京地区精准预报的主要问题,其背后的物理机



注:红色圆点代表国家体育场位置。

图 1 2008 年 8 月 (a) 8 日 19:00 至 9 日 01:00 北京累计降水量和 (b) 8 日 21:40 北京多普勒雷达组合反射率因子 (杨波等, 2010)

Fig. 1 (a) Accumulated precipitation in Beijing from 19:00 BT 8 to 01:00 BT 9 and (b) composite reflectivity factor of Beijing Doppler Radar at 21:40 BT 8 August 2008 (cited from Yang et al., 2010)

制和预报定性指标并不清楚。“降水是否下山”本质上是对流生消的预报问题。杨波等(2010)研究发现,城市热岛和地形次级环流对不同来向中尺度系统的影响各不相同,倾向于加强自北而来的对流,而削弱自南而来的对流,并认为这是上述过程中西南而来的对流未能影响场馆的主要原因。后续研究表明,北京局地对流发生和演变规律远非上述简单的机制可以解释。天气形势背景、低层偏东风、上游雷暴出流、边界层层结条件等与地形的相互作用,均会影响北京地区的局地对流发生和演变模态(魏东等, 2008; 廖晓农等, 2011; 2013; 雷蕾等, 2012; 熊亚军等, 2012; 张文龙等, 2013; 2019; 陈明轩等, 2017; 吴进等, 2018; 纪彬等, 2020; 何娜等, 2020; 2023)。此次奥运会期间,组织了一项聚焦临近预报的国际预报示范项目,共包含 11 个国际先进的临近预报系统。对该项目的综合评估表明 (Wilson et al., 2010): 没有哪个临近预报系统能给出足够稳定的准确度,使得预报员可以在不进行分析和研判的情况下选用。这一评估结果也印证了对流生消机理复杂,预报难度高。

2008 年北京奥运会之后,高分辨区域数值模式逐渐在中国气象局的业务预报中发挥作用,不管是模式本身性能还是基于模式产品的解释或集成应用水平都在不断进步(范水勇等, 2009; 雷蕾等, 2012; 傅娜等, 2013; 漆梁波, 2015; 徐同等, 2016; 程丛兰等, 2019; 唐文苑和郑永光, 2019; 赵渊明和漆梁波,

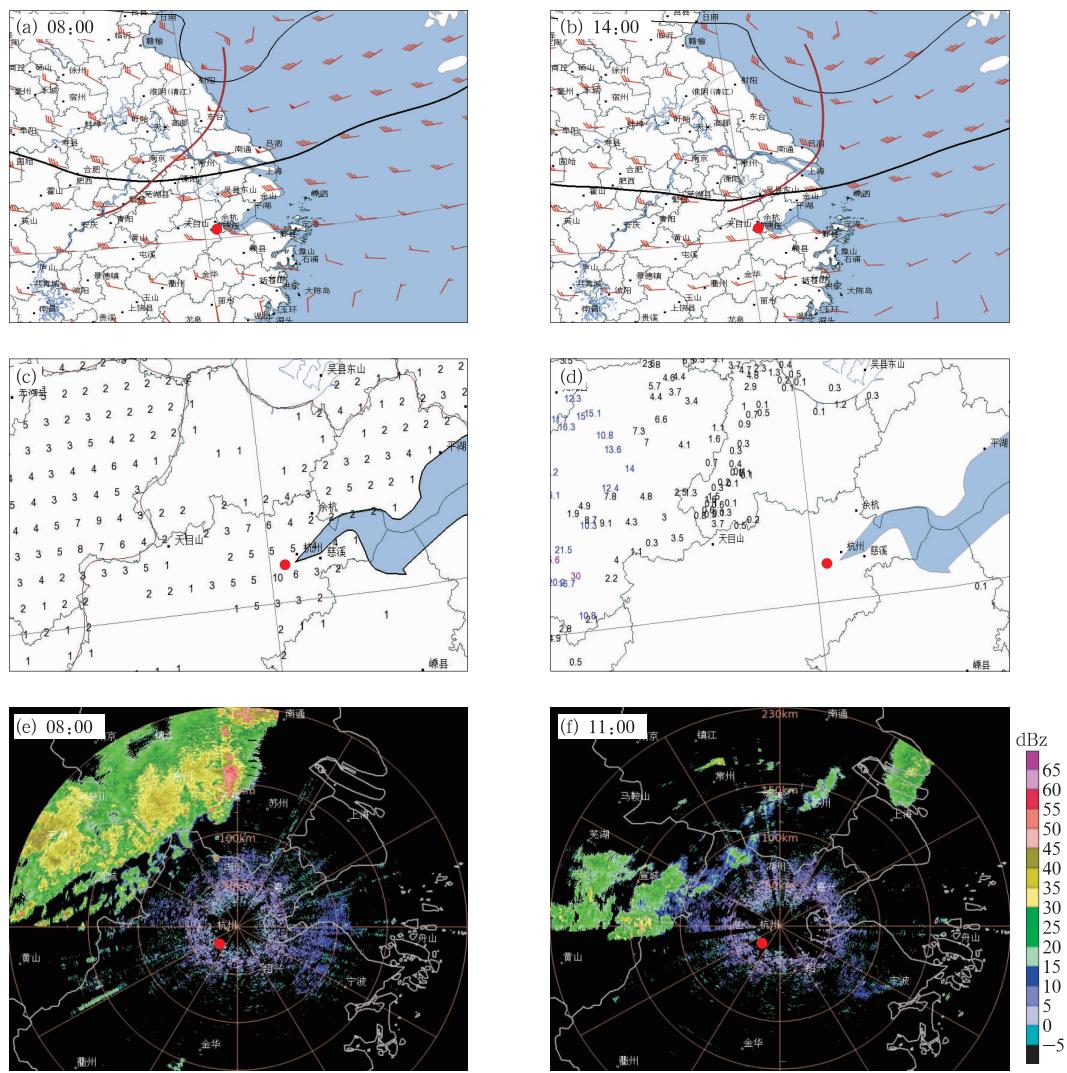
2021; 邢楠等, 2023; 陈敏等, 2023)。2022 年北京冬奥会,“百米级分钟级”数值模式系统及相关释用产品也投入业务应用或业务试验,取得了一些令人鼓舞的结果(马小娇等, 2023; 陈明轩等, 2024; 2025)。2023 年 9 月 20 日上午,杭州亚运圣火传递返回到主会场,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)模式(以下简称 EC 模式)9 月 19 日 20:00 起报的降水量分布(图 2c)显示,20 日 08:00—14:00 杭州周边均有小雨,其中杭州城区降水量为 5~10 mm,且 08:00 杭州上游有明显的线状雷雨回波东移(图 2e),若依照一般的预报经验(无业务高分辨区域模式参考的情况下),则将预报圣火传递期间杭州有雷阵雨,对活动不利。然而,同一起报时刻的高分辨区域模式(CMA-SH9 和 CMA-SH3 模式)均预报上游雷雨云团在东移过程中将减弱,对活动无影响(图 3)。现场气象保障人员基于对天气形势演变的判断(西风槽东移北缩,见图 2a, 2b)和高分辨区域模式预报结果的相互印证,在 08:00 就将“上游雨带东移过程中减弱概率高,对圣火传递活动影响不大”的决策信息提供给前方指挥部,后续又根据雷达回波特征的演变(出流边界逐渐远离主体回波)和实况分析(上游降水和大风均趋弱,而本地气层较为稳定),在 09:00 和 10:00 进一步确认“上游回波将减弱,对圣火传递无影响”的决策信息,保障该重大活动顺利举行。

尽管对大型活动的重要仪式而言,焦点是“有无降水”,但和 2008 年北京奥运会开幕式天气类似,杭

州亚运会此次活动的预报难点其实是“对流生消”。在这一难点的应对上,短期时效内(12~72 h),预报员对数值模式提供的天气形势进行分析还是重要的一个环节。因为和对流伴随的中小尺度对流活动,总体还是受天气形势的调制,比如中层大气槽脊的移动快慢和生消,而对于这些天气形势特征的预报或描述,数值模式的精准度要高于对地面要素或降水预

报。另外一个必不可少的工具则是高分辨区域数值模式产品。高分辨区域数值模式通常能更好地描述对流活动,因此参考其产品(图 3),能更好地把握“对流生消”这一难点,这其中也包含弱降水天气。统计事实和预报检验均表明,高分辨区域数值模式对弱降水过程的预报技巧要远高于全球数值模式。

当然,高分辨区域数值模式也存在很多业务应



注:图 a, b 中棕色线代表槽线;红色圆点代表活动现场位置,下同。

图 2 (a~c)EC 模式 2023 年 9 月 19 日 08:00 起报的 20 日 (a, b)500 hPa 高度场(黑色等值线)和风场(风羽),(c)08:00—14:00 的 6 h 降水量(数字,单位:mm),9 月 20 日

(d)08:00—14:00 的 6 h 降水量实况(数字,单位:mm),(e, f)杭州雷达 0.5°仰角反射率因子

Fig. 2 (a, b) 500 hPa geopotential height (black contour) and wind (barb),

(c) 6 h precipitation (number, unit: mm) from 08:00 BT to 14:00 BT

on 20 initiated at 08:00 BT 19 September by EC model, and (d) observed 6 h

precipitation (number, unit: mm) from 08:00 BT to 14:00 BT, and

(e, f) 0.5° elevation reflectivity factor of Hangzhou Radar on 20 September 2023

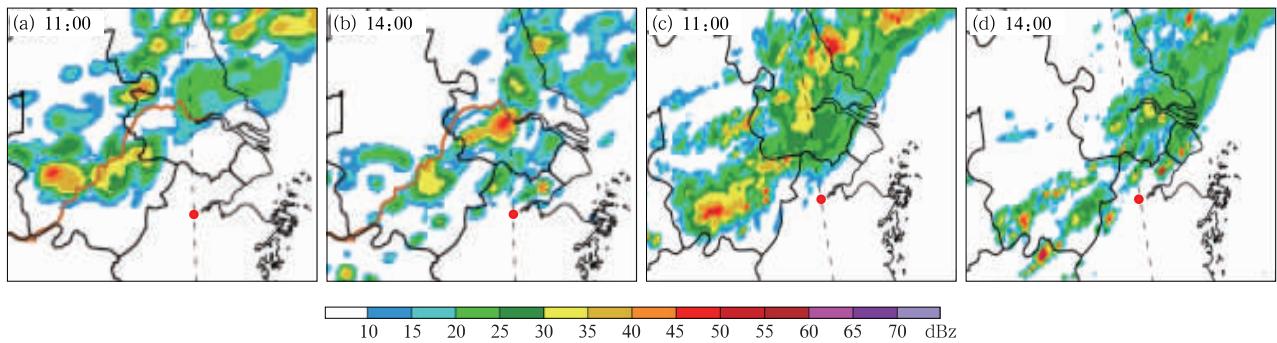


图 3 2023 年 9 月 20 日组合反射率预报

(a, b)CMA-SH9 模式 19 日 20:00 起报, (c, d)CMA-SH3 模式 20 日 02:00 起报

Fig. 3 Composite reflectivity forecasts on 20 September by (a, b) CMA-SH9 model initiated at 20:00 BT 19 and (c, d) CMA-SH3 model initiated at 02:00 BT 20 September 2023

用局限性(漆梁波, 2015), 在天气系统强迫不明显、对流发展不旺盛时, 其预报性能和全球模式相比体现不出更多优势。例如, 2016 年 9 月 4 日 G20 杭州峰会开幕式气象保障中, 各家模式(包括高分辨率区域模式)均未能预报出开幕式之前发生的一场午后短时阵雨, 导致服务陷于被动(张涛等, 2018); 2021 年 7 月 1 日中国共产党成立 100 周年庆典早晨, 源自北京西部的阵雨回波趋向庆典仪式现场, 同样是高分辨率区域数值模式未能把握的弱天气过程, 但保障团队依据天气形势和实况演变研判, 认为回波移动过程中减弱, 不会对庆典活动造成明显影响, 最终庆典各项活动圆满举行(赵晓妮等, 2021)。因此到了短时或临近阶段, “对流生消”或“有无弱降水”仍主要依靠齐备的观测资料以及预报员的综合分析能力来把握, 这些综合分析能力主要体现在能够根据各种观测资料的相互印证, 来推断对流演变的态势。

总体而言, 常规的定时定点天气预报, 预报需求大多是“有无降水”, 对于较为明显的降水过程预报难度较低, 因此, 预报难点主要体现在“对流生消”或“有无弱降水”上。这一类保障, 通常有较长的准备周期, 可以预先布设观测体系, 预先进行预报系统(模式或客观方法)调试, 保障团队也可利用预报演练提前积累经验。观测、模式(尤其是高分辨率数值模式)、客观方法以及保障团队的综合能力都是预报成功必不可少的因素。短期时效内, 数值模式提供的天气形势预报仍是重要决策依据, 而高分辨率区域数值模式产品的支撑是必不可少的, 而在短时或临近阶段, 观测资料和预报团队的综合分析能力则更为重要。

除了上述提到的开闭幕式或重要仪式阶段的预

报(主要关注晴雨)外, 重大活动的开展过程中, 精准的要素预报也是重要的, 这方面主要依靠不断进步的客观预报方法, 包括近几年快速发展的人工智能方法(金荣花等, 2019; 杨绚等, 2022)。陈明轩等(2024)对“智慧冬奥 2022 天气预报示范计划”的总结表明, 基于人工智能的释用方法在气温、风等要素的精细化预报能力方面表现优异。在 2023 年杭州亚运会上, 国家气象中心基于人工智能技术研发的精细化站点预报系统(STNF)对各比赛场馆的 2 m 气温预报平均绝对误差小于 1 ℃, 10 m 阵风预报均方根误差小于  $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 为整个赛事的气象保障提供了坚实的基础(钱浩等, 2023)。

## 1.2 定时定点特殊天气预报

除了常规的定时定点天气预报外, 在重大活动中, 有些活动的举办场地较为特殊, 并不是人群经常活动的区域, 观测少, 业务中也不进行针对性的预报服务, 预报员经验不足。这方面的预报难点主要是近岸(山地)风、近岸(山地)雾以及云的预报。

2008 年北京奥运会、2010 年广州亚运会和 2023 年杭州亚运会的帆船赛分别在青岛、汕尾和宁波举办。对帆船赛影响最大要素是风, 风速要求在  $3 \sim 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且风向较为稳定, 才能举办相应的竞赛项目。由于奥运会或亚运会帆船赛主要在近岸  $1 \sim 3 \text{ km}$  的海域范围内举办, 而近岸风受到天气形势(包括云量)、海陆差异(热力和粗糙度)、港湾走向等的影响, 高分辨率区域数值模式( $0.5 \sim 5 \text{ km}$  分辨率不等)尚不能很好地模拟或预报, 且缺少长时间的观测数据, 有针对性的客观预报方法也不多, 预报难度很大。从北京奥运会帆船赛的预报分析看(杨育强

等,2008),整个赛事过程的风速平均预报误差较小,其中预报员主观订正的平均误差只有  $1.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,优于数值模式或各种客观方法( $1.2 \sim 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。预报员进行主观订正的依据主要还是基于天气形势分型的经验和统计方法(李庆宝等,2008;黄容等,2008;张晓东等,2012),考量因素包括低层盛行风向、风速以及晴雨状况(这些要素都是数值模式大致可以把握的),依据上述因素进行分类统计,得到近岸风向和风速随上述因素变化的规律,并进行预报服务。这些经验和统计方法,虽然保证了预报员主观预报的正技巧,但风向的偏差仍较大( $>30^\circ$ ),且上述赛事过程中,实际风速大多在  $4 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  或以下,接近比赛所需风速的最小阈值,而  $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速误差就会给赛事组织带来困扰,因此整个赛事过程中,预报服务承受了巨大压力。

近岸风的演变规律受地域、季节、气候带等影响明显,这方面的预报技巧提升还需依靠长期观测的统计释用,其中包括 AI 方法。和近岸风类似,北京冬奥会气象服务保障中,复杂山地地形的风预报也是难点。在风速预报方面,基于 AI 的 STNF 在各类客观方法中整体预报技巧最高,但尚未见关于风向预报的检验评估(陈明轩等,2024),涉及到特殊地形或地貌的局地风预报时,风向往往也是重要因素,未来需要加强有针对性的研发储备。

近岸要素的另一个预报难点是雾(或能见度)。海面或水面雾分布有很大不均匀性,现有业务观测体系在海面或水面的分布较为稀疏,预报员对其分布特征不甚了解,而业务数值模式对雾的精准预报

(沿岸的分布情况)能力更为欠缺。2018 年 6 月 9 日夜间,上海合作组织青岛峰会在位于青岛海滨的青岛国际会议中心开幕,开幕之后在近岸水面进行灯光焰火艺术表演,能见度  $>2 \text{ km}$  时才能达到最佳表演和观赏效果。6 月 6 日夜间到 8 日夜间,青岛海滨时有大雾天气,入夜之后,能见度大多在  $2 \text{ km}$  以下,而数值模式对近岸大雾的预报能力极其有限,甚至包括能见度的日变化也无法体现(图 4)。另外一个困难因素是:9 日傍晚前后,西风槽东移,青岛地区有零星小雨,空气湿度的增加也可能导致 9 日上半夜的能见度更差。

9 日下午,气象保障团队根据“周边能见度在持续好转”以及“近岸盛行风向有所转变,前期导致大雾的静稳形势将会破坏”这两条依据,判断 9 日上半夜近岸地区的能见度将不会如前期一样明显转差,对灯光焰火文艺表演无影响。最终重点时间段的实况能见度维持在  $4 \sim 5 \text{ km}$ (图 4),预报服务取得成功。图 5 为 2018 年 6 月 7—9 日青岛附近海域的可见光云图和 1000 hPa 的高度场及流线分析(基于 EC 模式零场)。从图中可知,7 日上午(图 5a),青岛附近海域的大雾连成片,几乎扩展到整个山东南部沿海海面,到 8 日上午(图 5b),雾区开始分裂为片状,近岸有雾区,海面上的雾区变小,青岛附近海域由偏南风逐渐转变为东南风(图 5d,5e),浅层大气的暖湿平流变弱。到 9 日上午(图 5c),整个海域以层云为主,未见明显雾区,层云以下的能见度也好转(图 4),而此时近岸风场已经转为东北风到东风,更为干冷的空气团逐渐南下,这一天气形势的调整和

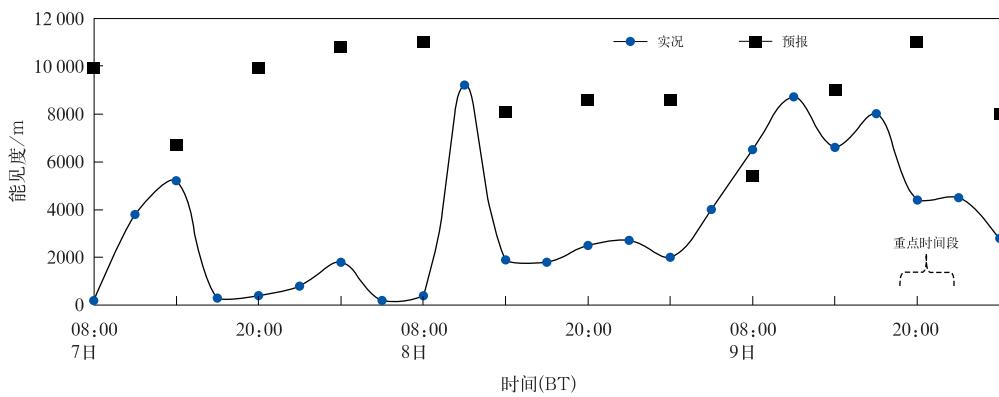


图 4 2018 年 6 月 7—9 日青岛国际会议中心能见度

观测及 EC 模式 6 日 20:00 起报的能见度预报

Fig. 4 The observed visibility at Qingdao International Conference Center from 7 to 9 June and the forecast by EC model initiated at 20:00 BT 6 June 2018

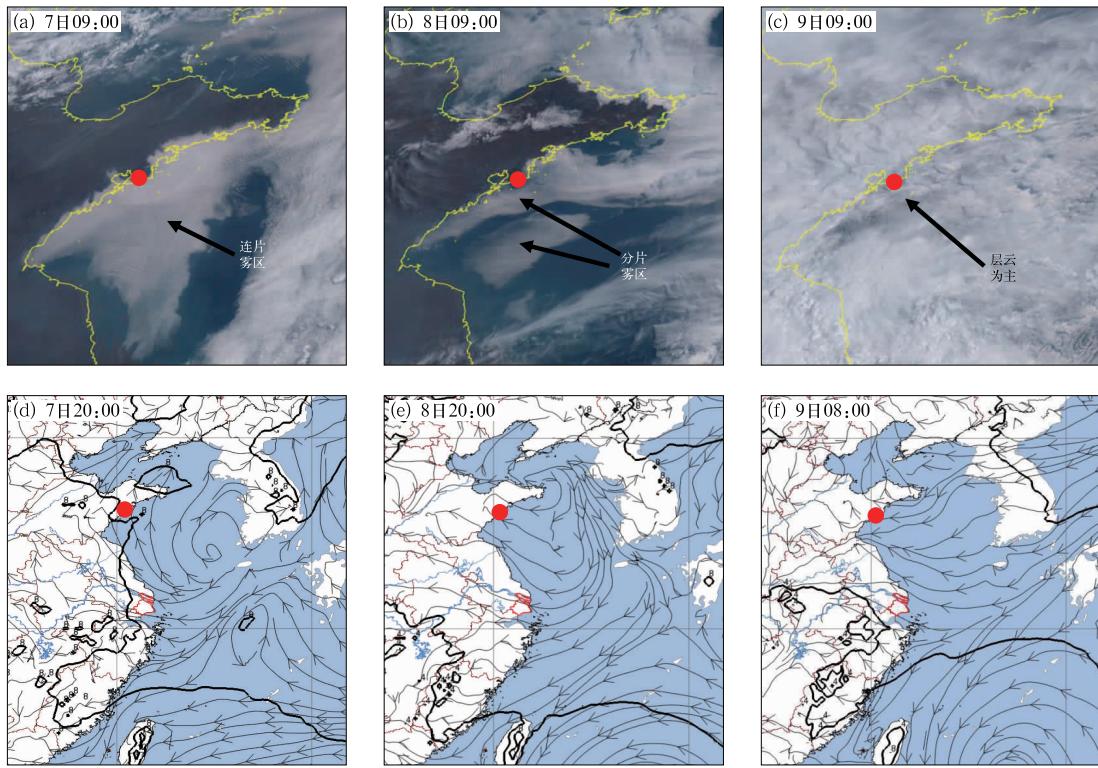


图 5 2018 年 6 月 7—9 日 (a~c) 可见光云图, (d~f) EC 模式 1000 hPa 高度场  
(等值线, 单位: dagpm) 和地面流场(流线)零场

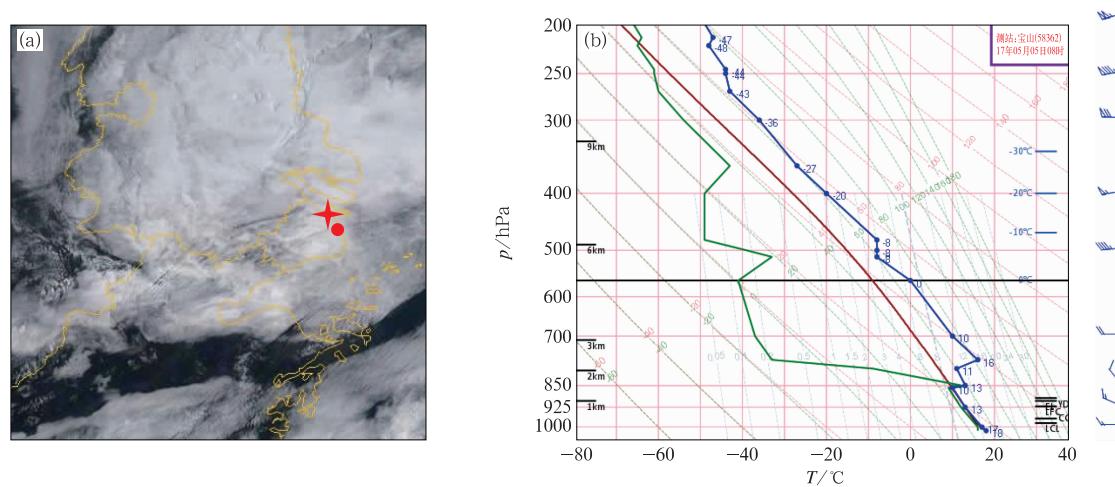
Fig. 5 (a~c) Visible light cloud images, and (d~f) analysis fields of 1000 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and surface streamfield (streamline) forecasted by EC model from 7 to 9 June 2018

雾区的减弱消散对应较好, 增强了预报团队判断“夜间能见度不会明显转差”的信心。

如上所述, 近岸的大雾预报, 现阶段数值模式的预报能力极其有限, 实况分析和预报经验, 尤其是预报员对天气形势演变(本例中主要是考虑低层盛行方向的改变)与大雾过程生消之间相互联系的把握方面, 仍起到很大作用。近年来我国的业务数值系统建设取得了长足进步, 北京冬奥气象服务中心甚至建立了“百米级分钟级”的数值模式系统, 也在山地和冰雪气象的相关要素预报中有较好的表现, 但该系统在山地雾(能见度)预报性能方面的预报技巧有限, 不仅如此, 智慧冬奥天气预报示范计划中的其他客观方法, 技巧均大致接近(陈明轩等, 2024)。这表明对于局地雾的预报, 在未来的重大活动气象保障中, 预报团队结合观测和天气形势分析的预报经验, 仍是保障服务成功的关键。

云的预报也是重大活动保障中常见的特殊需求, 包括定时定点的云底高度、云顶高度和云量预报。2017 年 5 月 5 日下午, 我国大型喷气式客机 C919 在上海浦东国际机场举行首飞试验。作为测

试飞行, 对气象条件的要求较为严格: 无雨, 无雷电活动; 无明显低空风切变, 地面风力<6 级; 能见度>3 km; 云底高于 900 m, 云顶低于 5000 m。当日早晨, 气象条件离测试飞行的要求有较大差距, 尤其是云底高度。云底高度达到 900 m 以上时, 才能保证测试飞机在飞出云层准备降落时, 飞行员有足够的空间来调整飞机状态, 以便平稳降落。图 6 为 2017 年 5 月 5 日 08:00 上海附近的可见光云图、上海宝山站的探空观测。结合上海浦东机场例行天气报告信息, 5 日 08:00, 浦东机场云量较多(5~7 成), 且云底高度仅为 480 m, 离首飞试验要求的 900 m 有较大差距。从宝山站的探空分析看, 上海附近 700 hPa 以下有两层逆温, 其中一层位于 850 hPa 附近, 白天升温之后, 低云云层需要完全消散, 难度很大。预报员根据当日预报的最高气温(23℃)和相应的露点温度(约 16℃), 推断 13:00 之后云底将上升到 900 m 左右, 可以勉强满足首飞试验的要求, 但随着气温下降, 最迟在 15:30 云底又将下落到 600 m 以下, 在此之前, 必须结束首飞试验。最终 C919 首飞执行团队利用了上述时间窗口(图 7), 圆满地完



注:图 a 中圆点为上海浦东国际机场,十字星为宝山站。

图 6 2017 年 5 月 5 日 08:00(a)可见光云图,(b)上海宝山站探空曲线

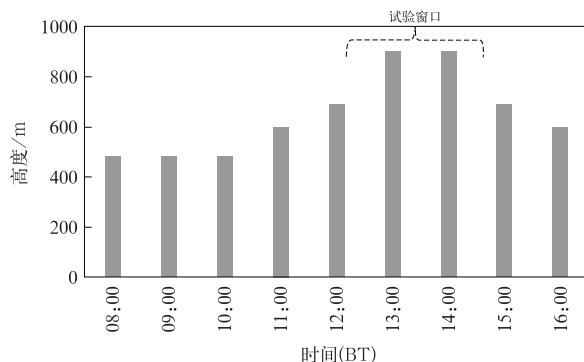
Fig. 6 (a) Visible light cloud image and (b)  $T$ - $\ln p$  at Baoshan Station of Shanghai at 08:00 BT 5 May 2017

图 7 2017 年 5 月 5 日上海浦东国际机场云底高度时间序列

Fig. 7 Time-series of cloud base height at Pudong International Airport in Shanghai on 5 May 2017

成了此次首飞任务。

2019 年 10 月,武汉汉南机场第七届世界军人运动会跳伞比赛对中低云(云底高度在 4000 m 以下)的云底高度和云量有明确要求,云量  $>5$  成就不能比赛,不同的云底高度对应举办不同级别的比赛

项目。数值模式产品及相关的释用方法对云量的预报总体上是较好的,误差大致在 10%~20% (赵文婧等,2015; 2016; 赵中军等,2019; 魏栋等,2023)。难度较大的是云底高度预报,尤其是低云高度。业务中通常采用相对湿度或温度露点差阈值的方法,根据数值模式的相关产品来诊断或判别云底高度 (周毓荃和欧建军,2010; 漆梁波,2012; 李琦等,2021; 赵渊明等,2024),上述方法对较厚的中高云判别效果较好,但对低云高度的判别还有很大局限或不足。表 2 为 2019 年武汉军运会期间现场气象保障组 10 月 5 日 07:00 发布的低云高度预报,当时云底高度的预报主要基于相对湿度阈值法。从表中可以看到,中云云底高度 ( $>1500$  m 以上) 大致还是可以把握的,14:00 之后,实况出现低云,但预报的云底高度仍大于 1500 m,尽管绝对误差不算大,但对于与飞行有关的气象保障而言就显得支撑不足。

近年来,云底高度数值预报产品逐渐在业务中得到应用。民航气象服务关注的低云云底主要为 100 m 以下,这涉及到较复杂的边界层和下垫面物理过程,可预报性更低,几乎未见有相关的检验结果

表 2 2019 年 10 月 5 日武汉汉南机场云底高度(单位:m)预报和实况对比

Table 2 Comparison of forecast and observation of cloud base height (unit: m) at Hannan Airport in Wuhan on 5 October 2019

| 时间(BT) | 08:00   | 11:00   | 14:00 | 17:00 | 20:00 |
|--------|---------|---------|-------|-------|-------|
| 预报     | 3000    | 1992    | 2003  | 1980  | 1913  |
| 实况     | $>1500$ | $>1500$ | 900   | 1200  | 1200  |

发表。对于 100 m 以上的低云云底高度预报,尽管不是公共气象服务的基本要素,但重大气象服务保障中经常涉及,相关的检验和评估工作已经在陆续开展。大样本的检验结果和业务应用的基本经验是大致吻合的,即:模式倾向于高估低云云底高度,而低估中高云云底高度(李丹等,2024)。现阶段低云云底高度预报在技术路线上仍是将数值模式预报和有经验的预报员主观分析及订正相结合。

从前文的分析不难看出,对于“定时定点的特殊天气预报”,相关要素受局地地形地貌影响很大,现阶段由于观测覆盖度不足、数值模式预报能力欠佳、针对性的客观预报方法缺少,无论是短期还是短时临近阶段,预报团队基于数值模式预报的天气形势和预报经验研判及基于实况资料的综合分析,是保障服务成功的关键。其中对天气形势的研判方面,前文所列个例主要涉及低层盛行风向风力的分析,但不同的要素预报需求在不同地区分析的重点又各有不同(田庆明等,2009),需要预报员结合天气学基本原理和观测资料进行合理的归纳,这一点在 1.3 节中还有涉及。

### 1.3 海外重大活动专项预报

随着我国综合国力的增强和“一带一路”倡议的实施,中国气象局也在不断提升全球监测、预报、服务的能力,为国家领导人的海外访问、海外重大建设工程和海外重大赛事提供精细化气象服务保障。2021 年 7 月,中国气象局首次成立奥运会气象服务保障专家组,全程为参加东京奥运会的中国代表团提供远程精细化气象服务,海南省气象局也成立远程保障团队为中国奥运帆船队提供专门气象保障。此后的 2024 年巴黎奥运会,中国气象局也成立专门团队进行远程气象保障。这些海外气象保障服务为我国运动健儿取得佳绩做出了积极贡献。

2023 年 11 月底至 12 月初,应所罗门群岛国家气象局请求,中国气象局派出 6 名专家赴当地进行第 17 届太平洋运动会的开闭幕式气象保障。这是中国气象局首次派出专家到现场进行海外重大活动气象保障。所罗门群岛位于南半球的大洋洲地区( $6^{\circ}\sim 12^{\circ}\text{S}$ 、 $155^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$ ),属于热带雨林气候,全年炎热,年降水量在  $3000\sim 3500\text{ mm}$ 。此次运动会在所罗门群岛首都霍尼拉市举办,霍尼拉市位于群岛的最大岛屿——瓜达尔卡纳尔岛(以下简称瓜岛)西北侧沿海地带。这次任务充分体现了海外气象保障的各种困难:首先是观测缺乏,整个岛上无气

象雷达,只有 1~2 个地面观测站可用,且不在场馆附近;其次是当地没有基于站点或格点的客观要素预报方法,预报员没有任何定时定点定量预报的经验(日常主要制作群岛各岛屿的区域天气预报);第三,没有区域数值模式产品可以参考;另外,专家组成员对南半球热带地区天气预报的经验也不足。专家组成员抵达后,迅速收集当地有限的观测资料,并开始逐日多次记录天气现象观测信息。通过对过去 7 天天气过程的回顾,专家组总结出影响霍尼拉市天气演变的 6 个主要因素:天气系统、大气平均湿度、主导风向、对流日变化、地形、海陆风。在上述基础上,归纳出霍尼拉市天气预报的基本逻辑和决策流程图(图 8,图 9)。

依据上述基本逻辑和决策流程图,结合中国气象局的风云快扫产品和应急部署运行的两套高分辨率数值模式(范围限定在所罗门群岛区域,分辨率均为 3 km),现场专家组和后方支撑团队紧密配合,为该届太平洋运动会的开闭幕式提供了精准的气象服务保障。

在这次海外重大活动保障中,观测资料、精准预报支撑技术和本地预报经验极度缺乏,风云快扫产品和紧急部署的高分辨率数值模式产品提供了有力支撑,但预报团队基于观测和天气学基本原理综合归纳得到当地天气预报基本逻辑和决策流程则是至关重要的环节,其中天气形势的研判和分析主要考虑是否存在热带云团、低压或气旋影响以及中层大气的潮湿程度和盛行风,这一点和 1.2 节中的天气形势研判和分析又有所不同。这意味着在不同的重大活动气象保障中,预报员作用的发挥很大程度取决于能否研判出影响目标要素演变的关键天气形势因子。

## 2 结论与讨论

通过近 20 年我国重大活动气象保障的预报服务难点回顾,不难看出,预报服务需求实质上就是三维全要素的精准预报,这也是新时代预报员业务预报内容的要求。从服务场景看,可分为两个方面。

第一是“定时定点”常规天气要素预报(降水、气温、风等)以保障各类庆典仪式的顺利开展,预报难点主要是“对流生消”或“弱降水有无”。这方面的需求应对,随着我国观测系统、数值模式系统、AI 模型和预报员综合素质的提升,通过递进式预报服务流程,在和用户充分沟通的情况下,气象保障总体是能发挥应有效力的。短期时段内,数值模式提供的天

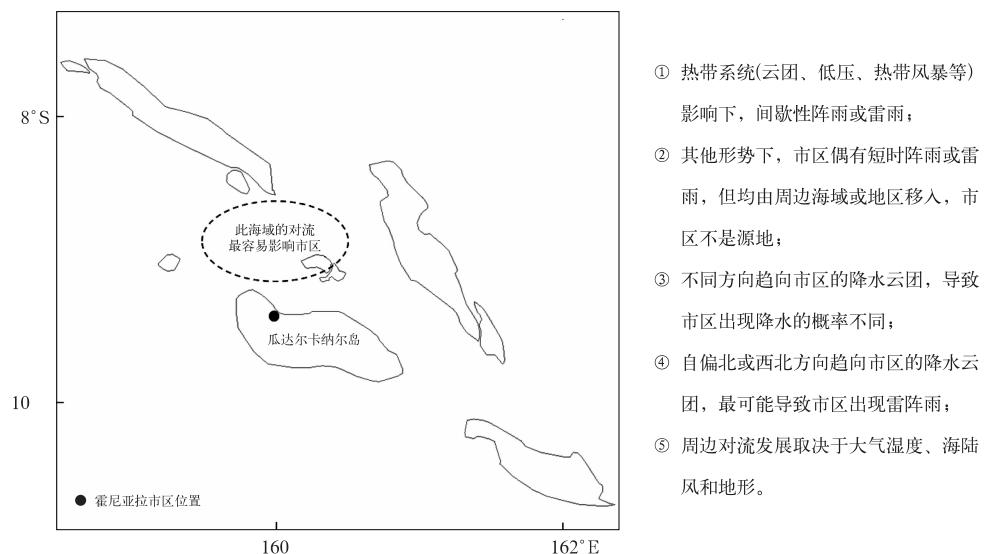


图 8 2023 年太平洋运动会现场气象保障专家组总结的霍尼拉市天气预报基本逻辑

Fig. 8 The basic logic of the weather forecast summarized by the on-site meteorological service expert group of Pacific Games for Honiara City in 2023

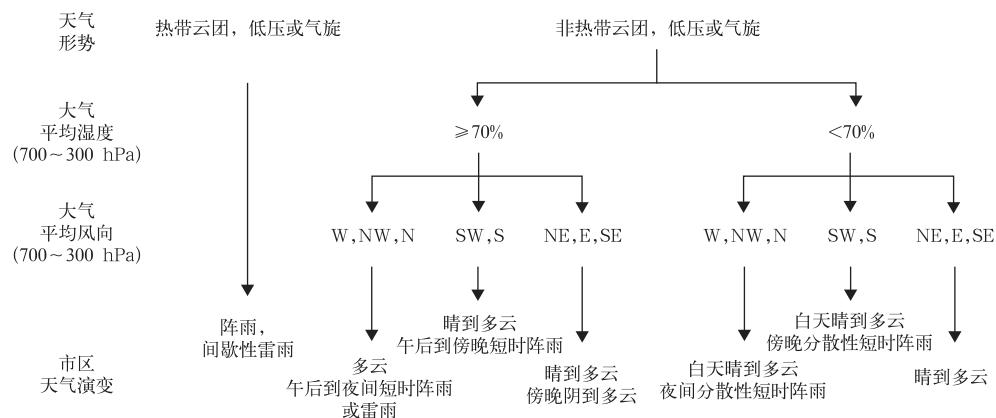


图 9 2023 年太平洋运动会现场气象保障专家组归纳的霍尼拉市天气预报决策流程图

Fig. 9 Decision flowchart of weather forecast summarized by the on-site meteorological service expert group of Pacific Games for Honiara City in 2023

气形势预报仍是重要决策依据,尤其是数值模式关于中层大气的槽脊活动和低层流型或气压场演变的预报,此外,高分辨数值模式在设计上具有更准确描述对流活动的优势,对弱降水的技巧也更高,其相关产品的支撑也是必不可少的;短时或临近阶段,观测资料和预报团队的综合分析能力则更为重要,当然,如果观测和模式系统缺失(类似前述的所罗门群岛太平洋运动会保障),预报团队的能力就显得至关重要,包括天气形势分析能力扎实、归纳和总结能力强等,在海外现场重大活动气象保障中外语沟通能力也极其重要。

第二是“定时定点”特殊天气要素预报,比如近岸(或复杂地形)风、能见度、低云高度等。对于这些要素,现有观测系统的观测覆盖不足或精度不够,数值模式系统的预报能力有限,同时由于其并非常规预报业务的内容,预报员的预报经验也有限。这方面的预报难点应对,无论是短期还是短时临近阶段,预报团队基于数值模式预报的天气形势研判(包括经验)和基于实况资料的综合分析是保障服务成功的关键,而预报员作用的发挥,很大程度取决于能否研判出影响目标要素演变的关键天气形势因子。

随着数值模式和客观方法性能提升,对特殊天

气要素(局地风、云要素和局地雾)的预报精度也将提高,预报团队的作用也会变弱,目前的“特殊天气要素服务场景”将逐渐转变为“常规天气要素服务场景”,预报团队的主导作用也将逐渐过渡到短时或临近阶段。比如云底和云顶高度的判断,现阶段业务普遍采用相对湿度或温度露点差阈值法,这些方法的物理基础并不充分(云的形成显然不仅仅依赖相对湿度)。数值模式中云(量)的诊断,包含相对湿度、云水和云冰凝结量(张帅等,2024),物理基础更为合理,随着模式分辨率提升和云物理方案完善,其对云要素的直接预报或诊断结果会越来越精确,包括前文提及的近岸风和能见度。

### 3 未来展望

未来 5~10 年,是我国实现 2035 年远景目标的关键期,可以预期各类重大活动(国内或国外)将对气象保障提出越来越高的要求。从前文的回顾和分析看,重大活动气象保障还需要加强以下四方面的工作:

(1)加强三维全要素的观测和分析。如前所述,重大活动气象保障要求预报员有三维全要素预报能力。预报的基础是观测信息,没有相应观测,不管是客观预报(数值模式或 AI)还是预报员主观预报,要提高三维全要素预报能力都是非常困难的。近几年,随着激光雷达和云雷达等观测系统投入使用,对近岸能见度和云底云高的观测信息开始增多,精度也在不断提升(马强等,2022;胡树贞等,2022;张婷等,2024),这些观测信息的不断补充和积累,是提升三维全要素预报能力的重要基础。但近岸风的观测(离岸 1~3 km、受海陆环流影响明显的区域)仍亟待加强,现阶段仍缺乏有力的观测手段。在缺少观测的情况下,数值模式等客观方法的预报性能评估也很难开展,进而会严重影响此类要素的预报能力。

(2)数值模式支撑能力的提升,尤其是区域高分辨率数值模式(包括集合预报)(朱跃建等,2025)。重大活动气象保障对预报精准度要求更高,因此更高分辨率数值模式系统的研发是必不可少的(沈学顺等,2025)。目前中国气象局的数值模式系统已经进入“百米级分钟级”,但这些系统的场景适应性和对特殊要素(近岸风、局地能见度等)的预报能力还需要大量的检验和改进(陈明轩等,2025)。数值模式

支撑能力的提升,还包含快速移植和部署能力。2023 年第 17 届太平洋运动会期间,中国气象局地球系统数值预报中心和广东省气象局分别针对所罗门群岛区域移植运行了分辨率为 3 km 的区域数值模式,由于时间仓促和任务周期短,对模式范围的选择、模式物理过程的调教、当地资料的同化过程以及模式性能的评估等工作均未能系统性地总结。随着我国“一带一路”倡议不断深入推进,相信未来会有更多的海外重大活动需要中国气象局的现场或远程气象保障,从未雨绸缪的角度,需要对在海外快速移植运行高分辨率模式,进行技术预案设计和演练。

(3)加强针对特殊要素和特殊场景的客观预报方法研发。近几年,AI 技术在气象预报的多个方面均进展迅速,中国气象局也在 2024 年 6 月发布短时临近预报模型“风雷”、短期和中期预报模型“风清”以及气候预测模型“风顺”,并组织开展全国范围的 AI 气象模型示范比较计划(金荣花等,2025)。AI 技术或 AI 模型在处理多要素决策、非线性问题、计算效率等方面,较传统的统计方法甚至数值模式有明显优势(代刊等,2025)。基于 AI 技术的 STNF 在北京冬奥会、杭州亚运会等重大活动中已经体现出较其他客观释用方法更好的预报技巧。但 AI 模型对于特殊要素(如局地能见度和风向)的提升技巧仍有限。另外,在重大活动中最为关注的极端和转折性天气中,AI 模型尚不能体现独特优势,甚至包括在临近预报阶段。中国气象局(2023)对 2023 年成都大运会开幕式天气的预报检验表明,在短时临近阶段,各客观方法(包括基于 AI 技术的)均无法合理预报开幕式当天局地对流的生消。现有的 AI 技术或 AI 模型主要还是基于全要素和全场景进行训练,能够整体提高平均技巧,但不能保证某些特殊要素(能见度、风向、云要素等)的预报技巧提高,也无法适合一些特殊场景(水陆交界、复杂山地等)。因此,需要加强针对特殊要素和特殊场景的 AI 预报方法研发,以便在未来的“定时定点的特殊天气要素预报”中能发挥更大支撑作用。

(4)高素质预报员队伍的建设。重大活动的气象保障,科技支撑固然关键,但决定性因素还是预报员的综合能力,这主要指:学习能力、归纳能力和沟通能力。学习能力就是不断学习新知识和应用新知识的能力,包括学习新型观测资料,积累各种特殊要素的演变规律、学习新技术,比如高分辨数值模式和 AI 技术,了解这些新技术对对流生消和特殊要素的

预报能力等;归纳能力就是能基于天气学基本原理和新技术新资料应用经验,综合归纳出精准预报结论,这其中很重要的能力就是研判出影响目标要素演变的关键天气形势因子;沟通能力则包括与其他专家、决策者以及终端用户的顺畅沟通水平,如果是海外活动,还需要较强的外语沟通能力。只有具备上述能力,才能驾驭最新的观测和技术,成为重大活动气象保障中关键而不可替代的角色。

**致谢:**感谢国家气象中心张涛首席、陈涛首席及北京市气象台张琳娜首席的支持。

## 参考文献

陈敏,仲跻芹,卢冰,等,2023. CMA-BJ 2.0 版逐时快速更新追赶循环同化预报系统研发及应用 I: 资料同化及系统构建[J]. 气象学报,81(6):911-925. Chen M, Zhong J Q, Lu B, et al, 2023. On the CMA-BJ v2.0 hourly rapid update catch-up cycling assimilation and forecast system Part I : data assimilation and system attributes[J]. Acta Meteor Sin,81(6):911-925(in Chinese).

陈明轩,宋林烨,杨璐,等,2025.“百米级、分钟级”短时临近预报技术的进展与展望——以睿思(RISE)发展路径为例[J]. 气象,51(11):1433-1454. Chen M X, Song L Y, Yang L, et al, 2025. Progress and prospect of the “100-meter-scale, minute-level update” nowcasting technology—a case study of the RISE development path[J]. Meteor Mon, 51 (11): 1433-1454 (in Chinese).

陈明轩,肖现,高峰,2017. 出流边界对京津冀地区强对流局地新生及快速增强的动力效应[J]. 大气科学,41(5):897-917. Chen M X, Xiao X, Gao F, 2017. Dynamical effect of outflow boundary on localized initiation and rapid enhancement of severe convection over Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Chin J Atmos Sci,41(5):897-917(in Chinese).

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. Chen M X, Yang L, Qin R, et al, 2024. Operation and evaluation of SMART2022-FDP[J]. Trans Atmos Sci,47(3):361-375(in Chinese).

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

代华光,德吉白珍,罗布坚参,等,2021. 2020 年 5 月珠峰登山气象条件分析及数值预报模式释用[J]. 高原科学研究,5(4):10-15. Dai H G, Deji B Z, Luobu J C, et al, 2021. Analysis on the meteorological conditions and interpretation of numerical prediction model during the Everest mountaineering in May 2020[J]. Plateau Sci Res,5(4):10-15(in Chinese).

代刊,杨绚,周康辉,等,2025. 深度学习在数字智能天气预报中的应用[J]. 气象,51(11):1477-1494. Dai K, Yang X, Zhou K H, et al, 2025. Application of deep learning in digital intelligent weather forecasting[J]. Meteor Mon,51(11):1477-1494(in Chinese).

董林,张明英,郭虎,等,2008. 北京奥运会开幕式天气预报难点的初步分析[J]. 气象,34(S1):9-15,303. Dong L, Zhang M Y, Guo H, et al, 2008. Preliminary analysis of the difficulties in weather forecasting for the opening ceremony of the Beijing Olympic Games[J]. Meteor Mon, 34(S1):9-15,303(in Chinese).

端义宏,2010. 中央气象台天气预报服务业务的过去、现在和将来[J]. 气象,36(7):5-11. Duan Y H, 2010. The past, present and future for the weather operational forecasts of the Central Meteorological Office[J]. Meteor Mon, 36(7):5-11(in Chinese).

范水勇,陈敏,仲跻芹,等,2009. 北京地区高分辨率快速循环同化预报系统性能检验和评估[J]. 暴雨灾害,28(2):119-125. Fan S Y, Chen M, Zhong J Q, et al, 2009. Performance tests and evaluations of Beijing local high-resolution rapid update cycle system [J]. Torr Rain Dis, 28(2):119-125(in Chinese).

傅娜,陈葆德,谭燕,等,2013. 基于快速更新同化的滞后短时集合预报试验及检验[J]. 气象,39(10):1247-1256. Fu N, Chen B D, Tan Y, et al, 2013. Time-lag ensemble forecasting experiment and evaluation based on SMB-WARR[J]. Meteor Mon, 39(10): 1247-1256(in Chinese).

何立富,王遂缠,张志刚,2010. 珠穆朗玛峰地区气象要素特征观测研究[J]. 应用气象学报,21(6):641-648. He L F, Wang S C, Zhang Z G, 2010. Observational study on characteristics of meteorological elements in Mountain Qomolangma Region[J]. J Appl Meteor Sci,21(6):641-648(in Chinese).

何娜,丁青兰,俞小鼎,等,2020. 北京及周边地区雷暴阵风锋特征统计分析[J]. 气象学报,78(2):250-259. He N, Ding Q L, Yu X D, et al, 2020. Statistical analysis of thunderstorm gust front characteristics in Beijing and surrounding areas[J]. Acta Meteor Sin,78(2):250-259(in Chinese).

何娜,俞小鼎,丁青兰,等,2023. 北京地区雷暴阵风锋触发对流新生的环境场特征分析[J]. 高原气象,42(5):1285-1297. He N, Yu X D, Ding Q L, et al, 2023. Analysis of environmental field characteristics of convective initiation triggered by thunderstorm gust fronts in Beijing Area[J]. Plateau Meteor, 42 (5): 1285-1297(in Chinese).

胡树贞,王志成,张雪芬,等,2022. 毫米波雷达海雾回波特征分析及能见度反演[J]. 气象,48(10):1270-1280. Hu S Z, Wang Z C, Zhang X F, et al, 2022. Analysis of sea fog echo characteristics and visibility inversion of millimeter-wave radar[J]. Meteor Mon, 48(10):1270-1280(in Chinese).

黄容,漆梁波,李庆宝,等,2008. 青岛近海夏季海风分型及预报[J]. 气象,34(S1):223-229. Huang R, Qi L B, Li Q B, et al, 2008. Classification and forecasting of summer sea breezes near Qingdao[J]. Meteor Mon, 34(S1):223-229(in Chinese).

纪彬,何静,张迎新,等,2020. 北京地区两条线状对流相继下山发展的边界层条件对比研究[J]. 气象,46(5):643-654. Ji B, He J, Zhang Y X, et al, 2020. Study on two successive downhill line convective developments developing on different boundary layer conditions in

Beijing Area[J]. Meteor Mon, 46(5):643-654(in Chinese).

金荣花,曹勇,赵瑞霞,等,2025. 中央气象台智能数字天气预报业务的技术进展[J]. 气象, 51(11):1321-1334. Jin R H, Cao Y, Zhao R X, et al, 2025. Technological advances in the intelligent digital weather forecasting operational system of National Meteorological Centre[J]. Meteor Mon, 51(11):1321-1334(in Chinese).

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

雷蕾,孙继松,王国荣,等,2012. 基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验[J]. 气象学报, 70(4):752-765. Lei L, Sun J S, Wang G R, et al, 2012. An experimental study of the summer convective weather categorical probability forecast based on the rapid updated cycle system for the Beijing Area (BJ-RUC)[J]. Acta Meteor Sin, 70(4):752-765 (in Chinese).

李丹,刘玉芝,邵彬彬,等,2024. 利用地面观测评估 ERA5 云底高度产品[J]. 大气科学, 48(2):735-744. Li D, Liu Y Z, Shao T B, et al, 2024. Assessment of the cloud base height product from ERA5 reanalysis using ground-based observations[J]. Chin J Atmos Sci, 48(2):735-744(in Chinese).

李琦,蔡森,周毓荃,等,2021. 基于探空云识别方法的云垂直结构分布特征[J]. 大气科学, 45(6):1161-1172. Li Q, Cai M, Zhou Y Q, et al, 2021. Characteristics of cloud vertical distribution based on cloud identification by radiosonde[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6):1161-1172(in Chinese).

李庆宝,孙桂平,张苏平,等,2008. 青岛奥帆赛场浮标站弱风成因[J]. 气象, 34(S1):64-73. Li Q B, Sun G P, Zhang S P, et al, 2008. Analysis of weak wind causes at the buoy station of the Qingdao Olympic Sailing Venue[J]. Meteor Mon, 34(S1):64-73 (in Chinese).

廖晓农,2013. 华北秋季强弱线型对流发展时天气尺度环境条件探讨[J]. 气象, 39(3):291-301. Liao X N, 2013. A discussion on the synoptic condition for the autumn linear convection developing in Huabei Area[J]. Meteor Mon, 39(3):291-301(in Chinese).

廖晓农,魏东,石增云,等,2011. 连续少雨背景下北京暴雨的若干特征[J]. 高原气象, 30(3):749-759. Liao X N, Wei D, Shi Z Y, et al, 2011. Some characteristics of torrential rain events during continuous drought period in Beijing[J]. Plateau Meteor, 30(3):749-759(in Chinese).

林之光,1996. 气象与体育——1996 年世界气象日主题[J]. 气象, 22(3):17-21. Lin Z G, 1996. Meteorology and sports—the world meteorological day in 1996 [J]. Meteor Mon, 22(3):17-21 (in Chinese).

马强,陶法,茆佳佳,等,2022. 激光雷达和毫米波雷达探测海雾回波的对比分析[J]. 气象水文海洋仪器, 39(2):9-11,15. Ma Q, Tao F, Mao J J, et al, 2022. Comparison and analysis of sea fog echo detected by lidar and millimeter wave radar[J]. Meteor Hydrol Marine Inst, 39(2):9-11,15(in Chinese).

马小娇,陈敏,黄向宇,等,2023. 百米级气象数值模拟研究进展与展望[J]. 地球物理学报, 66(5):1911-1930. Ma X J, Chen M, Huang X Y, et al, 2023. Hectometer scale meteorological numerical simulation: a systematic literature review and future development trends[J]. Chin J Geophys, 66(5):1911-1930 (in Chinese).

漆梁波,2012. 我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点[J]. 气象, 38(7):769-778. Qi L B, 2012. Formation mechanism and forecast on freezing rain and ice pellet in winter of China [J]. Meteor Mon, 38(7):769-778(in Chinese).

漆梁波,2015. 高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务应用进展[J]. 气象, 41(6):661-673. Qi L B, 2015. Operational progress of high-resolution numerical model on severe convective weather warning[J]. Meteor Mon, 41(6):661-673(in Chinese).

钱浩,沈文强,马昊,2023. 国家级精细化站点预报技术(STNF)在 2023 杭州亚运会中的应用研究[C]//精彩亚运 数智气象——亚洲气象保障服务技术交流会论文汇编. 杭州:浙江省气象台:5. Qian H, Shen W Q, Ma H, 2023. Application research of the national refined site forecasting technology (STNF) in the 2023 Hangzhou Asian Games[C]//Splendid Asian Games, Intelligent Meteorology—Proceedings of the Asia Meteorological Support Service Technology Exchange Meeting. Hangzhou: Zhejiang Provincial Meteorological Observatory:5(in Chinese).

上海市地方志编纂委员会,2021. 上海市志·气象分志:1978—2010 [M]. 上海:上海人民出版社:323-324. Shanghai Local Chronicles Compilation Committee, 2021. Shanghai Municipal Annals · Meteorological Annals: 1978 — 2010 [M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House:323-324(in Chinese).

沈学顺,苏勇,李兴良,等,2025. 中国业务数值天气预报自主发展中的理论和方法创新[J]. 气象, 51(11):1293-1320. Shen X S, Su Y, Li X L, et al, 2025. Innovation of theory and methodology in the independent development of operational numerical weather prediction in China[J]. Meteor Mon, 51(11):1293-1320(in Chinese).

唐文苑,郑永光,2019. 基于快速更新同化数值预报的小时降水量时间滞后集合订正技术[J]. 气象, 45(3):305-317. Tang W Y, Zheng Y G, 2019. Improvement of hourly precipitation forecast using a time-lagged ensemble based on rapid refresh assimilation and forecast[J]. Meteor Mon, 45(3):305-317(in Chinese).

田庆明,马廷德,杜岩,2009. 酒泉地区高空风速分布特征及影响因素[J]. 干旱区研究, 26(5):671-675. Tian Q M, Ma T D, Du Y, 2009. Analysis on spatial distribution and affecting factors of high-altitude wind velocity over the Jiuquan Region[J]. Arid Zone Res, 26(5):671-675(in Chinese).

魏栋,沙宏娥,秦豪君,等,2023. 西北中东部 ECMWF-HR 云量预报产品与 FY-2G 云量产品的对比[J]. 干旱气象, 41(3):483-490. Wei D, Sha H E, Qin H J, et al, 2023. Comparison of cloud products of ECMWF-HR and FY-2G satellite in the central and eastern parts of Northwest China[J]. J Arid Meteor, 41(3):483-490 (in Chinese).

魏东,杨波,廖晓农,等,2008. 2008 年北京奥运会期间降水天气及其

环流形势分析[J]. 气象, 34(S1): 93-99. Wei D, Yang B, Liao X N, et al, 2008. Analysis of precipitation weather and circulation patterns during the 2008 Beijing Olympic Games[J]. Meteor Mon, 34(S1): 93-99(in Chinese).

吴进, 李琛, 于波, 等, 2018. 两类短时强降水天气边界层气象要素变化特征[J]. 气象, 44(7): 902-910. Wu J, Li C, Yu B, et al, 2018. Study on the variation characteristics of meteorological elements in the boundary layer of two types of short-time heavy rainfall [J]. Meteor Mon, 44(7): 902-910(in Chinese).

邢楠, 仲跻芹, 雷蕾, 等, 2023. 基于 CMA-BJ 的北京地区短时强降水预报试验[J]. 应用气象学报, 34(6): 641-654. Xing N, Zhong J Q, Lei L, et al, 2023. A probabilistic forecast experiment of short-duration heavy rainfall in Beijing based on CMA-BJ[J]. J Appl Meteor Sci, 34(6): 641-654(in Chinese).

熊亚军, 廖晓农, 于波, 等, 2012. 基于天气分型的北京地区雷电潜势预报预警系统[J]. 灾害学, 27(2): 67-71, 81. Xiong Y J, Liao X N, Yu B, et al, 2012. Warning and forecast system of potential thunderstorm based on weather patterns in Beijing[J]. J Catastrophol, 27(2): 67-71, 81(in Chinese).

徐同, 李佳, 杨玉华, 等, 2016. SMS-WARMS V2.0 模式预报效果检验[J]. 气象, 42(10): 1176-1183. Xu T, Li J, Yang Y H, et al, 2016. Verification of SMS-WARMS V2.0 model forecast results [J]. Meteor Mon, 42(10): 1176-1183(in Chinese).

杨波, 孙继松, 魏东, 2010. 北京奥运会开幕式期间的中尺度天气系统研究[J]. 应用气象学报, 21(2): 164-170. Yang B, Sun J S, Wei D, 2010. Meso-scale weather systems during the opening ceremony of Beijing Olympic Games[J]. J Appl Meteor Sci, 21(2): 164-170(in Chinese).

杨绚, 代刊, 朱跃建, 2022. 深度学习技术在智能网格天气预报中的应用进展与挑战[J]. 气象学报, 80(5): 649-667. Yang X, Dai K, Zhu Y J, 2022. Progress and challenges of deep learning techniques in intelligent grid weather forecasting[J]. Acta Meteor Sin, 80(5): 649-667(in Chinese).

杨育强, 高荣珍, 马艳, 等, 2008. 海面风精细化集成预报系统在青岛奥帆赛期间的应用[J]. 气象, 34(S1): 241-245. Yang Y Q, Gao R Z, Ma Y, et al, 2008. Application of a refined sea surface wind integrated forecasting system during the Qingdao Olympic Sailing Regatta[J]. Meteor Mon, 34(S1): 241-245(in Chinese).

张帅, 吴捷, 陈敏, 等, 2024. CMA-BJ 系统总云量预报性能检验评估[J]. 气象, 50(9): 1057-1070. Zhang S, Wu J, Chen M, et al, 2024. Verification and evaluation of total cloud cover prediction performance of CMA-BJ[J]. Meteor Mon, 50(9): 1057-1070(in Chinese).

张涛, 郑永光, 毛旭, 等, 2018. 2016 年 9 月 4 日下午“杭州 G20 峰会”期间短时阵雨天气成因与预报难点[J]. 气象, 44(1): 42-52. Zhang T, Zheng Y G, Mao X, et al, 2018. Mechanism and forecasting difficulties of the afternoon convective shower on 4 September 2016 during the period of “Hangzhou G20 Summit” [J]. Meteor Mon, 44(1): 42-52(in Chinese).

张婷, 胡树贞, 陶法, 等, 2024. 地基云雷达与 FY-4A 卫星云顶高度联合反演方法[J]. 气象, 50(7): 859-867. Zhang T, Hu S Z, Tao F, et al, 2024. Joint inversion of cloud top height based on ground-based millimeter-wave cloud radar and FY-4A satellite[J]. Meteor Mon, 50(7): 859-867(in Chinese).

张文龙, 崔晓鹏, 黄荣, 等, 2019. 北京“623”大暴雨的强降水超级单体特征和成因研究[J]. 大气科学, 43(5): 1171-1190. Zhang W L, Cui X P, Huang R, et al, 2019. An investigation of the characteristics and mechanism of the high precipitation supercell in the Beijing “623” severe rainstorm[J]. Chin J Atmos Sci, 43(5): 1171-1190(in Chinese).

张文龙, 崔晓鹏, 王迎春, 等, 2013. 对流层低层偏东风对北京局地暴雨的作用[J]. 大气科学, 37(4): 829-840. Zhang W L, Cui X P, Wang Y C, et al, 2013. Roles of low-level easterly winds in the local torrential rains of Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 37(4): 829-840(in Chinese).

张晓东, 黄健, 孙喜艳, 等, 2012. 2009 年 11 月汕尾红海湾海面风场的观测分析[J]. 热带气象学报, 28(3): 399-408. Zhang X D, Huang J, Sun X Y, et al, 2012. An observational study of sea surface wind field at Red Bay, Shanwei in November, 2009[J]. J Trop Meteor, 28(3): 399-408(in Chinese).

张志刚, 秦翔, 何立富, 等, 2011. 2007 年 5—6 月珠峰北坡不同高度气象要素特征分析[J]. 气象, 37(8): 977-983. Zhang Z G, Qin X, He L F, et al, 2011. Observation study on different elevation meteorological element features on the northern slope of Mountain Qomolangma during May—June 2007[J]. Meteor Mon, 37(8): 977-983(in Chinese).

赵文婧, 李文才, 赵中军, 等, 2016. 基于模式输出统计预报方法的云量精细化预报[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 52(4): 479-483. Zhao W J, Li W C, Zhao Z J, et al, 2016. A study on detailed forecast of cloud cover by the model output statistics method [J]. J Lanzhou Univ (Nat Sci), 52(4): 479-483(in Chinese).

赵文婧, 赵中军, 尚可政, 等, 2015. 云量时间精细化预报研究——以榆中为例[J]. 气象与环境学报, 31(1): 60-66. Zhao W J, Zhao Z J, Shang K Z, et al, 2015. Refined forecast of cloud cover based on a case study in Yuzhong[J]. J Meteor Environ, 31(1): 60-66 (in Chinese).

赵晓妮, 冯子晏, 叶芳璐, 等, 2021-07-02(A2). 汇聚气象之力 致敬百年华诞——中国共产党成立 100 周年庆祝活动气象服务保障纪实[N]. 中国气象报. Zhao X N, Feng Z Y, Ye F L, et al, 2021-07-02(A2). Gathering meteorological strength to celebrate the centenary—A record of meteorological service support for the celebration activities marking the 100th anniversary of the founding of the Communist Party of China[N]. China Meteorological News(in Chinese).

赵渊明, 漆梁波, 2021. 短时强降水概率预报的多模式集成技术研究[J]. 气象, 47(5): 529-538. Zhao Y M, Qi L B, 2021. Multi-model integration technology for probabilistic forecasting of short-time severe rainfall[J]. Meteor Mon, 47(5): 529-538(in Chinese).

赵渊明, 孙静, 漆梁波, 等, 2024. 基于 L 波段探空观测的 FY-4A 云顶温度产品评估及其在冬季降水相态判识中的应用[J]. 气象, 50(1): 59-70. Zhao Y M, Sun J, Qi L B, et al, 2024. Evaluation of FY-4A cloud top temperature product based on L-band radiosonde

data and its application in winter precipitation type identification [J]. Meteor Mon, 50(1): 59-70(in Chinese).

赵中军,靳双龙,刘晓琳,等,2019.环渤海地区云量的精细化预报方法[J].兰州大学学报(自然科学版),55(4):541-548. Zhao Z J, Jin S L, Liu X L, et al, 2019. A fine method forecasting cloud cover around the Bohai Sea[J]. J Lanzhou Univ (Nat Sci), 55 (4):541-548(in Chinese).

中国气象局,2023.全国高影响天气监测预报服务技术复盘(2023) [M].北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 2023. National Review of High-Impact Weather Monitoring and Forecasting Service Technologies (2023) [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).

周毓荃,欧建军,2010.利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J].气象,36(11):50-58. Zhou Y Q, Ou J J, 2010. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research[J]. Meteor Mon, 36 (11): 50-58(in Chinese).

朱跃建,代刊,唐健,2025.减少预报不确定性,提高预报能力——集合预报的发展和应用[J].气象,51(11):1335-1352. Zhu Y J, Dai K, Tang J, 2025. Reducing forecast uncertainty and improving forecasting capability—a review of the development and application of ensemble prediction[J]. Meteor Mon, 51(11):1335-1352 (in Chinese).

Persson A, 2020. Right for the wrong reason?: a new look at the 6 June 1944 D-Day Forecast by a Neutral Swede[J]. Bull Amer Meteor Soc, 101(7):E993-E1006.

Wilson J W, Feng Y R, Chen M, et al, 2010. Nowcasting challenges during the Beijing Olympics: successes, failures, and implications for future nowcasting systems[J]. Wea Forecasting, 25 (6): 1691-1714.

(本文责编:张芳)