

中央气象台航空气象预报技术系统进展

杨波 蔡雪薇 刘鑫华 周康辉 张小玲 林隐静 毛旭 万子为

(国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 航空气象预报技术是天气预报技术中涵盖范围最广、技术难点最多、要求最高的集成技术之一。国家气象中心基于气象大数据云平台与智能网格技术, 面向抢险救灾、国防安全、民用航空、通用航空等需求初步建立了航空气象预报服务咨询技术体系。重点介绍了机场精细化天气预报、机场进近区危险天气预报和航路危险天气预报技术。阐述了国家气象大数据云平台、智能网格技术、全球/区域高分辨率数值模式、深度学习、多源资料融合以及机场情报信息等在上述航空气象预报技术建设的重要作用。介绍了基于智能网格的能见度、降水、风等要素的机场精细化预报技术; 采用传统外推及深度学习等方法, 开展多源数据融合的强对流短时临近预报集成技术; 基于高分辨率数值模式的机场进近区低空风切变的潜势预报技术; 以及基于我国全球/区域数值模式研发的颠簸、积冰、对流等航路危险天气预报技术等。分析了我国智能网格技术体系对航空气象专业服务的能力与不足, 并对未来航空气象专业服务技术发展做出展望。

关键词: 智能网格, 航空气象, 机场精细化预报, 强对流, 低空风切变, 颠簸, 积冰

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1773.2021.03.017

Progress on Aviation Meteorological Forecast Technology System of National Meteorological Centre

Yang Bo, Cai Xuewei, Liu Xinhua, Zhou Kanghui, Zhang Xiaoling, Lin Yingjing, Mao Xu, Wan Ziwei

(National Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: Aeronautical meteorological support technology is one kind of the Integration technology which is supported by the most comprehensive technologies, the most technical difficulties and the highest technical requirements in weather forecasting technology. Based on the meteorological big data cloud platform and smart grid technology, The National Meteorological Centre has initially established an aeronautical meteorological advisory service forecast technology system for disaster relief, national defense security, civil aviation, and general aviation. This paper focuses on the most important airport refined weather forecasting for aeronautical meteorological service, airport approaching area and route dangerous weather forecasting technologies in this technical system. The important role of China Meteorological Administration big data cloud platform, intelligent grid technology, global and regional high-resolution numerical model, deep learning, multi-source data fusion and airport intelligence information on the construction of aeronautical meteorological technology system is expounded. The refined airport forecasting technologies based on smart grid for visibility, precipitation and wind are introduced. The methods of traditional extrapolation and deep learning of multi-source data fusion are used to out the severe convection short-term forecast integration technology; the potential forecasting technology of low-altitude wind shear in dangerous weather forecasting technologies such as turbulent, ice accretion and convection are developed based on Chinese global/regional numerical model. The ability and deficiency of Chinese intelligent grid technology system for aviation meteorological professional services are analyzed, and the future development of aviation meteorological professional service technology is expected.

Keywords: smart grid, aviation meteorology, airport refined forecast, severe convection, low-altitude wind shear, turbulent, ice accretion

0 引言

航空运输在我国的抢险救灾、国防安全、经济发展中发挥着越来越重要的作用。2010—2017年, 作为航空大国, 我国民用航空运输飞机规模从1597架扩展到3296架, 运输机场从175个扩展到229个^[1-2]。随着航

空运输量的急剧增加, 气象因素对航空运输的影响越来越大。与普通天气预报相比, 航空气象对天气预报的准确性与实时性要求更高, 特别是时空尺度小, 发展演变快, 预报难度大的强对流天气, 常伴有强雷暴与下击暴流等, 对飞行安全的保障工作至关重要, 强对流天气预报已经成为影响飞行安全与运输效率的主要因素之一。同时, 由于气象原因导致的航路和区域通行能力下降, 进而导致的航班延误现象严重。2010

收稿日期: 2019年9月27日; 修回日期: 2019年12月27日
第一作者: 杨波(1976—), Email: yangbo7625@163.com

年, 气象原因造成的航班延误约占19%左右, 2017年则占51%左右。综上, 气象条件已是影响航空安全与效益的重要因素。

航空气象也是世界气象组织(WMO)最早和关注的应用领域之一。自1953年以来, WMO与国际民航组织(ICAO)开展合作有效推动了全球机载观测数据的共享、全球航空气象技术与服务的标准化, 对指导各国民用航空气象业务的建立与发展发挥了重要作用^[3]。我国民用航空气象业务在ICAO和WMO的指导下, 由中国民用航空总局管理, 并接受中国气象局行业管理与业务指导。经过多年发展, 针对航空气象服务保障, 我国已经建立了航空气象数据探测、资料收集与处理、预警预报服务、飞行气象情报发布、国内国际数据交换等航空气象业务, 构建起了较为完整的民用航空气象业务运行与服务体系, 为飞行安全提供了较为有力的气象服务保障^[4]。但与国际先进水平相比, 我国航空气象业务还存在着客观支撑技术不足, 预报产品种类、覆盖面和准确性与实际需求还有一定差距, 预报产品加工的自动化、智能化不高, 与航空信息融合还不够等诸多问题。特别是航空气象支撑技术能力的不足已成为制约我国从航空大国迈向航空强国的重要因素之一。

根据飞行阶段覆盖范围的不同, 航空气象大体可分为机场及进近区天气监测与预报和航路天气监测与预报。针对航空气象预报技术国内外气象工作者开展了大量的研究工作, 国际上最先进的天气预报技术都优先应用于航空气象领域, 在美国, 基于其强大的中尺度数值模式及其释用技术建立了客观化的航空气象指导产品。如北美中尺度模式(North America Mesoscale, NAM), 快速更新模式(Rapid Refresh, RAP), 高分辨率快速更新模式(High Resolution Rapid Refresh, HRRR), 以及短期集合预报系统(Short Range Ensemble Forecast, SREF)和用时间滞后技术建立的北美快速更新集合预报(Time-Lagged North America Rapid Refresh Ensemble, NARRE-TL)等。基于这些客观指导预报, 预报员再加工生成最终的预报产品, 使预报业务的效率大大提高^[5]。此外, Rugg^[6]基于卫星、三维雷达回波和数值模式等数据, 采用模糊逻辑隶属函数研发了飞机积冰预报技术取得了较好的应用效果。Li等^[7]基于雷达和高分辨率数值模式开发了SWIRLS(Short-rang Warnings of Intense Rainstorm of Localized Systems), 采用融合技术实现了机场进近区雷暴和强降水的精细化短临预报。邱瑞^[8]利用卫星资料的云物理特性, 建立了识别潜在在

机积冰区的方法。苏腾^[9]利用NCEP/NCAR数据, 采用Dutton指数探讨了高空颠簸高发区的预报方法。曾淑玲^[10]采用事件概率回归预报模型和神经网络模型建立我国主要机场的雷暴、雾霾和大风的预报模型。已有研究有利于增加对航空气象技术的理解, 但许多研究技术体系相对独立, 业务应用前景不够清晰。

中国气象局于2014年开始推动智能网格建设, 基于多数据源、多方法融合的智能分析技术^[11-16]已建立全球范围水平分辨率 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$, 中国区域 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 的0~30 d的多要素无缝隙智能网格预报产品。以此为基础, 借助亚洲航空气象中心建设的合作平台, 国家气象中心初步建立了面向航空气象咨询服务的技术体系。该技术体系在中国气象局智能网格预报技术的基础上, 融合航空信息与气象情报, 开发了针对机场及进近区和航路的航空气象预报技术; 并基于中国气象局的大数据云平台, 实现了航空气象咨询服务产品的快速制作与分发。可为机场、航空公司等终端用户提供咨询服务, 也可为民航航空气象业务发展提供技术参考。

1 数据环境与技术架构

基于智能网格的航空气象咨询服务预报技术体系(图1)是国家气象中心在大数据云平台的基础上整合各种主客观预报算法。首先建立了通用型天气预报数据库。再针对航空气象咨询服务的特殊需求, 基于通用型天气预报技术与产品在融合航空信息与气象情报的基础上, 开发航空气象咨询服务预报技术与产品, 并集成到天气预报数据库中的航空气象专题库。最后在航空气象专题库的基础上建立航空气象咨询产品制作与分发系统, 实现对机场、航空公司等终端用户咨询服务的技术支持。

1.1 航空气象专题数据库

随着高时空分辨率的观测及预报数据的快速发展, 气象数据量呈爆发式增长, 2015年中国气象局日处理数据量达6.54 TB, 2020年已达到63 TB^[17], 大数据分析技术已经成为现代天气预报技术的重要基础。中国气象局初步建立了高效、便捷的分布式大数据应用环境, 国家气象中心在此基础上, 建立了面向行业的专题数据库。与其他专题数据库不同, 航空气象专题数据库具有数据来源多, 预报要素要求广, 预报时效覆盖全, 预报精度要求高, 服务响应要求快等特点, 因而需要具备较高的稳定性与高效性。航空气象专题数据库主要包括数据采集, 加工流水线、应用支持三大模块组成(图2), 其中, 数据采集模块主要基于cassandra分布式数据库完成多源实况数据、数值

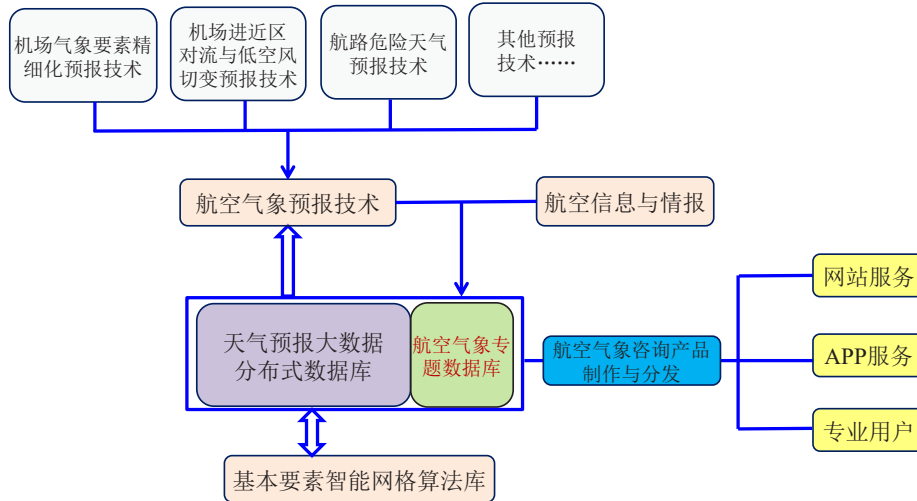


图1 基于智能网格的航空气象咨询服务预报技术体系

Fig. 1 Aeronautical meteorological advisory service forecast technology system based on intelligent grid

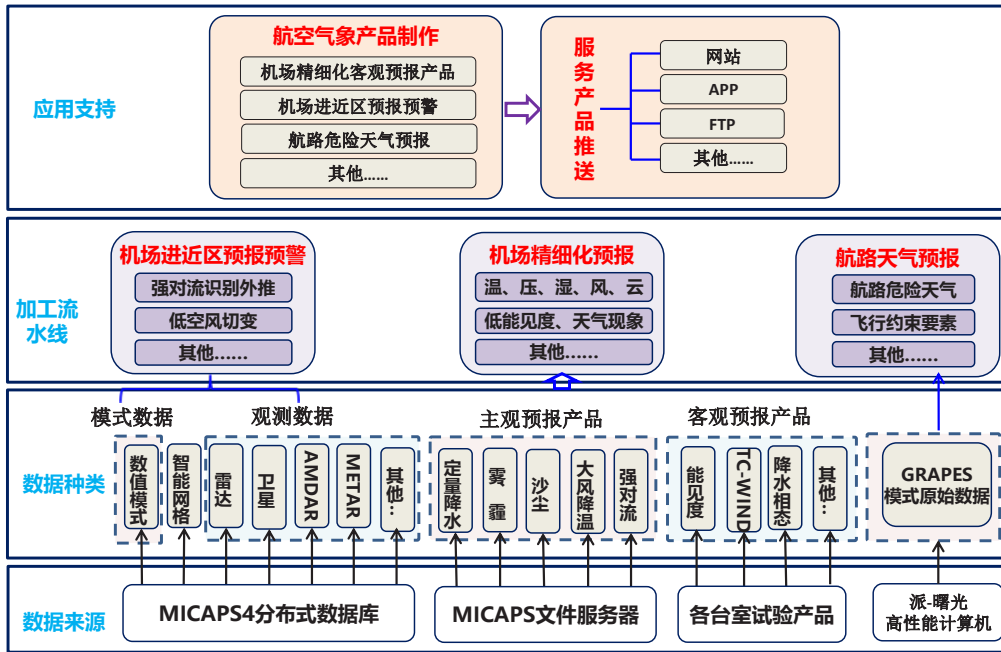


图2 航空气象专题数据组织流程

Fig. 2 Aviation meteorological data organization process

模式产品、各种主观及客观预报产品、GRAPES数值模式原始数据的采集。这些数据覆盖了航空气象咨询服务的一些基本需求，也为航空气象专业产品的加工流水线提供了基本素材；加工流水线模块基于数据采集模块提供的气象信息，结合航空基本信息，调用专业算法库，建立面向航空气象的专题产品，按其功能需求大致可分为机场精细化预报、机场进近区预报预警、航路预报三大类产品；应用支持模块在航空气象专题产品库的基础上自动完成面向机场、航空公司等终端用户的咨询产品的包装与分发。航空气象专题数

据库的建立，为中国气象局开展航空气象技术支持，履行亚洲航空气象技术支持中心的职责奠定了良好的基础。

1.2 机场精细化天气预报技术

准确的机场精细化天气预报对航空公司及时调整航班计划、空管指挥飞机、机场合理调度保障力量都非常重要，是航空气象服务保障的重要需求之一。中国气象局多要素无缝隙智能网格预报技术为机场精细化天气预报技术的建立提供了良好的基础。

基于智能网格技术并融合机场相关信息，国家

气象中心初步建立了全国238个机场0~3 d逐小时, 3~10 d逐3小时的精细化预报技术, 包括雷暴、强对流、降水相态、雾霾、沙尘等重要天气现象; 定量降水、能见度、阵风、跑道侧风、低云量等重要气象要素; 以及温度、露点、气压、总云量等常规气象要素。

基本技术流程(图3): 1) 基于智能网格产品

及实况、模式等相关数据, 大量采用多源数据的融合技术, 形成航空气象所关注格点化的气象要素产品。

2) 基于机场地理信息, 针对温度、气压、湿度等连续要素采用三维空间插值技术; 针对天气现象、降水相态等非连续要素采用最小距离采样技术初步形成机场站点预报。3) 基于机场实况观测, 滚动对机场站

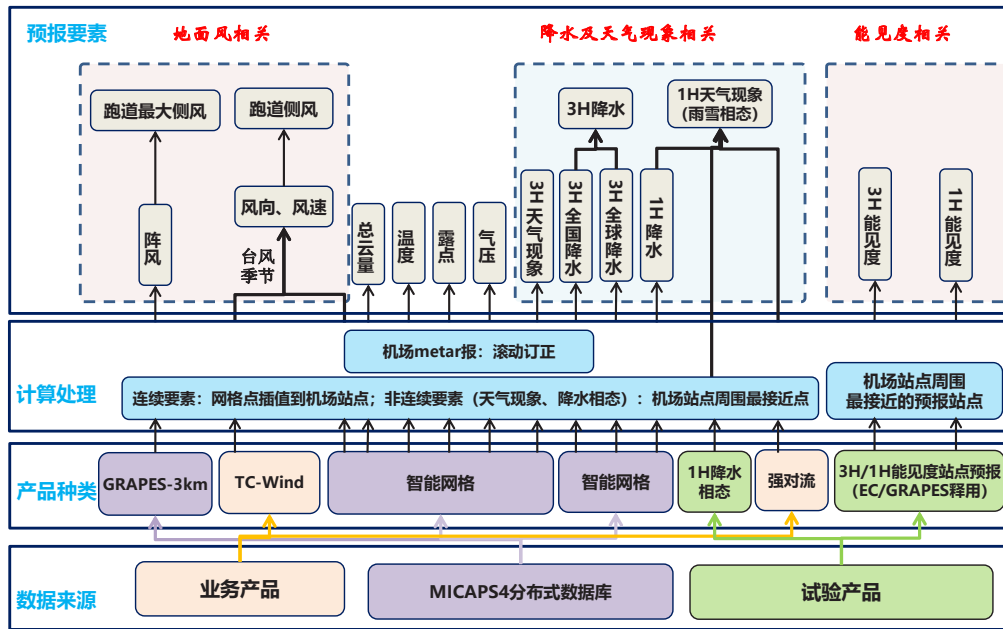


图3 基于智能网格产品的机场精细化预报技术流程

Fig. 3 Airport refined forecasting technology flow based on smart grid products

点天气预报进行订正形成最终的机场站点天气预报。

以航空气象咨询服务中需要重点关注的机场能见度、降水和跑道侧风为例, 说明其基本技术实现:

1) 能见度直接影响飞机起降, 是航空气象咨询服务中的一个重要气象要素。在机场能见度预报方面, 首先对发生低能见度的天气形势进行统计分析, 初步选取与机场低能见度及低能见度变化相关的气象要素作为输入参数; 再利用 ECMWF 集合预报数据集采用神经网络方法进行训练; 通过对集合预报结果的离散度进行分析筛选更有泛用性、可靠性的参数集^[18-19]; 然后以ECMWF确定性预报和GRAPES高分辨率数值模式作为参数的输入源实现机场逐3小时和逐1小时的能见度预报; 最后以机场观测的能见度实况对两种能见度预报数据进行修正, 融合并形成最终机场逐小时能见度预报。

2) 降水会污染跑道造成跑道湿滑, 较大的雨强也会影响视程障碍, 在定量降水的客观预报技术方面, 国家气象中心做了大量研究, 先后研制了多模式集成、“配料法”等级、降水频率订正(南京大学引进)、集合最优百分位、逻辑回归法、OTS(基于最

优TS评分阈值)以及面向台风暴雨的集合预报成员优选订正技术等多种短中期预报方法^[17, 20-21]并在业务中取得了较好的应用效果; 但是面对极端性、转折性的强降水过程, 预报员的主观干预仍然至关重要。预报员在客观技术的基础上, 调整客观方法权重, 并结合自身对天气的理解, 采用新一代智能化的人机交互MICAPS系统, 实现主客观融合的降水产品^[12, 22]。曹勇等^[14]则在主客观融合降水产品的基础上再利用统计降尺度、时间拆分等技术构建逐小时 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 高时空分辨率的国家级智能网格定量降水预报产品; 国家气象中心在此基础上采用最小距离采样技术形成机场站点逐小时定量降水预报; 再基于机场降水实况实时滚动订正, 最终形成机场逐小时精细化定量降水量预报技术。

3) 过强的侧风可能会使飞机偏离跑道造成机毁人亡。由于受局地地形影响较大, 风向风速的精细预报也是天气预报中的一个难点, 曾晓青等^[23-24]采用基于模式和实况因子的全格点滑动建模订正技术建立了全国格点风场预报产品; 而在台风期间, 钱奇峰等^[25]采用集合预报实时订正技术对台风路径进行订正取得

了较好的应用效果；梁莉等^[26]在统计我国登陆台风地面风场分布特征的基础上研发了TC-Wind台风大风预报订正技术并在业务中应用；另外，还有一些研究在对大量对流环流特征及物理量统计的基础上采用配料法，或采用深度学习等方法建立了对流性大风的预报技术方法。国家气象中心在上述技术方法产品的基础上进行融合，形成了国家级智能网格风场预报产品；在此基础上再采用最小距离采样技术形成机场站点逐小时风向风速预报；最后再结合跑道方向，计算机场站点的逐小时侧风产品。基于逐小时的机场精细化天气预报产品，结合机场运行标准，可建立面向航空运行决策的服务产品（图4）。

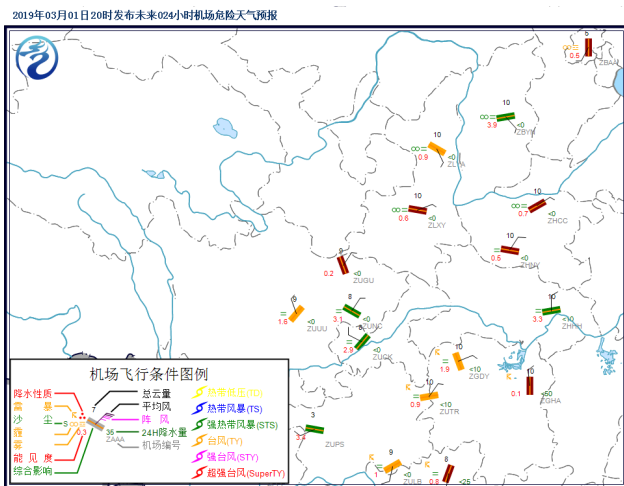


图4 机场危险天气预报产品

Fig. 4 Dangerous weather forecast product in airport

1.3 机场终端（进近）区危险天气预报技术

机场终端（进近）管制区是飞机起降与进离场区的结合区，飞机在进近区内汇集，并按指定导航点起降，机场进近区的短临天气预报直接影响到航班的流量控制和飞行安全，是航空气象服务保障的又一个重要需求。目前，进近区短临预报即0~3 h时效快速更新技术依然薄弱，严重阻碍了我国航空事业快速发展。在机场进近区内，雷暴与低空风切变是影响飞行安全的两大重要气象因子，是机场进近区临近预报关注的焦点。针对机场进近区的短临预报技术，国家气象中心主要发展了基于多源资料融合的强对流短临预报技术，并初步研发了低空风切变潜势预报技术。

强对流短临预报技术：随着全国气象观测网的改善以及信息化能力的增加，特别是以深度学习为代表的人工智能技术的进步，我国的短临预报技术有了较快发展，但是大多数短临预报技术只针对某一特定区域，且存在着预报时效较短，与航空管制需求不能有效对接等问题，使得其无法满足机场终端区短临预报

的需求。

国家气象中心基于大数据平台初步构建了较为完整的强对流短临预报技术体系：首先，基于SWAN框架实现了全国雷达三维拼图以及传统改进交叉相关法（COTREC）的雷达回波外推技术；并采用基于金字塔架构的LK光流技术、基于Burgers方程的平流风场变化技术、基于光流残差的强度订正技术、基于高分辨率模式的实时强度订正技术实现了0~2 h的全国雷达回波外推^[27]；引进研发了循环神经网络的深度学习雷达回波预报方法^[28-29]，相对于传统雷达回波外推技术，新的外推技术在雷达回波强度、生消等变化以及位置的预报方面均有较为明显的改善。此外，采用光流法实现卫星云图0~2 h外推；还采用聚类与卡曼滤波方法实现基于闪电的0~2 h雷暴识别与外推^[30]；另外，在0~6 h时效内高分辨率数值模式的降水、回波、风等关键要素逐10 min输出；在此基础上，多种产品相互修正，实现雷达、卫星、闪电、分钟级自动站以及高分辨率数值模式产品的初步融合，构建了全国范围的雷暴、雷暴大风、回波、短时强降水等短临预报技术。基于国家级强对流短临预报技术再融合机场与航空信息，初步建设了针对机场进近区的强对流短临预报技术（图5a）。图5b为强对流短临预报技术中基于深度学习的60 min雷达回波预报产品。

低空风切变潜势预报技术：飞机起降时，低空风切变会使其偏离既定轨迹，操作不慎会造成机毁人亡，严重影响飞行安全。按照ICAO推荐标准，低空水平风的垂直切变达到 0.1 s^{-1} 以上时，水平风的水平切变 $\geq 2.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时，就会对民用飞机带来威胁。由于低空风切变具有时空尺度小、强度大的特点，其探测和预报较为困难，目前主要是通过机场及飞机上安装风的探测设备进行监视报警，而在临近时效主要基于雷暴等强对流预报对低空风切变进行定性判断。由于观测能力不足，国内外尚未建立起有效的低空风切变预警预报技术。国家气象中心基于3 km的高分辨率数值模式，其边界层内垂直分辨率最高可达50 m，基本满足0~600 m高度内低空风切变预报的条件，基于高时空分辨率数据模式研发的机场进近区低空风切变短期时效潜势预报产品可为管制决策提供一定参考依据（图6）。

1.4 航路危险天气预报技术

飞行器在空中飞行时会遇到由于大气运动产生的危险天气，如颠簸、对流云与积冰等，影响飞行器运行安全，甚至产生严重的安全事故。国家气象中心航路危险天气预报技术主要基于GRAPES全球/区域数值

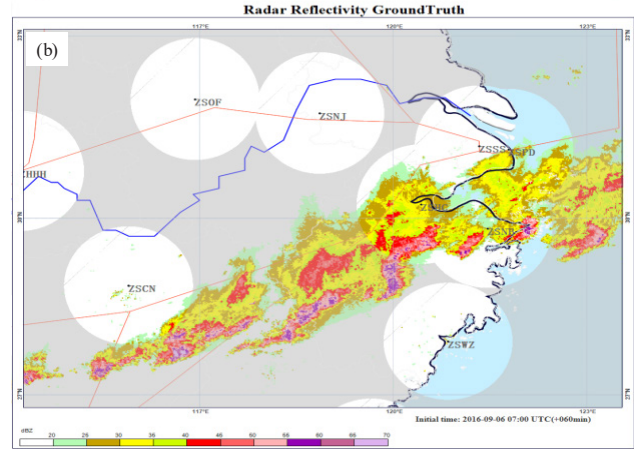
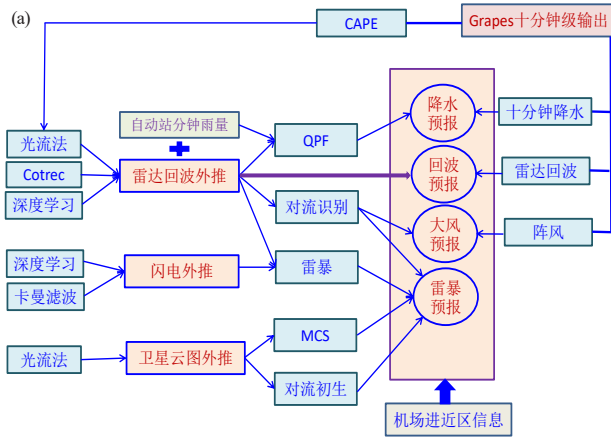


图5 强对流短临预报技术框架图(a), 以及基于深度学习的雷达回波60 min预报产品 (b)
Fig. 5 Strong convection short-term forecasting technology framework (a), and radar echo 60-minute forecast product based on deep learning (b)

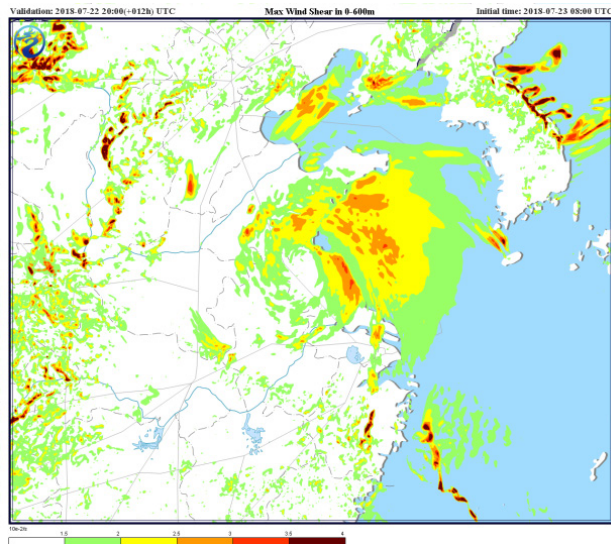


图6 基于高分辨率的GRAPES模式的低空风切变预报
Fig. 6 Low-altitude wind shear prediction based on high resolution GRAPES model

模式预报系统构建空中颠簸、对流云和积冰这三类航路危险天气预报算法, 实现对欧亚大陆范围内15层不同高度上分量级强度(轻度、中度及严重)的48 h内逐3小时实时预报产品。

颠簸预报: 航路上的颠簸现象主要是由于风场分布的不均匀导致的, 当飞机遇到颠簸产生的机体摇晃可影响飞机的安全运行, 甚至造成人员受伤。颠簸算法采用Dutton指数^[31-32], 是根据湍流报告与各种天气尺度湍流指数的非线性回归分析所得到的经验指数, 包括了用来衡量水平范围内风速的变化情况的水平风切变与衡量风速随位势高度变化情况的垂直风切变。Dutton指数对于高空急流背景下的颠簸具有较好指示能力。其具体计算公式为:

$$Dutton = 1.25 \times S_h + 0.25 \times S_v^2 + 10.5,$$

其中: 1) $S_h = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2}$ 是水平风切变(单位: $10^{-5} s^{-1}$), 用来衡量水平范围内风速的变化情况; 2) $S_v = \frac{\sqrt{du^2 + dv^2}}{\Delta h}$ 是垂直风切变(单位 $10^{-3} s^{-2}$), du 、 dv 分别为相邻高度层上 u 、 v 的变化值, Δh 为上下高度层的位势差, 用来衡量风速随位势高度的变化情况。该指数的预报等级及阈值如表1所示:

表1 颠簸指数预报等级及阈值(单位: s^{-1})
Table 1 Prediction level and threshold of turbulence index (unit: s^{-1})

颠簸强度	无颠簸	轻度颠簸	中度颠簸	重度颠簸	严重颠簸
Dutton	20	25	30	35	40

积冰预报: 当飞机在云中或降水飞行时, 由于云中温度与湿度的影响产生的过冷却水滴, 受到震动后水滴产生冻结, 在机身表面碰撞产生积冰层, 可破坏飞机的空气动力学特性, 影响飞行安全。积冰算法为国际民航组织推荐的飞机积冰指数 LC ^[33]:

$$LC = [(RH - 50)] \times 2 \times \left[\frac{T \times (T + 14)}{-49} \right],$$

其中, RH 为相对湿度(%), T 为温度($^{\circ}C$)。其输出范围为 $0 \sim 100$, 数值越大, 表示积冰越强; 具体积冰强度判据为: $0 < LC < 50$, 预报有轻度积冰; $50 \leq LC < 80$, 预报有中度积冰; $LC \geq 80$, 为严重积冰。积冰指数的强度阈值如表2:

表2 积冰指数预报等级及阈值
Table 2 Prediction level and threshold of ice accretion index

积冰强度	轻度积冰	中度积冰	严重积冰
LC	$0 \sim 50$	$50 \sim 80$	≥ 80

对流预报：当飞行器穿越对流云区时，可能遭遇雷暴、下击暴流等对流天气，对飞行器造成严重伤害，因此如何保障飞行器在飞行中规避对流是对流云预报的重要目标。数值预报中包含的云微物理参数，可模拟出不同的云系特征^[34-35]。国家气象中心对流云的预报是将多模式预报物理量数据统一时空分辨率后，首先判别有无降水云层，再根据不同地区对流云物理成因的差异确定其判别条件，从而实现三维对流云有无的预报，其基本算法流程如图7所示。

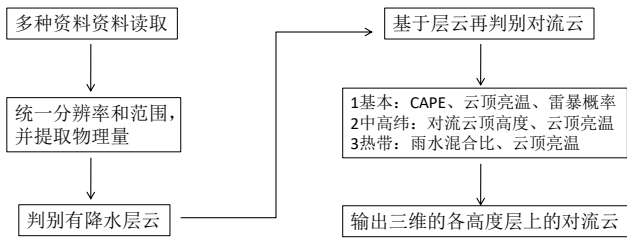


图7 对流云预报判别算法流程图

Fig. 7 Convective cloud forecasting algorithm flow chart

基于多源数值模式产品计算的颠簸、积冰、对流预报产品，结合航路信息可形成用于航空气象服务的航路危险天气预报产品（图8）。

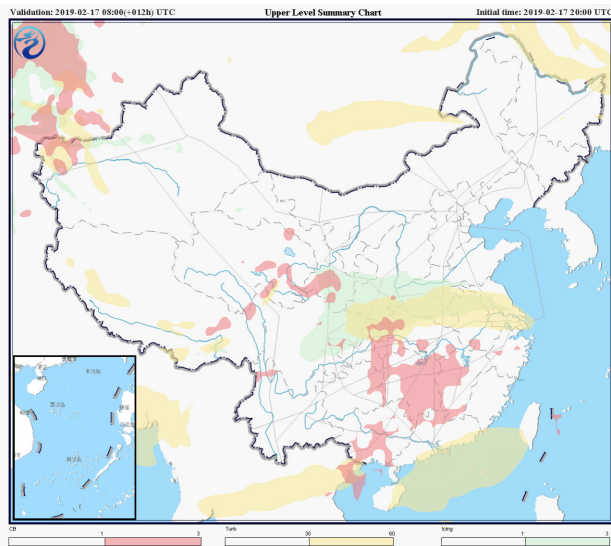


图8 航路危险天气预报产品（对流：红色；颠簸：黄色；积冰：绿色）

Fig. 8 Route dangerous weather forecast products (convection: red; turbulent: yellow; ice accretion: green)

2 案例分析

2.1 台风山竹期间机场精细化预报

机场精细化预报是涵盖预报技术最广、要求最高的服务产品之一，冬季雾霾与低能见度和降水相态，夏季强对流和台风等预报是其关注的重点。

2018年9月12—17日，受超强台风山竹影响，我

国东南沿海多个机场出现大风、暴雨等极端天气，对航班运行影响较大。国家气象中心在机场逐小时精细化预报技术中及时融入了台风路径预报、台风大风预报、台风降水预报、台风对流云预报等关键技术，逐小时滚动更新机场精细化预报产品。并与航空公司合作，应其需求共提供了9期香港、澳门、广州、珠海、深圳、湛江、海口、惠州、汕头、福州、厦门、三亚、台北桃园、台北松山、北海、南宁、桂林、柳州和马尼拉等19个机场的精细化预报产品。

以香港国际机场为例，采用机场METAR报文作为检验实况数据；为和METAR报文相对应，把机场精细化预报降水分为3级： ≤ 4 mm/h为RA⁻，4~8 mm/h为RA， ≥ 8 mm/h为RA⁺。其检验结果如图9，风速预报普遍偏大，平均偏大5.5 m/s，最大偏差达13 m/s（16日17时），对于台风最大风速出现的时间预报准确，实况和预报均出现在16日14时，但风速预报偏大7.7 m/s；风向偏差在40°以内，主要偏差在台风之前的15日19—21时和台风风向的转变。台风来临之前偏东分量考虑不足，而台风的风向转变预报比实况偏晚2 h左右；香港国际机场主要降水时段发生在16日清晨至夜间，共出现了两次强降水时段（16日09—16时和16日20—22时），香港国际机场精细化预报降水的起始时间预报略偏晚约2小时，但两次强降水时段及强度的预报与实况均较接近。

统计其他机场的检验结果，总体上靠近台风中心移动路径的机场其预报准确性要好于远离台风中心移动路径的机场，这可能与台风结构预报的准确性不足有关。此外，机场METAR报的实况数据风速观测普遍小于中国气象局的自动气象站的风速观测，这可能与观测标准差异有关。

2.2 航路颠簸精细化预报

基于GRAPES全球（其水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ）和区域（其最高水平分辨率为 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$ ）数值模式，国家气象中心初步建立了全球及中国区域的航路危险天气预报技术。本文选取2018年冬季的一次晴空颠簸过程，对比世界航空气象中心（WAFS）的晴空颠簸预报产品对本技术产品进行检验^[36]。需要说明的是，由于飞机颠簸实况是飞机飞行中机载设备实时传送，时间与地点不固定，因此认为出现颠簸是确定性实况，没有颠簸记录可能是由于该时段内没有飞机经过，并不代表该地区一定没有颠簸发生，所以其检验方法重点关注出现实况时预报发生的命中率。

2018年11月26日19—21时在江南地区高空

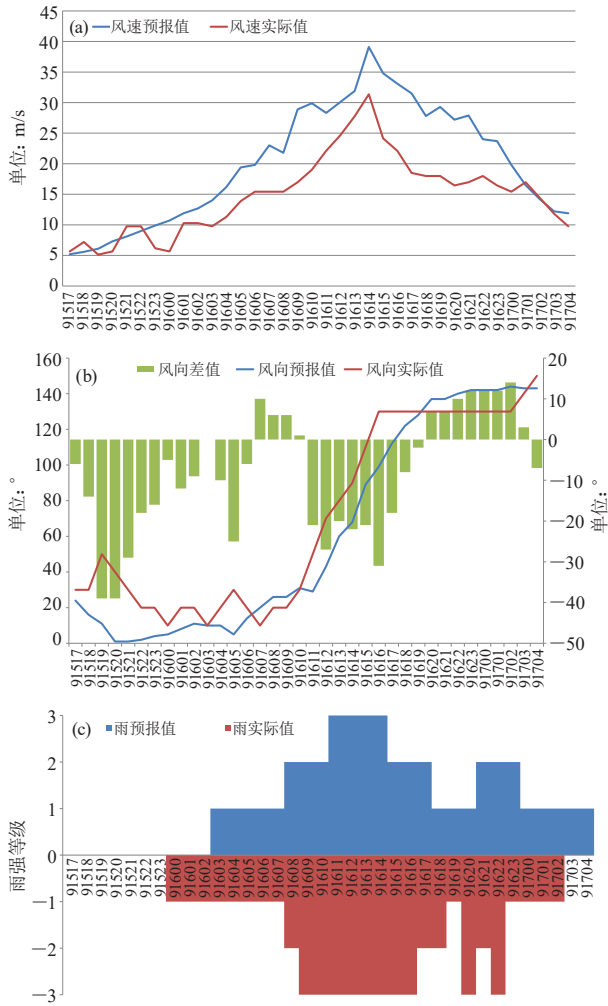


图9 台风山竹期间香港机场精细化预报要素检验 (蓝色为预报, 红色为实况)
(a) 风速; (b) 风向; (c) 降水
(纵坐标0~3分别代表无雨、RA-、RA、RA+)
Fig. 9 Verification of refined airport forecasting elements during the Typhoon "Mangosteem" (blue for forecast, red for live)
(a) Wind speed, (b) Wind direction, (c) Precipitation (0—3 represents no rain, RA-, RA, RA+)

300 hPa附近出现颠簸情况 ($EDR \geq 0.1 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$), 如图10a所示, 紫色线为国家气象中心基于GRAPES全球的Dutton指数颠簸预报 ($\geq 25 \text{ s}^{-1}$, 其水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$), 蓝色线为WAFS晴空颠簸预报 ($CAT \geq 5 \text{ s}^{-2}$, 其水平分辨率为 $1.25^\circ \times 1.25^\circ$)。两种预报产品的轻度颠簸预报产品均基本预报出江南地区的颠簸情况, 位置略有偏差; 但WAFS在江南地区预报略偏小而在其他地区出现大范围空报。为了解数值模式分辨率对预报效果的影响, 两家模式均采用TI3指数算法计算颠簸预报产品^[37-38] (图10b), 可发现两者的预报范围更相近, 但较高分辨率的预报产品可大

幅减少空报率, 增强预报产品的可用性。

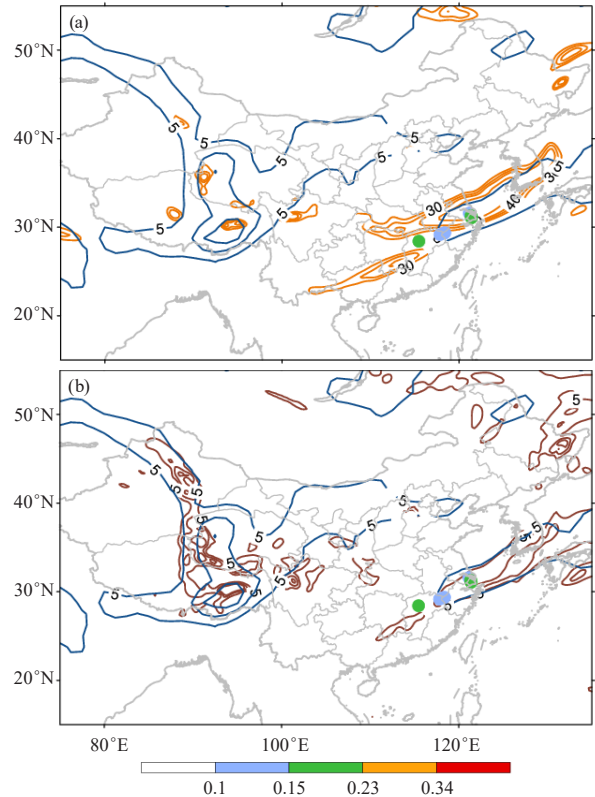


图10 2018年11月26日19—21时国家气象中心 (NMC) 与世界航空气象中心 (WAFS) 颠簸预报检验对比 (圆点: 300 hPa飞机观测的EDR, 蓝色实线: WAFS预报 $TI3 \geq 5 \text{ s}^{-2}$)
(a) Dutton指数 (橙色实线: NMC预报 $Dutton \geq 30 \text{ s}^{-1}$);
(b) TI3指数 (棕色实线: NMC预报 $TI3 \geq 5 \text{ s}^{-2}$)
Fig.10 Comparison of turbulent forecast verification between National Meteorological Center (NMC) and World Aeronautical Meteorological Center (WAFS) at 19—21 BT on 26 November 2018
(the dots: EDR observed by aircraft at 300 hPa, blue solid line: WAFS forecast $TI3 \geq 5 \text{ s}^{-2}$)
(a) Dutton index (orange solid line: NMC forecast $Dutton \geq 30 \text{ s}^{-1}$), (b) TI3 (brown real line: NMC forecast $TI3 \geq 5 \text{ s}^{-2}$)

3 讨论与结论

航空气象预报技术是天气预报技术中涵盖范围最广、技术难点最多、要求也最高的集成技术之一。国家气象中心基于气象大数据云平台与智能网格技术和产品初步建立了航空气象咨询服务技术体系, 本文重点介绍了航空气象咨询服务中关注的机场精细化预报技术、机场终端 (进近) 管制区临近预报技术和航路危险天气预报技术。

机场精细化预报技术基于智能网格技术与产品, 结合机场地理信息、机场观测气象信息进行实时滚动订正, 实现全国238个机场0~10 d的雷暴、强对流、

降水相态、雾霾、沙尘等重要天气现象；定量降水、能见度、低云高、阵风、跑道侧风等重要气象要素；以及温度、露点、气压、总云量等常规气象要素的精细化预报。

机场进近区临近预报技术主要包括强对流短时临近预报技术和低空风切变短期潜势预报技术。强对流短时临近预报技术主要采用传统外推及深度学习等技术方法，并采用多源数据融合实现强对流短临预报技术的集成；低空风切变潜势预报技术主要基于高分辨数值模式实现机场进近区低空风切变的潜势预报。

航路危险天气预报技术主要基于我国的全球/区域数值模式，采用国际民航组织推荐的计算方法以及决策树等方法初步建立了全球及中国区域的颠簸、积冰、对流预报。

针对服务案例的分析检验，国家气象中心的航空气象预报产品有较好的准确性，初步具备了开展航空气象咨询服务的能力，但与日益增涨的航空气象服务保障需求，仍然存在一定差距。一是天气预报的精准度需要继续改进。目前我国多条航路容量已基本饱和，许多机场处于超负荷状态，如首都机场平均每分钟起降3架次航班，需要定时定点定量的分钟级精准化预报，特别是转折性天气的精准预报，这对于合理调度飞行计划，减少经济损失非常重要。二是直接面向终端用户的航空决策预报技术还没有建立起来。气象信息作为影响航空安全的重要因素只有和航空信息充分融合，融入到航空决策管理系统，才能更好地为航空服务。

目前ICAO推出全球空中航行计划（GANP），其中与航空气象有关的AMET-B模块由ICAO和WMO共同规划，提出要把气象信息集成应用到飞行不同阶段的运行决策。部分航空气象强国已开始尝试建立空地一体化的气象服务，初步实现了机载观测数据和地面气象服务信息实时互享^[3]。面对航空气象技术与服务能力不足以及未来发展的需求，我国要建成航空气象强国，必须要具备“国际视野、科技先行、部门合作”的战略思维。中国民用航空总局、中国气象局、香港天文台三方合作共建“亚洲航空气象中心”，目前已完成第一阶段的建设，初步实现了数据共享，并开展在线服务。而更深层次的信息融合、技术融合和人才融合需要进一步的深入合作。此外，国家气象中心也在积极推动与航空公司的技术合作，飞机气象数据中继（Amdar）和涡旋耗散率（EDR）等机载观测数据已经用于数值模式及航空气象算法的优化与验证；包含湿度观测的对流层飞机气象数据报告

（TAMDAR）也已尝试开展应用研究。随着多方合作的深入，我国自主研发空地一体化航空气象决策服务体系的计划也日渐清晰。

而在技术研发层面，国家气象中心首先要继续发展基于智能网络的客观预报技术，特别是加强高分辨率模式的释用技术与深度学习等人工智能的应用技术。如在能见度预报中加强精细化地形影响、局地气候统计分析以及民航气象情报的应用；在机场终端区的临近预报中加强基于多源资料的深度学习算法研发等。以多数值模式，多方案集成的概率预报技术将是未来航空气象预报技术发展的重要方向。其次是建立航空决策影响预报，通过部门合作，了解服务需求，加强数据共享，建立面向航空决策管理的航空气象影响预报技术体系。此外需建立实时评估检验系统，通过实时检验，不断评估并优化航空气象技术算法，提升我国航空气象技术支撑能力。最后，随着我国航空运输的全球化扩展，我国的航空气象技术体系建设也需和国际航空气象技术发展规划相对应：一是面向全球化发展，基于全球智能网格技术产品，建立面向全球的航空气象监测与预报技术体系；二是面向机场终端区精准化发展，建立无缝隙的、空地一体的航空气象决策支持技术体系。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 2010年民航行业发展统计公报. 中国民用航空局, 2011. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201511/t20151102_8769.html.
- [2] 中国民用航空局. 2017年民航行业发展统计公报. 中国民用航空局, 2018. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201805/t20180521_188131.html.
- [3] CM Shun. Keynote – Past, Present and Future. 16th Session of WMO Commission for Aeronautical Meteorology (CAeM-16) Technical Conference (TECO). 2017.
- [4] 周建华. 航空气象业务. 北京: 气象出版社. 2014.
- [5] 周斌斌, 蒋乐, 杜钧. 航空气象要素以及基于数值模式的低能见度和雾的预报. 气象科技进展, 2016, 6(2): 29-41.
- [6] Rugg A, Jullie H, Rabindra P, et al. High ice water content conditions around Darwin: Frequency of occurrence and duration as estimated by a nowcasting model. AIAA Atmosphere and Space Environment Conference, 2017.
- [7] Ping-Wah L, Wai-Kin W, Ping C, et al. An Overview of Nowcasting Development, Applications, and Services in the Hong Kong Observatory. Chinese Meteorological Society 90th Anniversary Special Collection, 2014, 28(5): 859-876.
- [8] 邱瑞, 王永忠. 利用卫星资料识别潜在飞机积冰区. 滨州学院学报, 2014, 30(6): 36-49.
- [9] 苏腾, 王永忠. 利用 NCEP/NCAR 数据探寻高空颠簸高发区的方法研究. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38 (4): 557-562.
- [10] 曾淑玲. 三类航天气象预报技术及业务系统研究. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [11] 代刊, 曹勇, 钱奇峰, 等. 中短期数字化天气预报技术现状及趋势. 气象, 2016, 42(12): 1445-1455.
- [12] 贺雅楠, 高嵩, 薛峰, 等. 基于M1CAPS4的智能网格预报平台设计与实现. 应用气象学报, 2018, 29(1): 13-24.
- [13] 代刊, 朱跃建, 毕宝贵. 集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述. 气象学报, 2018, 76(4): 493-510.

- [14] 曹勇, 刘凑华, 宗志平, 等. 国家级格点化定量降水预报系统. 气象, 2016, 42(12): 1476-1482.
- [15] 毕宝贵, 代刊, 王毅, 等. 定量降水预报技术进展. 应用气象学报, 2016, 27(5): 534-549.
- [16] 赵声蓉, 赵翠光, 赵瑞霞, 等. 我国精细化客观气象要素预报进展. 气象科技进展, 2012, 2(5): 12-21.
- [17] 张永, 杨群娜, 矫梅燕: 促进大数据融合 应对信息技术挑战. http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxw/2011xqxyw/201611/t20161122_342473.html.
- [18] 谢超, 马学款, 张恒德. 华南低能度天气特征及客观预报研究. 气象科学, 2019, 39(4): 556-561.
- [19] 马学款, 蔡芎宁, 杨贵名, 等. 重庆市雾的天气特征分析及预报方法研究. 气候与环境研究, 2007, 12(6): 795-803.
- [20] 张芳华, 曹勇, 徐掇, 等. Logistic判别模型在强降水预报中的应用. 气象, 2016, 12(4): 398-405.
- [21] 陈博宇, 郭云谦, 代刊, 等. 面向台风暴雨的集合预报成员优选订正技术研究及应用试验. 气象, 2016, 42(12): 1465-1475.
- [22] 高嵩, 毕宝贵, 李月安, 等. MICAPS4预报业务系统建设进展与未来发展. 应用气象学报, 2017, 28(5): 513-531.
- [23] 曾晓青, 赵声蓉, 段云霞. 基于MOS方法的风向预测方案对比研究. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 140-144.
- [24] 曾晓青, 薛峰, 姚莉, 等. 针对模式风场的格点预报订正方案对比. 应用气象学报, 2019, 30(1): 49-60.
- [25] 钱奇峰, 张长安, 高拴柱, 等. 台风路径集合预报的实时订正技术研究. 热带气象学报, 2014, 30(5): 905-910.
- [26] 梁莉, 崔晓鹏, 王成鑫, 等. 我国登陆热带气旋引起的大陆地面风场分布. 大气科学, 2018, 42(1): 96-108.
- [27] 曹勇, 赵声蓉, 代刊, 等. 定量降水短时短期精细化预报技术进展. 重大专项《重大灾害性天气的短时短期精细化无缝隙预报技术研究》中期汇报, 2018.
- [28] Wang Y B, Long M S, Wang J M, et al. PredRNN: Recurrent Neural Networks for Predictive Learning using Spatiotemporal LSTMs. 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), 2017.
- [29] 韩丰, 龙明盛, 李月安, 等. 循环神经网络在雷达临近预报中的应用. 应用气象学报, 2019, 30(1): 61-69.
- [30] 周康辉, 郑永光, 蓝渝. 基于闪电数据的雷暴识别、追踪与外推方法. 应用气象学报, 2016, 27(2): 173-181.
- [31] Dutton J A, Panofsky H A. Clear air turbulence: a mystery may be unfolding. Science, 1970, 167: 937-944.
- [32] Pearson J M, Sharman R D. Prediction of energy dissipation rates for aviation turbulence. Part II : forecasting non convective turbulence. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2017, 56: 317-337.
- [33] 迟竹萍. 飞机空中积冰的气象条件分析及数值预报试验. 气象科技, 2007, 35(5): 714-718.
- [34] 朱佩君, 陈敏, 陶祖钰, 等. 台风云系的数值模拟. 北京大学学报(自然科学版), 2002, 38(3): 358-363.
- [35] 郑晓辉, 徐国强, 魏荣庆. GRAPES新云量计算方案的引进和影响试验. 气象, 2013, 39(1): 57-66.
- [36] Gill P G. Objective verification of World Area Forecast Centre clear air turbulence forecasts. Meteorological Applications, 2012.
- [37] Ellrod G P, Knapp D I. An objective clear-air turbulence forecasting technique: verification and operational use. Weather and Forecasting, 1992, 7: 150-165.
- [38] Ellrod G P. Improvements to an operational clear-air turbulence diagnostic index by addition of a divergence trend term. Weather and Forecasting, 2010, 25: 789-798.