



气象领域中的自动化技术新进展

葛泉波 陆振宇 朱凤增 董建平 智协飞 张恒德

New Progress in Automation Technology in the Meteorological Field

GE Quan-Bo, LU Zhen-Yu, ZHU Feng-Zeng, DONG Jian-Ping, ZHI Xie-Fei, ZHANG Heng-De

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16383/j.aas.c250403>

您可能感兴趣的其他文章

2023年度自动化领域(F03)国家自然科学基金项目申请与资助情况综述

NSFC Proposal Application and Funding Status of Automation Field (F03) in 2023: An Overview

自动化学报. 2023, 49(12): 2457–2466 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c230692>

自动化信任的研究综述与展望

Trust in Automation: Research Review and Future Perspectives

自动化学报. 2021, 47(6): 1183–1200 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c200432>

自动化学科面临的挑战

On Challenges in Automation Science and Technology

自动化学报. 2021, 47(2): 464–474 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c200904>

进化计算在复杂机电系统设计自动化中的应用综述

Applications of Evolutionary Computation in the Design Automation of Complex Mechatronic System: A Survey

自动化学报. 2021, 47(7): 1495–1515 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190767>

人工智能驱动的自动化专刊序言

Guest editorial of special issue on artificial intelligence-driven automation

自动化学报. 2026, 52(6): 1141–1144 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c202606>

2024年度自动化学科国家自然科学基金项目申请与资助情况综述

Overview of National Natural Science Foundation of China Proposal Application and Funding Status of Automation Discipline in 2024

自动化学报. 2024, 50(12): 2359–2367 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c240761>

气象领域中的自动化技术新进展

葛泉波^{1,2,3} 陆振宇⁴ 朱凤增^{1,5} 董建平^{1,6} 智协飞⁷ 张恒德⁸

摘要 随着人工智能、大数据分析等新一代信息技术的快速发展,气象领域正加速向智能化转型。气象科学的创新需求推动自动化技术不断革新,自动化技术的深度应用也为气象服务智能化转型提供了重要支撑。本文总结近几年应用于气象中的自动化新技术,并从气象感知、气象预报和决策服务三个方面进行介绍。在气象感知方面,总结智能组网观测、分布式协同感知与无人集群技术的应用,分析控制理论、系统建模等技术对提升高时空分辨率观测能力的作用。在气象预报方面,梳理深度学习、强化学习等方法在短临预报和模式优化中的应用,以及流程自动化与系统工程在提升预报效率中的价值。在决策服务方面,探讨知识图谱、智能推理及自主决策等技术在灾害预警和应急响应中的应用。目前,无人集群气象观测、AI大模型预报与智能决策正推动气象科学与自动化深度融合,为构建高效智能的气象服务体系提供关键技术支持。

关键词 自动化; 气象; 气象自动化; 气象监测; 预报与决策

引用格式 葛泉波, 陆振宇, 朱凤增, 董建平, 智协飞, 张恒德. 气象领域中的自动化技术新进展. 自动化学报, xxxx, xx(x): x-xx

DOI 10.16383/j.aas.c250403 **CSTR** 32138.14.j.aas.c250403

New Progress in Automation Technology in the Meteorological Field

GE Quan-Bo^{1,2,3} LU Zhen-Yu⁴ ZHU Feng-Zeng^{1,5} DONG Jian-Ping^{1,6} ZHI Xie-Fei⁷ ZHANG Heng-De⁸

Abstract With the rapid development of new-generation information technologies such as artificial intelligence and big data analytics, the meteorological field is undergoing an accelerated transformation toward intelligence. The innovation demands of meteorological science are driving continuous advances in automation technologies, whose in-depth application also provides important support for the intelligent transformation of meteorological services. This paper reviews recent advances in automation technologies for meteorology from three aspects: Meteorological sensing, meteorological forecasting, and decision-making services. For meteorological sensing, the applications of intelligent networked observation, distributed collaborative sensing, and unmanned swarm technology are summarized, and the role of control theory and system modeling in improving high spatio-temporal resolution observation capabilities is analyzed. For meteorological forecasting, the applications of deep learning and reinforcement learning methods in short-term forecasting and model optimization are reviewed, as well as the value of process automation and system engineering in improving forecasting efficiency. For decision-making services, the applications of knowledge graphs, intelligent reasoning, and autonomous decision-making technologies in disaster warning and emergency response are discussed. Currently, unmanned swarm meteorological observation, AI large-scale model forecasting, and intelligent decision-making are further promoting the deep integration of meteorological science and automation, providing key technological support for the development of efficient and intelligent meteorological service systems.

Keywords automation; meteorology; meteorological automation; meteorological monitoring; forecasting and decision-making

Citation Ge Quan-Bo, Lu Zhen-Yu, Zhu Feng-Zeng, Dong Jian-Ping, Zhi Xie-Fei, Zhang Heng-De. New progress in automation technology in the meteorological field. *Acta Automatica Sinica*, xxxx, xx(x): x-xx

收稿日期 2025-08-22 录用日期 2025-12-31

Manuscript received August 22, 2025; accepted December 31, 2025

浙江省自然科学基金 (LZJMD25D050001), 江苏省青蓝工程 (R2023Q07), 山东省自然科学基金 (ZR2025QC696) 资助

Supported by Zhejiang Province Natural Science Foundation (LZJMD25D050001), Jiangsu Province Qinglan Project (R2023Q07), and Shandong Province Natural Science Foundation (ZR2025QC696)

本文责任编辑 许斌

Recommended by Associate Editor XU Bin

1. 南京信息工程大学自动化学院 南京 210044 2. 临界空间环境特性及效应全国重点实验室 南京 210044 3. 大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044 4. 广东技术师范大学人工智能学院 广州 510665 5. 临沂大学自动化与电气工程学院 临沂 276000 6. 成都信息工程大学自动化学院 成都 610225 7. 南京

信息工程大学大气科学学院 南京 210044 8. 国家卫星气象中心 北京 100081

1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 2. State Key Laboratory of Environment Characteristics and Effects for Near-space, Nanjing 210044 3. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAEET), Nanjing 210044 4. School of Artificial Intelligence, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665 5. School of Automation and Electrical Engineering, Linyi University, Linyi 276000 6. School of Automation, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225 7. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 8. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

气象与人类生存发展息息相关,在长期的生产生活中,人类逐渐了解天气变化,并形成关于气象方面的认知.大气科学与自动化的结合是促进气象进步的重要手段之一.这种交叉融合不仅提升了天气预报的精确度以及实时性,并且借助大数据的灾害预测模型,建立气候适应性的科技防护墙.比如,采用自动化的手段改善农业气候资源配置模式、强化农业灾害监测体系,以提升农业灾害预警水平^[1-3].经典控制理论、机器学习、深度学习等人工智能技术,对气象领域的发展具有重要支撑作用.经典控制理论中的状态空间建模方法,可以将复杂天气系统和大气运动抽象为非线性动态系统,为数值天气预报提供数学理论基础^[4].同时,如何在含有噪声、有限观测条件下准确估计系统状态也是一项核心问题,其中集合卡尔曼方法因无需求导、易于并行化且能够显式刻画观测与模型误差结构等优点,成为多源数据同化的重要工具之一^[5-6].与此同时,自动气象站、雷达系统和卫星遥感等自动化观测设备可实时采集精细化气象数据,并通过相应的人工智能算法进行数据质量控制、异常值识别和纠正,为数据同化和数值预报提供高质量观测数据^[7].

近年来,机器学习被广泛应用于气象科学中的数据分析、资料同化、模式识别等领域,为气象科学的发展提供了新的思路和技术手段.数值预报模式通常采用经验公式对物理过程进行参数化描述,不能很好地表示复杂的物理过程之间的非线性相关关系.因此将随机森林、极端梯度提升树等集成学习方法应用于气象领域,在大量观测资料的基础上,利用其学习输入因子与预报量之间非线性关系的能力,自动挖掘气象感知数据的重要时空结构特征,并加强对物理过程的统计表示能力,显著提升数值模式相关参数化方案的效率及精度.研究表明,集成学习模型相较经典统计学算法及传统经验公式,在降水量预测、龙卷风、温度场修正等方面可以取得较高的预测精度,甚至已经开始取代经验公式^[8-9].另一方面,气象监测系统存在信息采集不充分的情况,并且传统的固定观测方案不能满足不断变化的气象监测需求,强化学习能够把观测网建模为马尔科夫决策过程,采用 Q-learning 等方法进行观测策略的在线学习.例如,在气象卫星观测频次控制方面,已经利用强化学习方法减少了数据冗余^[10].鉴于全球大气动力学建模计算成本高、模拟时间长等原因,传统的网格化数值模式很难有效地从格点间复杂的非线性相互作用中进行学习,而图神经网络可以将全球大气网格看作一个图,其中 Graph-Cast 等基于图注意力的模型实现了对格点间复杂关系的学习,并证明在中期预报中不仅比数值模式

快千倍以上,而且准确度远超过欧洲中期天气预报中心的高分辨率模式^[11-13].机器学习与深度学习等人工智能方法不仅弥补了传统方法在建模能力和计算速度等方面上的不足,并以数据驱动的方法为构建更加智能化、精准化的气象预测模型提供了强有力的支持.

随着人工智能大模型技术的发展,以气象科学数据为支撑的气象大模型正成为研究热点.例如,华为云气象大模型 Pangu-Weather 通过 Transformer 架构统一处理卫星和地面观测等多源数据,实现多模态预训练模型融合异构数据,在台风强度预测任务中,极大降低了 24 h 预报误差^[14].同时,混合增强智能系统结合数值模式的物理机理与 AI 大模型的数据驱动优势,提升气象预测精度、计算效率及可解释性.例如,在面向数字孪生海洋的研究中, Lee 等^[15]基于振荡水柱式波能装置的数字孪生平台,引入长短期记忆网络与深度集成不确定性量化及基于标准差缩放的后验校准,实现对海浪波高的实时概率预测及不确定性评估.基于 AI 大模型的自主智能体闭环决策在气象科学领域的应用也在不断深入, Mullapudi 等^[16]构建的深度强化学习暴雨排水控制智能体,可在暴雨径流管理模型模拟环境中自主学习闸门调度策略以削减洪峰流量.

气象科学与自动化科学呈现出协同发展的状态.一方面,复杂气象场景应用需求推动了自动化技术创新发展.例如,台风、强对流等极端天气为无人机-人工协同巡视提供了高动态、强干扰的实验场景,加快自主控制在复杂气象条件下迭代优化^[17];与此同时,面向机载边缘计算的严苛功耗与实时性约束,异构多核低功耗的人工智能 SoC 芯片可以支撑鲁棒控制算法的应用^[18].另一方面,自动化技术则通过方法论与工具革新反哺气象科学突破.例如,在气候模式中引入连续时间随机过程、平滑型参数估计等技术,可以刻画时间变参数并检验潜在结构性偏差^[19];基于集合卡尔曼滤波与极大似然的统计学习方法,可以从观测资料中识别出最优随机参数化形式及其噪声特征,从而改进多尺度动力系统的表征^[20];结合数据同化增量与稀疏方程,可以构建可解释的模型误差诊断系统,在准地转湍流试验中计算气候模式的线性与非线性结构性偏差^[21].这种气象科学与自动化技术协同发展,不仅体现在技术指标的提升上,更加促进了极端天气预报、算法硬件优化、高精度模拟等方向发展.

1 我国大气科学领域发展历程

极端气象灾害是制约经济社会稳定发展的重要因素之一,对交通、电力、物流等关键基础设施产生

严重影响,甚至引发灾害叠加效应,如干旱与洪涝的交替出现,不仅威胁粮食安全,也加剧了保险赔付压力,削弱居民消费信心,形成经济系统性风险隐患^[22]。如图1所示,为应对气象灾害挑战,我国将气象科技发展纳入国家战略布局,围绕现代化建设、自主创新与战略引领等方面推进气象能力体系升级。

21世纪以来,我国气象现代化建设持续推进,国家在综合气象观测系统、信息网络和数值预报等方面不断加大投入。2006年,国家发布了《国务院关于加快气象事业发展的若干意见》,要求加强气象基础保障能力建设^[23],随后通过“十一五”科技支撑计划及《气象发展规划(2011—2015年)》等政策实施,推动新一代天气雷达网和自动气象站网建设,全国范围内进一步推进雷达布局优化和业务系统升级^[24],显著提升了气象业务现代化水平。2014年,发布了《国家气象科技创新工程(2014—2020年)》,围绕国家级气象业务现代化重大核心技术突破,明确三大攻关任务为:高分辨率资料同化与数值天气模式,气象资料质量控制及多源数据融合与再分析,次季节至季节气候预测和气候系统模式^[25]。

2015年至2020年是气象科技融合发展与自主创新的关键期,国家在《全国气象现代化发展纲要(2015—2030年)》中明确提出推动建设气象强国的目标^[26],着力提高事关现代气象事业发展的核心领域科技创新水平。2016年和2018年分别出台了《全国气象发展“十三五”规划》和《加强气象科技创新工作行动计划(2018—2020年)》,强调以科技创新为核心带动全面创新,实现气象关键领域核心技术突破,切实提升气象监测预报科技水平与服务能力^[27-28]。为相关技术发展提供了方向指引和制度保障。与此同时,在雷达组网、卫星遥感及“天擎”气象大数据平台的建设方面取得了突破,气象感知和预报技术

得到进一步发展。

从2021年开始,我国气象科技发展进入到战略引领与前沿突破阶段。在该阶段国家进行顶层设计与全面部署,推进气象科技高质量发展,《中国气象科技发展规划(2021—2035年)》^[29]和《气象高质量发展纲要(2022—2035年)》^[30]也相继发布,明确了2035年基本建成智慧气象现代化的发展目标,建设具有中国特色的气象科技创新体系。2025年,中国气象局联合国家发展改革委印发《极端灾害性天气短临预警能力提升实施方案(2025—2026年)》,要求补齐中小尺度极端灾害性天气预报预警短板,进一步提升我国极端天气临灾防范能力^[31]。此外,习近平总书记也多次对气象工作作出重要指示,明确提出要实现“监测精密、预报精准、服务精细”,全方位提升气象服务能力。

上述政策的实施,进一步推动了我国气象感知、预报和决策系统的发展。国家层面的政策也为技术创新提供了发展指南和资金支持^[32],科研机构加大自动化、智能化等技术在气象领域中的研究,相关技术成果广泛应用在防灾减灾与公共治理实践中。总体来看,我国气象科学与自动化技术在一定程度上展示出政策与科技创新共同作用的发展趋势。

2 气象科学技术的全流程分析

如图2所示,感知系统、预报系统与决策系统是气象科学的核心,通过数据、预测和决策的闭环逻辑链实现气象服务的全流程协同。感知系统依托卫星、雷达及自动化地面观测网络实时采集多维大气数据(温/湿度、气压、风速等),其数据精度与覆盖度直接决定预报系统的输入质量^[33];预报系统基于数值模式与人工智能算法对感知数据进行融合计算,生成天气预测结果,其准确性受数据完整性与

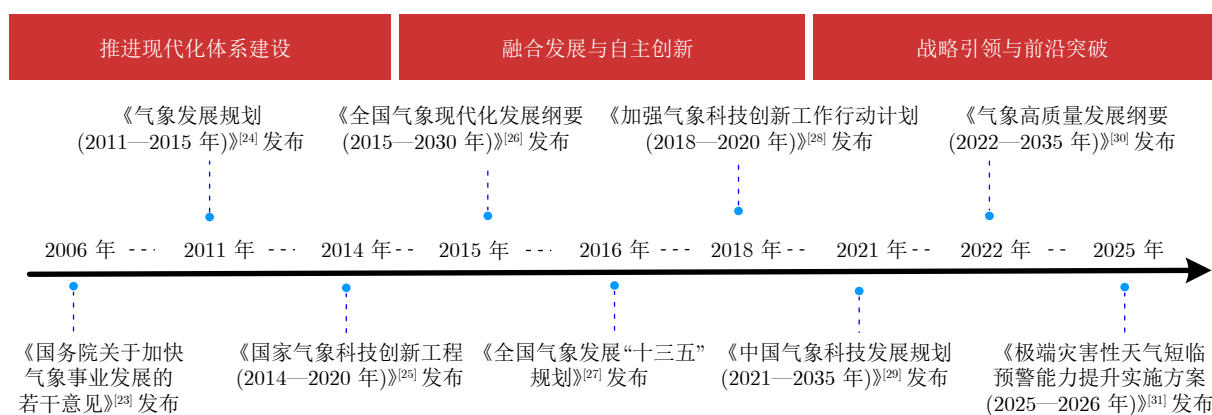


图1 气象强国建设阶段政策

Fig.1 Policies for the stage of building a meteorological power

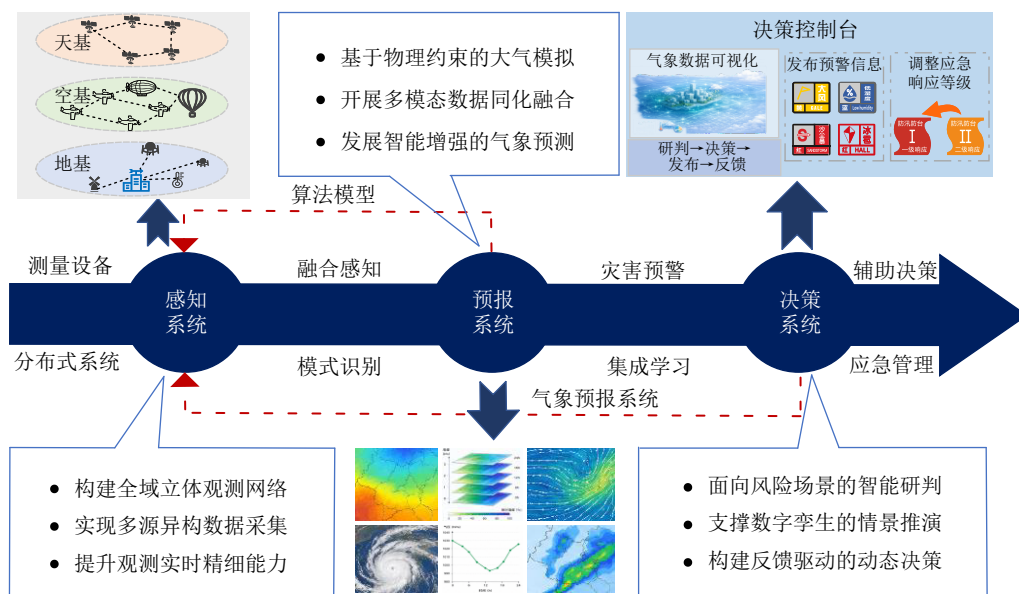


图2 气象科学技术三要素之间的逻辑关系

Fig.2 The logical relationship between the three elements of meteorological science and technology

算力水平的约束; 决策系统则根据气象预测与社会经济数据, 面向农业防灾、交通调度等场景定制相应策略, 完成从气象数据到行动的转化^[34]. 感知系统、预报系统与决策系统形成级联依赖与功能互补的形式, 协同促进气象科学向精准化、智能化持续升级.

气象科学技术的感知系统是气象服务的基础, 其核心在于通过分布式系统构建多层次、广覆盖的观测网络, 依托地面气象站、卫星等设备实时采集大气、海洋及陆地圈层的温度、湿度等关键参数. 考虑到实际的气象观测结果在空间和时间上存在不完整的问题, Hooker 等^[35] 在卫星测量地表温度的基础上, 运用遥感技术监测并建立气象观测数据库, 构建包含地理和气候相似性信息的统计模型, 从全球遥感地表温度预测气温. 在动态场景下, 自适应控制与反馈优化控制机制使气象感知系统能够根据环境变化自主调整观测频率与设备运行状态, 确保数据的实时性与可靠性. 例如, 将压缩感知理论应用于气象雷达信号处理中, 以克服传统气象雷达提高分辨率时面临的采样率过高、数据存储空间过大等问题^[36].

气象科学技术的预报系统以探测模式为核心, 通过整合卫星、雷达、地面观测站等多源传感器数据, 融合感知与模式识别算法, 对海量气象数据进行实时处理, 提升初始场精度. 随着气象监测网的建设和计算机技术的不断发展, 气象预报技术逐渐发展为数值化气象预报^[37-40]. 系统状态滤波与预测

技术通常是数值预报的基础, 它一般以描述大气运动的动力学方程为基础建立高解析度模型, 预估若干小时到几周之后的大气变化情况. 倪银浩等^[41] 提出基于多源异构数据的 T-Unet 站点气象要素预测模型, 通过基于傅里叶神经算子与 Vision Transformer 的预测模型, 实现了站点气象要素预报和总柱水汽预报. 单站气象雷达技术针对不同天气状况, 通过发射电磁波探测大气中的气象目标, 其原理为经过目标反射或者吸收电磁波, 通过雷达接收的不同回波信息生成高精度的天气数据, 这些数据可以为城市防洪预报提供数据支持^[42].

气象科学决策系统的本质是建立气象科学认知的感知、分析、决策和反馈循环机制. 利用大数据分析, 由分布在不同位置上的各类观测手段 (如卫星、雷达、地面站网及传感设备等) 组成的观测体系, 获取海量气候数据, 并基于人工智能算法对这些数据进行挖掘处理、判断识别, 基于深度神经网络、卷积神经网络等技术实现确定性和集合预报的结果后处理^[43-48]、替代集合预报^[49-50] 等, 完成对后处理的数据偏差修正. 在决策生成方面, 使用混合增强智能体系, 将数值模式物理约束条件同集成学习预测结果相结合, 并利用以经济损失、人员安全、生态影响等为约束条件的目标函数进行灾害应急方案规划; 其反馈优化机制一方面利用自适应控制方法对目标函数参数进行在线调节 (例如采用强化学习方法进行台风路径跟踪误差补偿), 另一方面基于数字孪生建立虚拟仿真场景, 对预案进行沙盘演练及

风险分析. 在应急指挥方面, 将地理信息数据和经济社会经济模型相结合, 自动划定灾害影响区域并进行救援资源时空最优配置; 在气象经济系统中建立定量描述气象与经济之间的数学关系, 在气象经济决策上作费用效益分析, 并以此来评估由气象灾害带来的经济损失以确定最佳决策, 对获得最优的经济利益有着非常重要的意义和作用^[51-52].

3 自动化与气象科学的内在关系

自动化与气象科学的技术融合是驱动气象业务走向智能、系统的重要因素之一. 为明确两门学科之间技术上的关联性, 根据国家自然科学基金委给出的学科体系梳理出自动化 (F03) 与大气科学 (D05) 的技术对应关系, 如图 3 所示, 并在此基础上探讨自动化技术对气象学的主要支撑作用.

1) 自动化技术在气象感知、预报与决策环节中的体现.

在气象感知环节, 大气观测、遥感和探测技术与方法 (D0508) 是气象系统的信息源, 其核心是多源大气数据的高精度获取与融合. 面对复杂与高频动态变化的气象环境, 自动化检测技术与装置 (F0306)、人工智能驱动的自动化 (F0310) 及机器人学与智能系统 (F0309) 在此形成技术协同. 自动化检测技术与装置 (F0306) 中的无人探测、智能传感网络技术服务气象数据采集, 机器人学与智能系统 (F0309) 中的环境感知机器人、无人平台遥感技术拓展了观测场景的覆盖范围. 例如, 环境感知机器

人可深入高原、海洋等人类难以作业的区域, 实现大气物理特性、成分的近距离探测; 无人平台遥感则能结合多源融合感知能力, 获取空天地多维度气象数据, 与自动化检测技术与装置 (F0306) 的自动校准技术配合, 可提升观测数据的时空一致性与准确性. 与此同时, 人工智能驱动的自动化 (F0310) 通过深度学习与反演算法实现观测数据的智能解析. 研究表明, 小型自主无人观测平台凭借灵活部署与环境适应性, 显著提升了局地气象探测能力^[53-54], 而 AI 驱动的反演算法在大气成分反演与极端事件识别中表现出优越的精度与稳定性^[55-56]. 因此, 自动化技术在气象感知领域的交叉融合, 构建了自动化观测、智能反演和实时校正的感知体系, 使大气观测从传统的静态采集向动态感知与智能优化转变.

在天气预报方面, 大气动力学 (D0504) 和大气数值模式发展 (D0510) 是气象系统的理论与计算的核心部分. 大气动力学是一类典型的非线性和多尺度系统, 其建模以及预测精度在一定程度上依赖于控制理论与技术 (F0301) 或者人工智能驱动的自动化 (F0310) 支撑. 控制理论能够提供包括系统建模、奇异摄动分析和最优控制在内的数学工具, 为复杂大气过程中的尺度分离、稳定性以及误差分析奠定基础^[57]. Kokotovic^[58] 提出的奇异摄动理论实现了快慢变量分离, 以及从局地湍流到全球环流的多尺度动力分析; 四维变分资料同化可以将最优控制方法引入模式初值优化中, 可以有效提升数值预报系统的稳定性与可控性^[59]. 与此同时, AI 的引入突

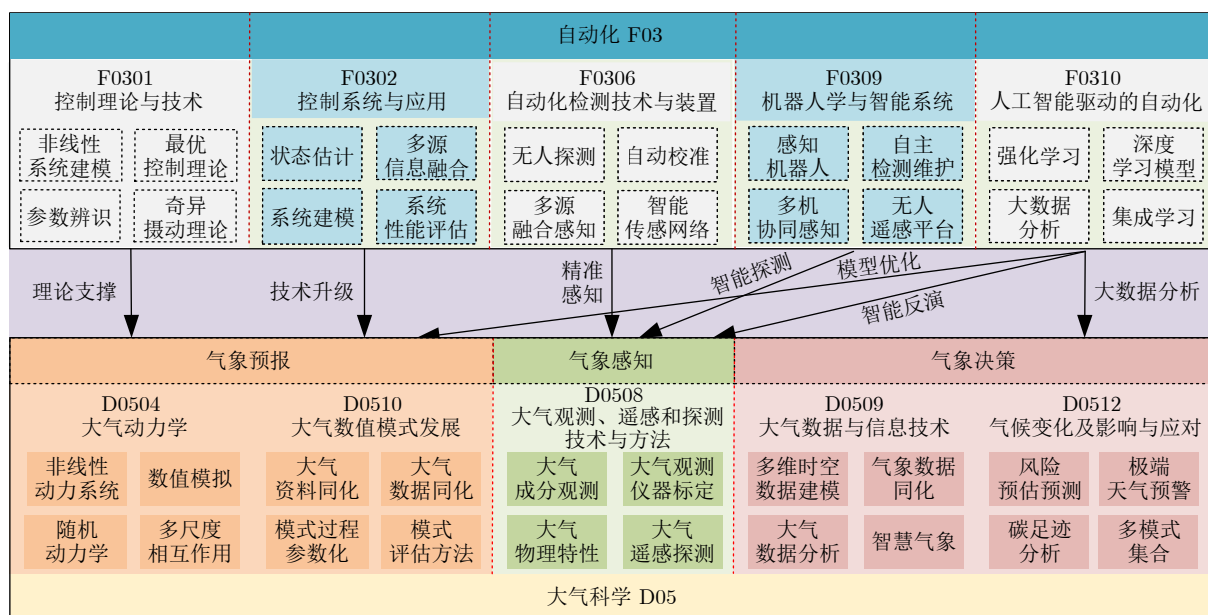


图 3 自动化与大气科学学科交叉技术关联图

Fig. 3 Interdisciplinary technology correlation map between automation and atmospheric sciences

破了传统动力学方程的解析限制. 人工智能驱动的自动化 (F0310) 利用深度神经网络、证据推理、生成模型表示复杂大气过程的非线性, 具备对极端天气建模及短临预测泛化程度高、精度高的优势^[60-62]. 如 Schmude 等^[63] 基于 AI 大模型 Prithvi WxC 实现了大气动力过程模拟, 为数值模式的发展提供了新的技术途径. 此外, 大气数值模式的工程化提升也需要控制系统与应用 (F0302) 和 AI 的融合^[64]. 控制系统方法可通过状态估计及性能评估^[65] 对模式输入、边界进行优化, 而人工智能驱动的自动化 (F0310) 在过程参数化建模、基于深度学习的误差订正方面, 有利于提高预报系统的智能化程度^[66]. 因此, 在气象预报阶段, 控制论提供的是可理解的物理限制条件和最优解的方向指引, 而 AI 则提供了强大的自主学习能力和模式泛化能力, 二者共同助力于将气象预报由经验预报转变为智能预报.

在气象决策环节, 大气数据与信息技术 (D0509) 以及气候变化及影响与应对 (D0512) 构成了气象业务的“智慧中枢”, 其主要任务是从预报产品转化为业务指令; 自动化检测技术与装置 (F0306) 实现了通信支撑下的广域气象信息的时空同步, 人工智能驱动的自动化 (F0310) 能够完成数据分析、分析和推断, 支持气象数据、知识和决策的快速转化. 尤其是对气候变化的研究及风险管理领域, 人工智能驱动的自动化 (F0310) 贯穿于碳观测、气候风险评估、政策制定以及行动调控等方面, 在可持续发展目标下形成了智能辅助决策系统^[67-68], 并不断利用数据进行预测评价与优化反馈以促进气象决策智能化的发展^[69-70].

综上所述, 自动化技术在大气科学的不同领域中实现了分层嵌入融合. 自动化检测技术与装置 (F0306) 和机器人学与智能系统 (F0309) 主要融合在气象感知环节中, 可以实现自动化观测与智能反演; 控制理论与技术 (F0301) 和人工智能驱动的自动化 (F0310) 共同支撑气象预报环节, 提供控制优化与智能建模; 人工智能驱动的自动化 (F0310) 和自动化检测技术与装置 (F0306) 贯穿了气象决策环节, 推动气象信息与治理体系的智能化升级. 自动化技术在气象领域的这三层嵌入融合, 形成了观测自动化、预报智能化和决策智慧化, 充分体现了自动化技术在气象系统中的价值与学科融合深度.

2) 自动化技术在气象系统中的核心贡献.

自动化技术贯穿于整个气象系统建设与应用过程之中, 在气象业务中的作用有三方面: 第一是气象感知层面上, 自动化技术支撑智能的数据获取, 利用控制论、自适应调度以及分布式协同技术, 实

现了由静态、间断性的观测到动态、连续化的观测转型, 并实现了多类型数据自动采集、实时传输和质控. 无人集群观测、智能传感网与边缘计算结合, 在提高观测精度和空间覆盖率的同时保证了高时空分辨率气象资料的获取^[71]. 第二是气象预报方面, 自动化导致智能演化和自优化系统的产生, 利用控制论、系统建模和人工智能算法实现气象数值预报系统从基于人的经验到智能转变. 自动同化、实时反馈、流程融合使得数值模式具备自我更新及进化的能力, 并可实现预报业务的自动化以及精细化; AI 大模型和最优控制相结合增强了复杂非线性大气过程的刻画能力, 显著提高了强灾害性天气的预测预报时效性和准确率^[72]. 第三, 在决策端, 自动化驱动智能气象服务供给. 以知识图谱、强化学习和系统工程为手段实现气象数据到决策的智能化. 气象决策系统可以自适应地整合气象和社会、经济等多元数据, 并进行风险评估和决策优化, 在灾害预警、应急响应和服务各行业的过程中表现出显著的自主性和可靠性^[73]. 综上所述, 自动化技术不仅保障了气象业务的开展, 而且实现了气象业务的智慧化, 在整个气象业务的感知、预测以及决策过程中形成了一个较为完善的循环流程, 有效提升了气象业务的整体时效性、工作效率及智慧程度, 为实现高水准、完全自动化的现代化气象服务提供了有力支持.

4 气象监测自动化技术

本节主要讨论气象监测阶段的相关智能化方法和技术, 包括智能传感网络、无人集群观测、边缘计算感知融合等方面的关键技术及其在气象感知中的应用. 气象监测作为整个气象业务的起始, 其目标是及时、有效地获得丰富的三维气象数据, 而随着传感器小型化、通信网智能化的发展, 自动化技术促进气象监测系统朝着高时空分辨率、实时可靠以及智能协同方向发展^[74]. 在此背景下, 基于智能传感网络进行多节点分布式协同可完成对地面、海洋及大气多层次的监测; 无人机群、无人船群增加对恶劣条件下的三维观测^[75], 而边缘计算与压缩感知算法则可以极大地提高对数据的实时处理能力以及剔除无效数据的能力. 结合控制论及自适应方法可实现基于气象监测网的数据采集频率、方式随外部条件的变化进行自动调节, 以达到最佳观测状态的目的. 自动化技术应用于气象监测主要有以下三个方面的优势: 1) 提高空间分辨率, 即通过智能传感与自组网观测, 提高数据覆盖的细粒度与一致性; 2) 提高时间分辨率, 即通过动态调度与反馈控制机

制提高数据更新率; 3) 提高气象监测系统可靠性, 即通过边缘计算与自诊断算法降低设备失效率与数据冗余度。

以气象感知系统为主的自动化 (F03) 技术支撑见图 4, 旨在建立以智能化传感器为主导的全方位的气象感知系统。围绕提高时空分辨率两个维度, 自动化的六个二级学科共同作用于气象感知: 控制理论与技术 (F0301) 借助非线性系统的控制与最优控制方法, 对各类观测手段 (传感器阵列、雷达以及无人平台) 实现智能控制和扰动抑制, 维持各类观测设备处于正常的工作状态, 特别是恶劣天气条件下保障观测的质量^[76]; 控制系统与应用 (F0302) 包括各类传感器阵列的协同作业和动态管控, 实现探测装备的智能化和自动化; 系统建模理论与仿真技术 (F0303) 发展更高精度的数值模式与模拟方法, 为网络规划、设备架构以及观测指标选取等提供分析基础^[77]; 自动化检测技术与装置 (F0306) 中的智能传感技术、物联感知终端技术和分布式感知等技术, 能够对温度、相对湿度、大气压力、风速等气象变量进行高频精细化观测; 人工智能驱动的自动化 (F0310) 将机器学习方法和多模态融合算法引入观测数据预处理阶段, 实现异常数据识别、数据缺失补全与特征提取, 大大提升了数据的一致性及数据质量^[78]; 新兴领域的自动化理论与技术 (F0311), 即在不泄露隐私的前提下运用新型技术 (例如量子计算、边缘计算、联邦学习等), 使监测系统具备低功耗、去中心化和智能化的特性^[79]。总之, 这些技术形成全方面、精准和智能协同的自动化天气监测网络, 是实现高时空分辨率气象观测以及智能化气象服务的重要基础。

当前, 监测空间密度增强与时间响应加速是气

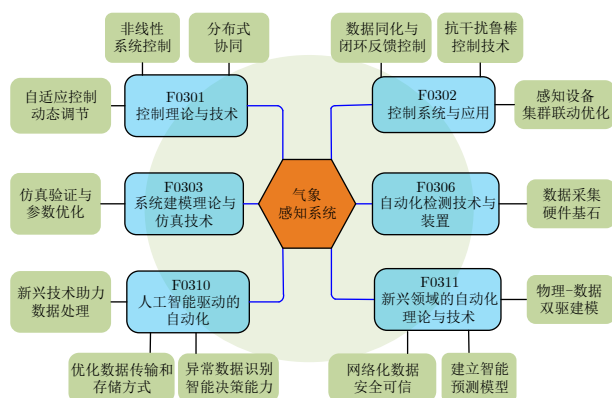


图 4 自动化科学支撑的现代气象感知系统关键技术架构

Fig.4 Key technical architecture of the modern meteorological sensing system supported by automation science

象感知技术发展的重要方向。空间上, 智能传感节点自组网多层协同实现地、海、空一体化观测, Zig-Bee、LoRa、5G 异构网络覆盖极地、海洋、城市边界; 激光雷达结合自适应波束控制及阵列补偿技术可以提高强对流场中的虚假信号抑制率^[80-82]。在时间层面, 边缘计算与模型预测控制相结合, 可以实现观测频率的动态调优, 提高关键要素更新速率, 缩短强对流监测时间^[83-84]。同时, 仿生协同算法与多模态学习等方法, 使无人机与地面观测节点形成智能分工机制^[85], 在南极、高原地区等恶劣环境中也能达到跨尺度的数据融合的一致性; 新技术的应用也有效改善了系统的响应能力, 例如利用物理约束下的深度学习以及数字孪生进行虚拟与现实之间的交互式感知, 利用量子计算方法能够提高观测设计的有效性^[86-87], 利用联邦学习可以在保护个人隐私的前提下对全世界范围内的模式数据进行大规模并行处理。这些都充分说明, 智慧传感器实现了观测到探测的转变, 而多尺度空间和时间维度上更高分辨率的数据质量则是实现精细化预测和服务的前提条件。气象自动观测系统通过智能感应、实时计算及数据融合, 实现多种观测手段的联合观测, 高质量的观测数据是提供给气象预报系统的可靠数据源, 也是完成监测、预报以及决策反馈的关键一环。

5 气象预报自动化技术

本节主要关注气象预报中的自动化的相关工作, 包括数值模式改进、人工智能在短临预报中的应用、资料同化自动化以及超级计算机的应用等。气象预报是将观测资料转化为对未来状况的一种预测, 是一种使用智能化模型来模拟整个天气演变过程的科学方法, 在短时间内对未来的天气进行准确预报。传统的数值天气预报借助自动化方法, 如控制论、建模和流程整合等, 实现提高模式稳定性和计算速度。在人工智能技术融入气象预报后, 其深度学习、图神经网络及强化学习等算法被广泛应用于短临和模式修正领域。其中, AI 模型修正主要用于挖掘大气过程中的非线性特征, 可提高短临预报水平^[88]; 数据同化利用深度生成模型和变分控制算法可以高效地完成观测与模式状态的融合^[89], 获得更高精度的初始场; 高性能并行计算及智能调度将预报时间由小时级缩短至分钟级, 有助于对强对流天气进行提前预警。自动化技术对于气象预报环节的主要贡献有: 1) 数值预报模式自动改进, 即通过 AI 和控制理论实现动力方程约束下的模型自适应; 2) 短临快速预报, 即通过深度神经网络与图学习等方法实现端到端智能预报。

表 1 国际与国内气象预报自动化体系比较
Table 1 Comparison of international and domestic automated meteorological forecasting systems

对比维度	国际代表体系 (ECMWF、GraphCast 等)	我国代表体系 (CMA-GFS、 Pangu-Weather 等)	差距与不足	我国特色与潜在优势
核心模型与技术路线	高分辨率数值模式与先进资料同化技术成熟, AI 预报快速发展	CMA-GFS 持续升级, Pangu-Weather 等 AI 模型快速发展	AI 预报稳定性、可解释性及极端天气适应能力有待提升	数值模式与 AI 融合发展, 本地化适配优势明显
算力与计算架构	依托大型超算平台支撑全球业务运行	国家超算中心与国产 AI 芯片形成多元算力体系	专用算力规模及软硬件协同能力仍有差距	自主可控算力体系持续完善, 体系配置灵活
业务化与服务体系	集合预报与概率预报体系成熟, 支持全球风险评估	“监测-预报-预警-服务”一体化体系持续智能化发展	数据共享与跨部门协同机制有待加强	区域化、行业化服务响应快速, 地方需求对接紧密
科研与开放生态	数据开放程度高, 国际协同科研生态活跃 (如 Copernicus 等)	自主研发体系为主, 共享机制逐步完善	模型接口的标准化与模块化水平仍需提升	科研、业务与产业链结合紧密, 成果转化效率较高

术也被用来对模式进行智能修正. 时间序列模型已经成功应用到臭氧浓度等中长期预报中, 并取得了预测值与实测值的相关性高达 0.951 的成绩^[102]; 深度学习 (例如长短记忆网络及时间卷积网络) 可以捕捉非线性的时间序列, 在 12 h 以内短临预报方面甚至优于传统的 NWP 模型^[103]. 此外, 混合模型也有很大的发展潜力, 如 C5.0 决策树结合 K 均值聚类应用于 NASA 全球大气再分析数据集, 达到了 90.18% 的预报精度^[104]; 利用非高斯特征融合方法进行多模态观测数据挖掘, 以提升数据驱动模型的特征表示能力^[105]. 以上工作均推动了从简单线性修正向复杂非线性自适应修正发展的趋势, 为数值预报提供了更高稳定性和灵活度的平台支撑.

对于短期临近快速预报而言, 借助于深度学习以及超算的发展, 端到端的人工智能气象预报成为主要发展趋向. Xu 等^[106]提出的 FourCastLSTM 模型, 将自适应傅里叶神经算子与 LSTM 相结合, 并加入图像细节增强及自适应特征融合模块, 有效地结合了全局与局部时空特征, 提高了不同强度降水的临近预报精度. 同时, 图神经网络显式建模大气变量的空间关系, 提高了对中尺度天气系统描述的能力^[107]. 此外, 短临快速预报逐步转向智能的数据同化, 随着 AI 预报模式的不断完善, 研究者开始思考将其应用于数据同化中, 在此基础上进一步提高预报时效及精度. 传统变分与集合 Kalman 同化方法针对强非线性系统 (如台风、强对流), 由于受到线性近似以及计算成本限制而无法做到高频率的实时更新. AI 数据同化方法基于深度生成式网络或 Transformer 架构来挖掘观测资料与模态之间的非线性关系, 不需要显式地求解 Jacobian 即可进行快速的状态更新, 并实现数据、物理和模型的动态融合. Xu 等^[108]将 Pangu-Weather 的预报结果应用于天气研究与预报, 并验证了 AI 模型对台风路径及强度预报的改进; 其另一项研究^[109]进一步发现, 在极端降水的预报方面, 该框架具有更好的时效性和空间一致性. 综上所述, 自动气象预报技术发展

将促进预报业务智能化发展. 面向智能感知信息的数据实时同化及人工智能算法模型的改进, 在提高预报准确率及时效性的基础上为气象业务应用智能化决策提供了一定的技术支撑.

6 气象决策自动化技术

针对气象服务领域中的决策自动化技术, 在气象灾害预警、应急调度与行业服务等方面, 着重研究 AI、知识图谱、强化学习及数字孪生等技术的应用情况. 气象业务领域的决策部分处于监测、预报和决策链路上的末梢位置, 需要把预报结果转换为具体的行动计划, 形成基于数据驱动的自动决策链. 传统的气象决策是基于人工经验和固定业务规则进行的, 在复杂的、不确定的气象灾害环境下无法实现科学决策^[110], 而借助于 AI 手段可以逐步将被动式决策转变为前瞻性与实时性决策. 通过知识图谱构建气象业务知识及灾害机理的语义网络, 系统能够实现多源数据和历史事件的关联推理^[111]; 强化学习与混合增强智能算法可在应急响应与资源分配中自动寻优, 实现多目标平衡; 数字孪生与情景仿真系统则为决策验证与风险评估提供虚实结合的实验平台. 智能气象决策系统主要包括三个方面: 1) 知识建模与融合, 即, 利用 AI 和知识图谱技术对气象业务知识、灾害机理以及专家经验进行结构化表示, 并建立语义关系以辅助模型构建和决策; 2) 模型优化与学习, 即基于统计学习方法、深度学习方法和强化学习方法不断增强气象决策模型复杂环境下的自适应性和自主学习能力, 实现由经验主导向数据主导的变革; 3) 系统集成和服务, 即, 以系统论和云计算为架构, 在融合观测、预测、模拟和服务的过程中, 形成能够被多个单位访问使用并快速做出反应的智能决策系统, 支持气象业务服务的安全、有效和稳定^[112].

图 6 展示了以气象服务决策系统为中心的自动化 (F03) 技术支撑结构. 面向气象数据获取及分析、决策建模及分析和智能发布, 六大自动化的子

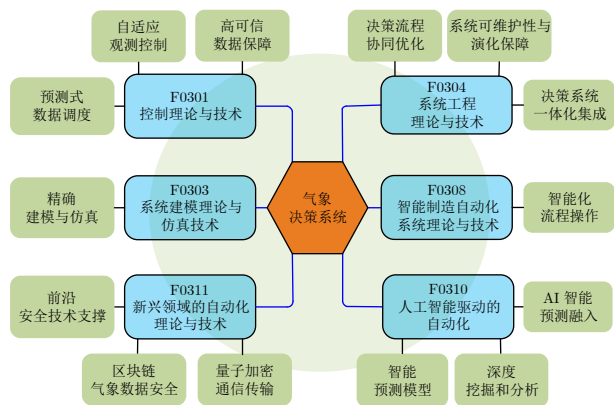


图6 自动化科学支撑的现代气象决策系统关键技术架构

Fig.6 Key technical architecture of the modern meteorological decision-making system supported by automation science

方向相互支撑: 控制理论与技术 (F0301) 利用自适应控制、模型预测控制等方法对气象数据采集与传输进行控制, 保证气象数据获取的有效性与时效性, 从而为气象决策提供可靠的依据^[113]; 系统建模理论与仿真技术 (F0303) 对气象要素变化、服务需求反应等进行精细化建模以及仿真辅助决策模型建立与验证, 如对不同气象条件下社会经济损失的影响进行模拟, 从而给出超前的决策建议^[114]; 通过系统工程理论与技术 (F0304) 进行全局性设计, 融合气象数据源、决策规则及服务载体, 增强系统的耦合度及易维护性, 保证决策过程的有效进行; 智能制造自动化系统理论与技术 (F0308) 对于气象数据预处理、决策模型训练等工作可通过智能化 workflow 执行, 并且可以通过并行运算加快处理速度, 减少决策时间; 人工智能驱动的自动化 (F0310) 利用深度学习、强化学习等算法对大量气象信息及历史决策方案进行挖掘处理^[115], 实现智能决策模型的自主更新完善, 精确适应于各情形下的气象服务; 新兴领域的自动化理论与技术 (F0311) 探索区块链在气象数据的安全共享、量子通信在数据加密传输等方面的运用, 为气象服务决策系统的安全性及可靠性提供前沿技术保证^[116]。上述六个方面相辅相成, 形成高效、智能、安全、可靠的气象服务决策系统, 反映了智能系统对气象服务决策工作的有力支撑。

以上这些方法的应用为气象服务决策系统提供了理论基础和技术手段, 并逐步向知识建模、模型优化和系统协同的方向发展, 呈现出由经验决策到智能决策的系统化升级的趋势。一般传统的气象服务决策模型多基于专家经验和统计规律建立, 如农业气象服务模型往往是根据以往的气象资料以及农事经验来提供农事操作意见, 然而其对于多维气象

因子之间复杂的非线性关系以及不同地区之间的异质性特征缺乏考量, 难以实现准确、个性化的决策^[117-119]。为此, 在表征知识的方法论上进一步融入了物理机理的知识和观测信息的数据同化方法, 例如针对风电场的发电预测及电力调度等问题, 开展了大气边界层物理机制和风电机组特性的描述, 提高了风力发电功率预测精度^[120]; 模型优化及机器学习方面, 统计学习与人工智能方法广泛应用于决策优化以及风险评价等领域, 多元回归及逻辑回归可用于量化交通气象因子对交通流量与事故的影响, 并用于应急响应支持^[121]; 而基于机器学习及深度学习的方法 (如支持向量机、卷积神经网络) 则可以利用大量的气象资料及灾例进行训练, 以实现灾情辨识、预报以及动态决策^[122]; 另外在系统集成和服务方面, 城市气象、海气气象、能源气象等行业也进一步加强多元数据融合与多部门间的数据互通, 融合地面观测试验、遥感、无人机、传感网数据的全场景智能决策支持^[123-126]。以上相关研究表明, 气象服务决策自动化正逐步通过知识结构化、算法智能化、系统协同化的方式实现数据、决策的闭环优化与实时响应。气象服务决策自动化以数据驱动、知识融合、智能决策为核心, 完成了气象观测、预测与决策的完整链条。人工智能与系统工程将助力决策系统在防灾减灾救灾、电力、交通等领域实现自动化、智能化、可解释性地实时制定应对方案。

7 自动化科学在气象领域的应用发展方向

随着新一代信息技术与气象业务的深度融合, 气象自动化技术面临前所未有的发展机遇。图7展示了自动化前沿技术在气象各环节中的共性挑战、关键技术路径及预期成效, 总结了气象自动化在感知、预报、决策、新兴空域及新能源系统中的典型发展方向, 为未来气象自动化体系建设提供参考。

7.1 气象感知自动化发展方向

高精度气象预报与风险预警需要气象感知网络具有智能化、协同化和多平台融合能力。当前, 以地面站、雷达、卫星为代表的固定观测网已实现规模化部署, 但面对快速演变的强对流、龙卷风等极端天气过程, 固定观测仍然存在一定的响应滞后、覆盖盲区和空间分辨率不足等问题。近年来, 随着以无人机、无人车、无人船为代表的新一代无人系统观测平台迅速崛起, 其具备机动部署、三维探测、高风险区作业的能力是提高对极端天气立体感知的有效补充^[127]。但异构观测装备在性能差异、环境适应、协

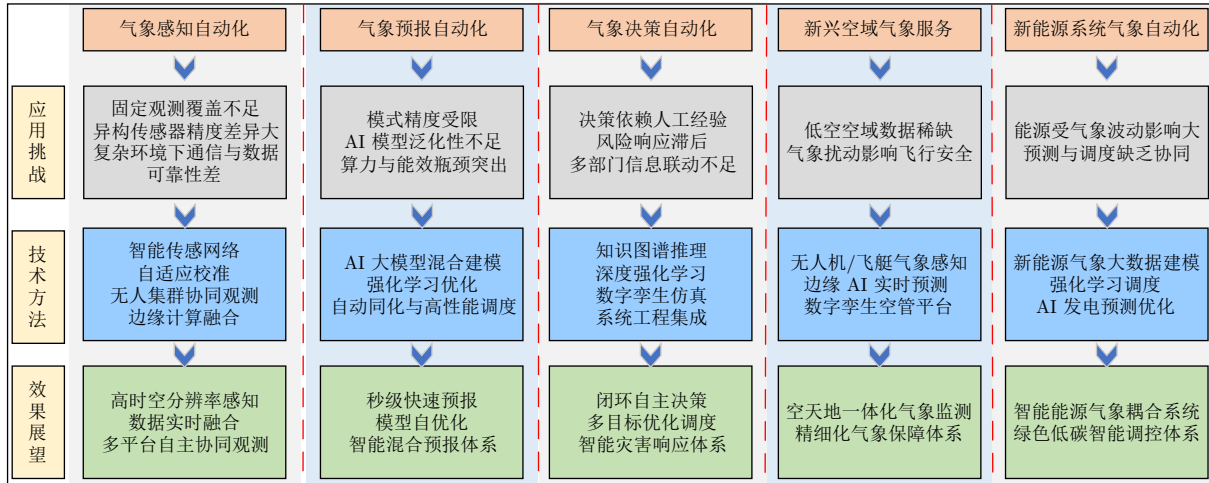


图 7 气象自动化未来发展总体框架

Fig.7 Overall framework for the future development of meteorological automation

同调度等方面仍面临巨大挑战,特别是在强风、暴雨等极端天气条件下,传感误差、数据畸变、信道抖动等问题影响观测数据的稳定性及完整性^[128]。气象感知智能化方向主要是:迫切需求智能传感器的自标定及状态监测技术,保障感知设备的可用性及可持续服役能力;发展无人多平台动态编队及自主协同技术,增强复杂环境下空间覆盖及观测效能;建立边缘端多源信息实时融合方法,提高大容量观测系统的数据融合及异常处置能力;探索具有故障诊断、自我恢复以及任务自适应能力的智能化观测系统,建设主动应对极端天气气候事件、快速响应、智慧联动的一体化新型综合气象观测体系,为精细化灾害监测及预警预报提供有力的数据基础保障^[129]。

7.2 气象预报自动化发展方向

数值预报系统智能性和自动化程度直接关系到气象预报精度、效率和时效。近年来,随着人工智能气象建模技术的发展,推动着预报模式由传统物理约束转向数据驱动发展。特别是 FourCastNet、Pangu-Weather 等超大规模人工智能预报模型,显著提高了预报效率。但是人工智能模型的泛化能力受限于训练数据覆盖不全、极端天气样本少等原因^[130],如何提高大模型对突发性、极端性和局地性天气系统的适应性是亟待解决的问题;另外人工智能算法模型受计算资源限制,在实际业务部署方面还存在算力和能耗优化不充分,在面对台风、强降雨等突发性强天气时,现有自动化的资源分配算法无法做到对任务优先级进行动态更新以及对资源的即时重构,制约了对预报响应的灵活性和及时性;基于人工智能技术的预报产品生成过程中的质控手段及结果的可信度评价能力较弱,尤其是在缺少物理一致性约

束和不确定性量化的情况下,容易出现“看似合理但不可靠”的伪预报。因而,下一步应针对数据、模型、算力及产品四个关键环节,统筹攻克动态模型自适应优化、大模型多尺度泛化增强、算力智能调度与优先级重构、人工智能结果可信性评估与不确定性表征等关键技术难题,打造更加智能化、可信化、效率高的人工智能辅助数值预报业务体系,为准确、及时、可靠的气象预报服务打下良好的基础。

7.3 气象决策自动化发展方向

气象服务决策的智能性和自动化程度决定了防灾减灾、应急响应以及行业保障的服务实效性。目前,利用知识图谱、规则引擎与人工智能推理进行智能决策,在交通、能源、农业等领域的气象服务中有所尝试,可完成业务知识的体系化存储及服务方案的自动适配^[131-133]。然而,在面对用户需求变化、气象风险场景多样化的情况下,现有气象服务产品决策机制大多不具备自学习、自更新的能力,无法做到灵活的自动决策调控。在应急响应领域,仍存在决策粗糙、适用性差和实时性不足等问题,特别是在多部门、多层级协同决策中,缺乏面向复杂约束条件的智能博弈与联合优化机制。此外,随着气象服务边界从单一行业扩展到城市治理、生态保护和社会管理等更广泛领域,如何实现基于海量信息流、以具体任务为导向、结合知识图谱与模型的多种情境下的智能化决策能力,并协调自主智能系统与人工干预是提高服务质量与控制水平的关键所在。下一步研究应聚焦于基于知识图谱与强化学习的情境适应型智能化决策方法的研究。增强系统的复杂需求和突发事件的快速响应能力;研究多部门协同的智能博弈与资源调度方法,提升应急响应的

科学性和协调性;建立多尺度、可解释、可控的智能决策支撑平台架构,建设满足多元化需求、快速响应、智能协同的新一代气象服务决策支撑平台,为有效防灾减灾、智慧社会治理等提供有力支撑。

7.4 新兴空域气象自动化发展方向

面向无人系统应用场景,城市空中交通和无人机集群作业的快速兴起对高时效、高精度、广覆盖的气象自动化服务提出了前所未有的挑战。无人系统在复杂低空环境中运行时,容易受到微尺度湍流、风切变及强对流天气的干扰,当前低空气象观测存在探测精度不足、抗干扰能力有限、实时响应滞后等问题^[134-135]。因此,迫切需要发展以无人机群和微型气象雷达为基础的智能组网的观测技术,构建动态可重构的三维风场监测网络,提高近地空域500 m以下的气象感知覆盖能力。同时研发低空飞行航路预警系统,将实时气象观测数据与无人机飞控系统融合在一起,并基于在线学习算法对突发恶劣天气进行动态适应,实现自主避让及航迹规划。另外,还需要搭建以满足空管应用为目标的数字孪生系统,借助人工智能技术实时调控空间资源分配,增强对短临天气变化的有效应对能力。在更高的临界空域中(20~100 km),由于观测手段和技术水平的限制,对平流层和中间层区域的大气状态的监测和预测能力有限。当前,需要突破适合于平流层飞艇和太阳能无人机动平台上的智能探空系统,克服稀薄大气中的传感器标定和数据稳定性问题^[136-137]。同时发展跨尺度、多源数据融合算法,综合天基、空基与地基观测信息,建立自动处理框架,加强中层大气异常现象(如重力波)和夜光云观测及分析研究。为支持临界空域战略预测的需求,还需要开展具有物理约束的AI模型的研究以加强对电离层扰动、空间天气突发等重大异常事件的超前预警能力,服务于国家高空安全和前沿科学应用。

7.5 新能源系统气象自动化发展方向

“双碳”背景下,新能源是能源变革绿色发展的重要组成部分。风电、光伏发电高度依赖于气象条件,并存在不稳定性、间歇性和随机性等特点,给电网调度及供需平衡带来极大难度。“气象+新能源”的融合发展迫切需要提高新能源气象服务的自动化、智能化和业务化水平。一方面,发展风电、光电等新能源资源精细化观测及预报技术,建设新能源场景适用的智能化感知与动态监测系统;另一方面针对新能源出力、储能调配、用电负载等业务应用需求,构建跨时空、多模式、高度耦合的新能源气象预报系统,提高新能源的功率预测准确率与可靠性^[138-139]。

同时,结合智能电网及市场发展新能源气象驱动智能决策支持系统,实现从资源评估、功率预报到调度决策服务链,提升新能源消纳能力和电力系统运行效益,支撑绿色低碳能源建设^[140]。

8 总结与展望

本文系统总结了气象领域中的自动化技术发展现状及应用前景。自动化技术在气象领域主要体现在智能感知、精准预报和自主决策等方面,可显著提升气象业务运行效率和服务能力。自动化技术不仅有效解决了气象系统非线性动态建模、多尺度耦合分析等关键问题,也为气候变化应对、极端天气预警和防灾减灾提供了重要技术支撑。随着自主智能系统、数字孪生、边缘计算等新一代信息技术的持续发展,未来气象业务有望实现观测、预报、决策和服务全过程的自主协同运行,逐步形成具有自主感知、自主决策和自进化能力的智能气象生态系统。同时,低空空域管理、近地空间气象监测等新兴应用场景的快速发展,将进一步拓展自动化技术在气象领域的应用深度与广度。因此,亟需构建及时、准确、高效的新一代智能化气象业务系统,加快推动气象业务智能化转型升级,为全球气候行动和可持续发展提供更加高效、可靠的科技支撑。

参考文献

- 1 Bist D R, Chapagae P, Kunwar A, Khatri L. The role of big data in sustainable agriculture: Advancing environmental sustainability in precision farming systems. *Cogent Food & Agriculture*, 2026, **12**(1): Article No. 2620180
- 2 Shah W U H, Lu Y T, Liu J H, Rehman A, Yasmeen R. The impact of climate change and production technology heterogeneity on China's agricultural total factor productivity and production efficiency. *Science of the Total Environment*, 2024, **907**: Article No. 168027
- 3 Liu Yang, Wu Pei-Yuan, Wang Xiu-Qin, Zhang Xin-Long. Research on lightning protection technology of meteorological station observation site based on automatic monitoring. *Techniques of Automation and Applications*, 2024, **43**(7): 141-145 (刘杨, 巫培源, 王秀琴, 张信龙. 基于自动化监测的气象站观测场防雷技术研究. *自动化技术与应用*, 2024, **43**(7): 141-145)
- 4 Guo Bai-Ling, Huang Dai-Wen, Huang Chun-Yan. Study on some partial differential equations in the atmospheric and oceanic dynamics. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2014, **44**(12): 1275-1285 (郭柏灵, 黄代文, 黄春研. 大气、海洋动力学中一些非线性偏微分方程的研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, **44**(12): 1275-1285)
- 5 Yan Xue-Zhi, Xu Hua, Zhang Ying, Xie Yi-Song, Yao Xing-Yu, Li Zheng-Qiang. Global CO₂ column concentration assimilation analysis based on GEOS-Chem and multi-source satellite data. *Acta Optica Sinica*, 2025, **45**(12): Article No. 1201011 (颜学治, 许华, 张莹, 谢一淞, 姚星雨, 李正强. 基于 GEOS-Chem 和多源卫星数据的全球 CO₂ 柱浓度同化分析. *光学学报*, 2025, **45**(12): Article No. 1201011)
- 6 Zhang X L, Zhang L, He G W. Parallel ensemble Kalman method with total variation regularization for large-scale field inversion. *Journal of Computational Physics*, 2024, **509**: Article No. 113059

- 7 Wu Tian-Ming, Luo Gui-Xiang, Jiang Dian-Rong. Application of virtual reality technology in intelligent automatic weather stations—A review of technology and application of automatic weather stations. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2023, **44**(7): Article No. 646
(吴天明, 罗桂湘, 姜殿荣. 虚拟现实技术在智能自动气象站中的应用——评《自动气象站技术与应用》. 中国农业气象, 2023, **44**(7): Article No. 646)
- 8 Zeng Q Y, Zhang G X, Huang S D, Song W W, He J X, Wang H, et al. A novel tornado detection algorithm based on xG-Boost. *Remote Sensing*, 2025, **17**(1): Article No. 167
- 9 Bracco A, Brajard J, Dijkstra H A, Hassanzadeh P, Lessig C, Monteleoni C. Machine learning for the physics of climate. *Nature Reviews Physics*, 2025, **7**(1): 6–20
- 10 Li Ke, Xiong Shun-Rui, Dai Peng-Lin, Song Tong-Yu, Yu Xu-Min, Li Tian-Rui. Timeliness optimization of real-time scheduling for satellite dynamic tasks based on deep reinforcement learning. *Scientia Sinica: Informationis*, 2024, **54**(10): 2443–2469
(李可, 熊顺蕊, 戴朋林, 宋彤雨, 禹旭敏, 李天瑞. 基于深度强化学习的卫星动态任务实时调度时效性优化方法. 中国科学: 信息科学, 2024, **54**(10): 2443–2469)
- 11 Chen K, Han T, Ling F H, Gong J C, Bai L, Wang X Y, et al. The operational medium-range deterministic weather forecasting can be extended beyond a 10-day lead time. *Communications Earth & Environment*, 2025, **6**(1): Article No. 518
- 12 Yan Z H, Lu X H, Wu L F, Liu F, Qiu R J, Cui Y K, et al. Evaluation of precipitation forecasting base on GraphCast over mainland China. *Scientific Reports*, 2025, **15**(1): Article No. 14771
- 13 Ham Y G, Kim J H, Luo J J. Deep learning for multi-year ENSO forecasts. *Nature*, 2019, **573**(7775): 568–572
- 14 Xu S Y, Zhang Y Z, Chen J P, Zhang Y L. Short- to medium-term weather forecast skill of the AI-based Pangu-Weather model using automatic weather stations in China. *Remote Sensing*, 2025, **17**(2): Article No. 191
- 15 Lee D, Yang S, Oh J W, Cho S G, Kim S, Kang N. AI-powered digital twin of the ocean: Reliable uncertainty quantification for real-time wave height prediction with deep ensemble. arXiv preprint arXiv: 2412.05475, 2024.
- 16 Mullanpudi A, Lewis M J, Gruden C L, Kerkez B. Deep reinforcement learning for the real time control of stormwater systems. *Advances in Water Resources*, 2020, **140**: Article No. 103600
- 17 Cheng Hai-Tao, Liu Jun-Nan, Wu Zhuo-Qi, Li Cong, Zhang Wei-Hao. Research on technical system of UAV and manual cooperative inspection. *China Safety Science Journal*, 2023, **33**(S1): 169–173
(程海涛, 刘俊男, 武卓琦, 李聪, 张伟豪. 无人机-人工协同巡视技术体系研究. 中国安全科学学报, 2023, **33**(S1): 169–173)
- 18 Yan Jun, Tang Fang-Fu, Zhang Zhi-Guo, Han Jun, Gong Yong-Hong. Low-power design for heterogeneous multi-core AI SoC chip. *Aerospace Control*, 2020, **38**(2): 62–68
(颜军, 唐芳福, 张志国, 韩俊, 龚永红. 异构多核人工智能 SoC 芯片的低功耗设计. 航天控制, 2020, **38**(2): 62–68)
- 19 Tomassini L, Reichert P, Kütsch H R, Buser C, Knutti R, Borsuk M E. A smoothing algorithm for estimating stochastic, continuous time model parameters and its application to a simple climate model. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 2009, **58**(5): 679–704
- 20 Pulido M, Tandeo P, Bocquet M, Carrassi A, Lucini M. Stochastic parameterization identification using ensemble Kalman filtering combined with maximum likelihood methods. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2018, **70**(1): Article No. 1442099
- 21 Mojgani R, Chattopadhyay A, Hassanzadeh P. Interpretable structural model error discovery from sparse assimilation increments using spectral bias-reduced neural networks: A quasi-geostrophic turbulence test case. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2024, **16**(3): Article No. e2023MS004033
- 22 Wang Zhen-Ming, Zhu Hui-Qun, Zhang Wen-Jian, Zhuang Xi-Chao. The evaluation of the influence of drought and waterlogging on Zhejiang economy. *Meteorological Monthly*, 2001, **27**(8): 15–18
(王镇铭, 朱惠群, 张文坚, 庄锡潮. 重大旱涝气象灾害对国民经济的影响评估. 气象, 2001, **27**(8): 15–18)
- 23 The State Council. Several opinions of the State Council on accelerating the development of meteorological services [Online], available: https://www.gov.cn/gongbao/content/2007/content_728251.htm, January 25, 2026
(国务院. 国务院关于加快气象事业发展的若干意见 [Online], available: https://www.gov.cn/gongbao/content/2007/content_728251.htm, 2026-01-25)
- 24 China Meteorological Administration, National Development and Reform Commission. Meteorological development plan (2011–2015) [Online], available: https://www.cma.gov.cn/2011xzt/2011zhuant/20111104/2011110403/202111/t20211105_4209711.html, January 25, 2026
(中国气象局, 国家发展改革委. 气象发展规划 (2011–2015 年) [Online], available: https://www.cma.gov.cn/2011xzt/2011zhuant/20111104/2011110403/202111/t20211105_4209711.html, 2026-01-25)
- 25 China Meteorological Administration. National meteorological science and technology innovation project (2014–2020) [Online], available: https://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_827236.htm, January 25, 2026
(中国气象局. 国家气象科技创新工程 (2014–2020 年) [Online], available: https://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_827236.htm, 2026-01-25)
- 26 China Meteorological Administration. National outline for meteorological modernization development (2015–2030) [Online], available: https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5036290.htm, January 25, 2026
(中国气象局. 全国气象现代化发展纲要 (2015–2030 年) [Online], available: https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5036290.htm, 2026-01-25)
- 27 China Meteorological Administration, National Development and Reform Commission. The 13th five-year plan for national meteorological development [Online], available: https://www.cma.gov.cn/2011xzt/2016zt/20161130/202111/t20211104_4168293.html, January 25, 2026
(中国气象局, 国家发展改革委. 全国气象发展“十三五”规划 [Online], available: https://www.cma.gov.cn/2011xzt/2016zt/20161130/202111/t20211104_4168293.html, 2026-01-25)
- 28 China Meteorological Administration. Action plan for strengthening meteorological science and technology innovation (2018–2020) [Online], available: https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2018-12/31/content_5446750.htm, January 25, 2026
(中国气象局. 加强气象科技创新工作行动计划 (2018–2020 年) [Online], available: https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2018-12/31/content_5446750.htm, 2026-01-25)
- 29 China Meteorological Administration, Ministry of Science and Technology, Chinese Academy of Sciences. China meteorological science and technology development plan (2021–2035) [Online], available: https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gkxr/ghjh/202203/t20220303_4555674.html, January 25, 2026
(中国气象局, 科学技术部, 中国科学院. 中国气象科技发展规划 (2021–2035 年) [Online], available: https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gkxr/ghjh/202203/t20220303_4555674.html, 2026-01-25)
- 30 The State Council. Outline for high-quality meteorological development (2022–2035) [Online], available: https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/19/content_5691116.htm, January 25, 2026
(国务院. 气象高质量发展纲要 (2022–2035 年) [Online], available: https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/19/content_5691116.htm, 2026-01-25)
- 31 China Meteorological Administration, National Development and Reform Commission. Implementation plan for enhancing nowcasting and short-term warning capabilities for extreme hazardous weather (2025–2026) [Online], available: https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202507/content_7032290.htm, July 15, 2025
(中国气象局, 国家发展改革委. 极端灾害性天气短临预警能力提

- 升实施方案 (2025—2026 年) [Online], available: https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202507/content_7032290.htm, 2025-07-15)
- 32 Liu Zhe, Yang Lei, Duan Yi-Hong. "Diversified investment" enhances China's strength in the basic research field of meteorological science and technology: A policy interpretation to the meteorological joint fund. *Chinese Science Bulletin*, 2022, **67**(25): 2985–2992
(刘哲, 杨蕾, 端义宏. 多元投入助力气象强国建设——气象联合基金的解读与思考. 科学通报, 2022, **67**(25): 2985–2992)
 - 33 Liu J J, Shi Y P, Fadlullah Z M, Kato N. Space-air-ground integrated network: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, **20**(4): 2714–2741
 - 34 Mase A S, Prokopy L S. Unrealized potential: A review of perceptions and use of weather and climate information in agricultural decision making. *Weather, Climate, and Society*, 2014, **6**(1): 47–61
 - 35 Hooker J, Duveiller G, Cescatti A. A global dataset of air temperature derived from satellite remote sensing and weather stations. *Scientific Data*, 2018, **5**: Article No. 180246
 - 36 Liu Lu, He Jian-Xin, Zeng Qiang-Yu. Compression sampling and reconstruction of meteorological radar echo based on compressive sensing. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2014, **29**(5): 503–508
(刘露, 何建新, 曾强宇. 基于压缩感知的气象雷达回波压缩采样与重建. 成都信息工程学院学报, 2014, **29**(5): 503–508)
 - 37 Xiao X, Wu L F, Liu X G, Zhang S, Li S E, Cui Y K. Long-term forecast of heatwave incidents in China based on numerical weather prediction. *Theoretical and Applied Climatology*, 2024, **155**(1): 599–619
 - 38 Yang Ming, Li Meng-Lin, Wang Bo, Liu Chun, Yu Yi-Xiao, Wang Chuan-Qi. Review on technologies and applications of numerical weather prediction for new power system. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, **49**(17): 1–20
(杨明, 李梦林, 王勃, 刘纯, 于一潇, 王传琦. 面向新型电力系统的数值天气预报技术及应用综述. 电力系统自动化, 2025, **49**(17): 1–20)
 - 39 Liu Hui-Jun, Wu Qi-Shu, Wei Guo-Fei, Han Mei, Pan Ning. Implement technology of optimal threat score correction method for numerical model precipitation forecast. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2024, **48**(5): 1891–1900
(刘会军, 吴启树, 危国飞, 韩美, 潘宁. 数值模式降水预报 OTS 订正法的实现技术. 大气科学, 2024, **48**(5): 1891–1900)
 - 40 Zhao Xian. Design and Implementation of Portable Traffic Meteorological Information Acquisition and Monitoring System [Master thesis], Nanjing University of Information Science & Technology, China, 2022.
(赵贤. 便携式交通气象信息采集与监测系统设计与实现 [硕士学位论文], 南京信息工程大学, 中国, 2022.)
 - 41 Ni Yin-Hao. Development of Meteorological Element Prediction and Visualization System Based on Deep Learning [Master thesis], Nanjing University of Information Science & Technology, China, 2023.
(倪银浩. 基于深度学习的气象要素预测及可视化系统开发 [硕士学位论文], 南京信息工程大学, 中国, 2023.)
 - 42 Liu J P, Cho H S, Osman S, Jeong H G, Lee K. Review of the status of urban flood monitoring and forecasting in TC region. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2022, **11**(2): 103–119
 - 43 Burke A, Snook N, Gagne II D J, McCorkle S, McGovern A. Calibration of machine learning-based probabilistic hail predictions for operational forecasting. *Weather and Forecasting*, 2020, **35**(1): 149–168
 - 44 Liu Jun, Tang You-Min, Song Xun-Shu, Sun Zhi-Lin. Prediction of the Indian Ocean dipole using deep learning method. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, **46**(3): 590–598
(刘俊, 唐佑民, 宋迅殊, 孙志林. 深度学习在印度洋偶极子预报中的应用研究. 大气科学, 2022, **46**(3): 590–598)
 - 45 Huang Tian-Wen, Jiao Fei, Wu Zhi-Fang. A precipitation forecast method based on transfer learning and long short term memory. *Torrential Rain and Disasters*, 2024, **43**(1): 45–53
(黄天文, 焦飞, 伍志方. 一种基于迁移学习和长短期记忆神经网络的降水预报方法. 暴雨灾害, 2024, **43**(1): 45–53)
 - 46 Cui Y Z, Wu R H, Zhang X, Zhu Z Q, Liu B, Shi J, et al. Forecasting the eddying ocean with a deep neural network. *Nature Communications*, 2025, **16**(1): Article No. 2268
 - 47 Tarwani H, Patel S, Goel P. Deep learning approach for weather classification using pre-trained convolutional neural networks. *Procedia Computer Science*, 2025, **252**: 136–145
 - 48 Taillardat M, Mestre O, Zamo M, Naveau P. Calibrated ensemble forecasts using quantile regression forests and ensemble model output statistics. *Monthly Weather Review*, 2016, **144**(6): 2375–2393
 - 49 Rasp S, Lerch S. Neural networks for postprocessing ensemble weather forecasts. *Monthly Weather Review*, 2018, **146**(11): 3885–3900
 - 50 Scher S, Messori G. Predicting weather forecast uncertainty with machine learning. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2018, **144**(717): 2830–2841
 - 51 Yang C W, Chang C W. Evaluation of the direct economic value of typhoon forecasting for Taiwan's agriculture—A case study on farmers' decision-making behavior. *Atmosphere*, 2025, **16**(4): Article No. 355
 - 52 Born L, Prager S, Ramirez-Villegas J, Imbach P. A global meta-analysis of climate services and decision-making in agriculture. *Climate Services*, 2021, **22**: Article No. 100231
 - 53 Floreano D, Wood R J. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*, 2015, **521**(7553): 460–466
 - 54 Lou Chuan-Wei, Ge Quan-Bo, Liu Hua-Ping, Yuan Xiao-Hu. Active perception method for UAV group target search. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2021, **16**(3): 575–583
(楼传伟, 葛泉波, 刘华平, 袁小虎. 无人机群目标搜索的主动感知方法. 智能系统学报, 2021, **16**(3): 575–583)
 - 55 Camps-Valls G, Fernández-Torres M Á, Cohrs K H, Höhl A, Castelletti A, Pacal A, et al. Artificial intelligence for modeling and understanding extreme weather and climate events. *Nature Communications*, 2025, **16**(1): Article No. 1919
 - 56 Mu M, Qin B, Dai G K. Predictability study of weather and climate events related to artificial intelligence models. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2025, **42**(1): 1–8
 - 57 Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, **20**(2): 130–141
 - 58 Kokotovic P V. Singular perturbation techniques in control theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1984, **29**(12): 1047–1070
 - 59 Rabier F, Järvinen H, Klinker E, Mahfouf J F, Simmons A. The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. I: Experimental results with simplified physics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000, **126**(564): 1143–1170
 - 60 Weyn J A, Durran D R, Caruana R, Cresswell-Clay N. Sub-seasonal forecasting with a large ensemble of deep-learning weather prediction models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, **13**(7): Article No. e2021MS002502
 - 61 Veillette M S, Samsi S, Mattioli C J. SEVIR: A storm event imagery dataset for deep learning applications in radar and satellite meteorology. In: Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems. Vancouver, Canada: Curran Associates Inc., 2020. Article No. 1846
 - 62 Dagon K, Truesdale J, Biard J C, Kunkel K E, Mehl G A, Molina M J. Machine learning-based detection of weather fronts and associated extreme precipitation in historical and future climates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, **127**(21): Article No. e2022JD037038
 - 63 Schmude J, Roy S, Trojak W, Jakubik J, Civitarese D S, Singh S, et al. Prithvi WxC: Foundation model for weather and climate. arXiv preprint arXiv: 2409.13598, 2024.
 - 64 Jin D R, Chen Y, Lu Y, Chen J Z, Wang P, Liu Z C, et al. Neutralizing the impact of atmospheric turbulence on complex

- scene imaging via deep learning. *Nature Machine Intelligence*, 2021, **3**(10): 876–884
- 65 Schirber S, Klocke D, Pincus R, Quaas J, Anderson J L. Parameter estimation using data assimilation in an atmospheric general circulation model: From a perfect toward the real world. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, **5**(1): 58–70
- 66 Cao H, Leng H Z, Zhao J, Xu X D, Yang J H, Li B X, et al. Exploration of deep-learning-based error-correction methods for meteorological remote-sensing data: A case study of atmospheric motion vectors. *Remote Sensing*, 2024, **16**(18): Article No. 3522
- 67 Li Chun-Xi, Qiao Han-Zhe, Yao Gang, Jiang Hao-Yu, Cui Xi-ang-Ke, Ge Quan-Bo. SOH estimation method based on RBF-BLS for low-carbon and safe travel of electric vehicle. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2024, **58**(9): 1454–1464
(李春喜, 乔涵哲, 姚刚, 姜洪予, 崔向科, 葛泉波. 基于 RBF-BLS 面向电动汽车低碳安全出行的 SOH 估计方法. 上海交通大学学报, 2024, **58**(9): 1454–1464)
- 68 Islam F A S. Artificial intelligence-powered carbon market intelligence and blockchain-enabled governance for climate-responsive urban infrastructure in the global south. *Journal of Engineering Research and Reports*, 2025, **27**(7): 440–472
- 69 Shafiq F, Zafar A, Ghani Khan M U, Iqbal S, Albeshier A S, Asghar M N. Extreme heat prediction through deep learning and explainable AI. *PLoS One*, 2025, **20**(3): Article No. e0316367
- 70 Xu Z, Jiang D L. AI-powered plant science: Transforming forestry monitoring, disease prediction, and climate adaptation. *Plants*, 2025, **14**(11): Article No. 1626
- 71 Bärffuss K B, Schmithüsen H, Lampert A. Drone-based meteorological observations up to the tropopause—A concept study. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2023, **16**(15): 3739–3765
- 72 Ma Lei-Ming. Development of artificial intelligence technology in weather forecast. *Advances in Earth Science*, 2020, **35**(6): 551–560
(马雷鸣. 天气预报中的人工智能技术进展. 地球科学进展, 2020, **35**(6): 551–560)
- 73 Yan S L, Xu Y Z, Gong Z W, Herrera-Viedma E. Fuzzy quantum group decision making and its application in meteorological disaster emergency. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2025, **33**(5): 1441–1454
- 74 Selvam A P, Al-Humairi S N S. Environmental impact evaluation using smart real-time weather monitoring systems: A systematic review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2025, **10**(1): Article No. 13
- 75 Yu B G, Fan S R, Cui W J, Xia K W, Wang L. A multi-UAV cooperative mission planning method based on SA-WOA algorithm for three-dimensional space atmospheric environment detection. *Robotica*, 2024, **42**(7): 2243–2280
- 76 Fei T, Mukhopadhyay S C, da Costa J P J, RoyChaudhuri C, Lan L, Demitri N. Spatial environment perception and sensing in automated systems: A review. *IEEE Sensors Journal*, 2024, **24**(14): 21813–21833
- 77 Jonassen M O, Ólafsson H, Ágústsson H, Rögnvaldsson Ó, Reuder J. Improving high-resolution numerical weather simulations by assimilating data from an unmanned aerial system. *Monthly Weather Review*, 2012, **140**(11): 3734–3756
- 78 Jadhav S P, Srinivas A, Raghunath P D, Prabhu M R, Suryawanshi J, Haldorai A. Deep learning approaches for multimodal sensor data analysis and abnormality detection. *Measurement: Sensors*, 2024, **33**: Article No. 101157
- 79 Abimannan S, El-Alfy E S M, Hussain S, Chang Y S, Shukla S, Satheesh D, et al. Towards federated learning and multi-access edge computing for air quality monitoring: Literature review and assessment. *Sustainability*, 2023, **15**(18): Article No. 13951
- 80 Wen Q Q, Lu T Y, Xia Q L, Sun Z D. Beam-pointing error compensation method of phased array radar seeker with phantom-bit technology. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, **30**(3): 1217–1230
- 81 Wang R, Yan D, Wang J, Wang G, Zhao Q. Research progress of LIDAR system based on optical phased array technology. In: Proceedings of the SPIE 11567, Optical Sensing and Imaging Technology. Beijing, China: SPIE, 2020. 1037–1042
- 82 Tsuchiya N, Gibson S, Tsao T C, Verhaegen M. Receding-horizon adaptive control of laser beam jitter. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, **21**(1): 227–237
- 83 Sun Q, Shi Y. Model predictive control as a secure service for cyber-physical systems: A cloud-edge framework. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, **9**(22): 22194–22203
- 84 Ma Y H, Lu C Y, Sinopoli B, Zeng S. Exploring edge computing for multitier industrial control. *IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2020, **39**(11): 3506–3518
- 85 Hildmann H, Kovacs E, Saffre F, Isakovic A F. Nature-inspired drone swarming for real-time aerial data-collection under dynamic operational constraints. *Drones*, 2019, **3**(3): Article No. 71
- 86 Rainjonneau S, Tokarev I, Iudin S, Rayaprolu S, Pinto K, Lentiuzhnikova D, et al. Quantum algorithms applied to satellite mission planning for earth observation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, **16**: 7062–7075
- 87 Zhang Y, Zhao J, Jia Y G, Shen X M. An improved adaptive quantum genetic algorithm as classical optimizer for the quantum approximate optimization algorithm on MaxCut problem. *Quantum Information Processing*, 2025, **24**(7): Article No. 222
- 88 Christakis N, Drikakis D, Turchas P. Artificial intelligence forecasting and uncertainty analysis of meteorological data in atmospheric flows. *Physics of Fluids*, 2025, **37**(3): Article No. 037125
- 89 Shen H F, Jiang M H, Li J, Yuan Q Q, Wei Y C, Zhang L P. Spatial-spectral fusion by combining deep learning and variational model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **57**(8): 6169–6181
- 90 Soldatenko S, Yusupov R. An optimal control perspective on weather and climate modification. *Mathematics*, 2021, **9**(4): Article No. 305
- 91 Han Y, Mi L H, Shen L, Cai C S, Liu Y C, Li K, et al. A short-term wind speed prediction method utilizing novel hybrid deep learning algorithms to correct numerical weather forecasting. *Applied Energy*, 2022, **312**: Article No. 118777
- 92 Fang S F, Xu L D, Zhu Y Q, Liu Y Q, Liu Z H, Pei H, et al. An integrated information system for snowmelt flood early-warning based on internet of things. *Information Systems Frontiers*, 2015, **17**(2): 321–335
- 93 Moursi A S, El-Fishawy N, Djahel S, Shouman M A. An IoT enabled system for enhanced air quality monitoring and prediction on the edge. *Complex & Intelligent Systems*, 2021, **7**(6): 2923–2947
- 94 Lam R, Sanchez-Gonzalez A, Willson M, Wirsberger P, Fortunato M, Alet F, et al. Learning skillful medium-range global weather forecasting. *Science*, 2023, **382**(6677): 1416–1421
- 95 Bi K F, Xie L X, Zhang H H, Chen X, Gu X T, Tian Q. Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks. *Nature*, 2023, **619**(7970): 533–538
- 96 Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 2015, **525**(7567): 47–55
- 97 Vannitsem S, Bremnes J B, Demaeyer J, Evans G R, Flowerdew J, Hemri S, et al. Statistical postprocessing for weather forecasts: Review, challenges, and avenues in a big data world. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, **102**(3): E681–E699
- 98 Gneiting T, Balabdaoui F, Raftery A E. Probabilistic forecasts, calibration and sharpness. *Journal of the Royal Statistical Society*

- ety Series B: Statistical Methodology, 2007, **69**(2): 243–268
- 99 Huang Z Q, Schepen A, Bennett J C, Robertson D E, Zhao T, Im E S, et al. A distributional regression network with data transformation for calibrating rainfall forecasts. *Journal of Geophysical Research: Machine Learning and Computation*, 2025, **2**(2): Article No. e2025JH000635
- 100 Ge Quan-Bo, Li Hong, Wen Cheng-Lin. Deep analysis of Kalman filtering theory for engineering applications. *Journal of Command and Control*, 2019, **5**(3): 167–180
(葛泉波, 李宏, 文成林. 面向工程应用的 Kalman 滤波理论深度分析. 指挥与控制学报, 2019, **5**(3): 167–180)
- 101 Ge Q B, Hu X M, Li Y Y, He H L, Song Z H. A novel adaptive Kalman filter based on credibility measure. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, **10**(1): 103–120
- 102 Li Ying-Ruo, Han Ting-Ting, Wang Jun-Xia, Quan Wei-Jun, He Di, Jiao Re-Guang, et al. Application of ARIMA model for mid-and long-term forecasting of ozone concentration. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3118–3126
(李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 等. ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用. 环境科学, 2021, **42**(7): 3118–3126)
- 103 Hewage P, Trovati M, Pereira E, Behera A. Deep learning-based effective fine-grained weather forecasting model. *Pattern Analysis and Applications*, 2021, **24**(1): 343–366
- 104 Bhagavathi S M, Thavasimuthu A, Murugesan A. Weather forecasting and prediction using hybrid C5.0 machine learning algorithm. *International Journal of Communication Systems*, 2021, **34**(10): Article No. e4805
- 105 Ge Quan-Bo, Cheng Hui-Ru, Zhang Ming-Chuan, Zheng Rui-Juan, Zhu Jun-Long, Wu Qing-Tao. Non-Gaussian feature detection and recognition based on PCA and ICA pattern fusion. *Acta Automatica Sinica*, 2024, **50**(1): 169–180
(葛泉波, 程惠茹, 张明川, 郑瑞娟, 朱军龙, 吴庆涛. 基于 PCA 和 ICA 模式融合的非高斯特征检测识别. 自动化学报, 2024, **50**(1): 169–180)
- 106 Xu C W, Liu J, Han S Y, Duan X Q, Xiang L, Zhang T. FourCastLSTM: A precipitation nowcasting model integrating global and local spatiotemporal features. *Computers & Geosciences*, 2025, **204**: Article No. 105966
- 107 Keisler R. Forecasting global weather with graph neural networks. arXiv preprint arXiv: 2202.07575, 2022.
- 108 Xu H X, Zhao Y, Zhao D J, Duan Y H, Xu X D. Exploring the typhoon intensity forecasting through integrating AI weather forecasting with regional numerical weather model. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2025, **8**(1): Article No. 38
- 109 Xu H X, Zhao Y, Zhao D J, Duan Y H, Xu X D. Improvement of disastrous extreme precipitation forecasting in North China by Pangu-Weather AI-driven regional WRF model. *Environmental Research Letters*, 2024, **19**(5): Article No. 054051
- 110 Doswell III C A. Weather forecasting by humans-heuristics and decision making. *Weather and Forecasting*, 2004, **19**(6): 1115–1126
- 111 Qiu Ming-Hui, Xie Neng-Fu, Jiang Li-Hua, Wu Huan-Ping, Chen Ying, Li Yong-Lei. Research on the construction of knowledge graphs for agricultural meteorological disasters: A review. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2024, **45**(10): 1216–1235
(邱明慧, 谢能付, 姜丽华, 吴焕萍, 陈颖, 李永磊. 农业气象灾害知识图谱构建研究进展. 中国农业气象, 2024, **45**(10): 1216–1235)
- 112 Qin L L, Feng S, Zhu H Y. Research on the technological architectural design of geological hazard monitoring and rescue-after-disaster system based on cloud computing and Internet of things. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2018, **9**(3): 684–695
- 113 Mazar M M, Rezaeizadeh A. Adaptive model predictive climate control of multi-unit buildings using weather forecast data. *Journal of Building Engineering*, 2020, **32**: Article No. 101449
- 114 Semenov M A. Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator. *Climate Research*, 2008, **35**: 203–212
- 115 Faghmous J H, Kumar V. Spatio-temporal data mining for climate data: Advances, challenges, and opportunities. *Data Mining and Knowledge Discovery for Big Data: Methodologies, Challenge and Opportunities*. Berlin: Springer, 2014. 83–116
- 116 Saraya H M, Saleh A A E, Rezk A. Geo blockchain intelligence risk assessment for extreme weather prediction in the era of internet of spatial big data computing. *Discover Internet of Things*, 2025, **5**(1): Article No. 145
- 117 Vaughan C, Dessai S. Climate services for society: Origins, institutional arrangements, and design elements for an evaluation framework. *WIREs Climate Change*, 2014, **5**(5): 587–603
- 118 Parolini G. Weather, climate, and agriculture: Historical contributions and perspectives from agricultural meteorology. *WIREs Climate Change*, 2022, **13**(3): Article No. e766
- 119 Mourtzinis S, Edreira J I R, Conley S P, Grassini P. From grid to field: Assessing quality of gridded weather data for agricultural applications. *European Journal of Agronomy*, 2017, **82**: 163–172
- 120 Hu H, Yang Z F, Sarkar P. Dynamic wind loads and wake characteristics of a wind turbine model in an atmospheric boundary layer wind. *Experiments in Fluids*, 2012, **52**(5): 1277–1294
- 121 Zhang Z Y, Liu Y F, Wang Y H, Liu Y L, Zhang Y, Zhang Y. What factors affect the synergy and tradeoff between ecosystem services, and how, from a geospatial perspective? *Journal of Cleaner Production*, 2020, **257**: Article No. 120454
- 122 Hu Zheng-Guang, Xue Feng, Yu Lian-Qing. Application of massive meteorological data processing and visualization of meteorological decision service mobile platform. *Meteorological Science and Technology*, 2020, **48**(5): 615–621
(胡争光, 薛峰, 于连庆. 海量气象数据计算处理及可视化在决策气象服务移动平台上的应用. 气象科技, 2020, **48**(5): 615–621)
- 123 Cavanagh R D, Melbourne-Thomas J, Grant S M, Barnes D K A, Hughes K A, Halfter S, et al. Future risk for southern ocean ecosystem services under climate change. *Frontiers in Marine Science*, 2021, **7**: Article No. 615214
- 124 Li Han-Bin, Yu Ping, Zhong Wei-Xiong, Wu Yan-Hui. Preliminary exploration of strategies and techniques for decisionmaking meteorological services. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2007, **28**(S2): 151–152
(李汉彬, 于平, 钟伟雄, 巫燕辉. 决策气象服务的策略与技巧初探. 气象研究与应用, 2007, **28**(S2): 151–152)
- 125 Wu Huan-Ping, Luo Bing, Wang Wei-Guo, Duan Yan-E. Application of geographic information system to decision-making meteorological service system. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, **19**(3): 380–384
(吴焕萍, 罗兵, 王维国, 段延娥. GIS 技术在决策气象服务系统建设中的应用. 应用气象学报, 2008, **19**(3): 380–384)
- 126 Bai Y, Ochudho T O, Yang J. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA. *Ecological Indicators*, 2019, **102**: 51–64
- 127 Sziroczak D, Rohacs D, Rohacs J. Review of using small UAV based meteorological measurements for road weather management. *Progress in Aerospace Sciences*, 2022, **134**: Article No. 100859
- 128 Liu B L, Li Q, Zheng Z H, Huang Y J, Deng S G, Huang Q X, et al. A review of multi-source data fusion and analysis algorithms in smart city construction: Facilitating real estate management and urban optimization. *Algorithms*, 2025, **18**(1): Article No. 30
- 129 Chen L, Xia C B, Zhao Z H, Fu H R, Chen Y M. AI-driven sensing technology: Review. *Sensors*, 2024, **24**(10): Article No. 2958
- 130 Chen L Y, Han B C, Wang X S, Zhao J Z, Yang W K, Yang Z Y. Machine learning methods in weather and climate applications: A survey. *Applied Sciences*, 2023, **13**(21): Article No. 12019

- 131 Chen M Z, Tao Z X, Tang W T, Qin T X, Yang R, Zhu C L. Enhancing emergency decision-making with knowledge graphs and large language models. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2024, **113**: Article No. 104804
- 132 Mu H, Wu P, Su W Y. Construction of knowledge graph for emergency resources. *International Journal of Intelligent Systems*, 2024: Article No. 6668559
- 133 Li X X, Zhao T H, Wen J, Cai X J. Many-objective emergency aided decision making based on knowledge graph. *Applied Intelligence*, 2024, **54**(17): 7733–7749
- 134 Ge Q B, Chen Y H, Wang Y L. Shipboard radar measurement errors modeling under the influence of complex marine meteorology. *IEEE Sensors Journal*, 2025, **25**(3): 4787–4800
- 135 Zou T, Ge Q B, Huang Y J. MFP-DETR: Marine UAV target detection based on multi-scale fuzzy perception. *Neurocomputing*, 2025, **635**: Article No. 129843
- 136 Zuo Z Y, Song J W, Zheng Z W, Han Q L. A survey on modeling, control and challenges of stratospheric airships. *Control Engineering Practice*, 2022, **119**: Article No. 104979
- 137 Gou H B, Zhu M, Zheng Z W, Guo X, Lou W J, Yuan J C. Adaptive fault-tolerant control for stratospheric airships with full-state constraints, input saturation, and external disturbances. *Advances in Space Research*, 2022, **69**(1): 701–717
- 138 Zhang Yang-Fan, Li Yi-Lin, Ye Lin, Fu Xue-Jiao, Wang Zheng-Yu, Wang Yao-Han. Short-term wind power prediction method considering wind turbine operation status clustering under low-temperature conditions. *Power Generation Technology*, 2025, **46**(2): 326–335
(张扬帆, 李奕霖, 叶林, 付雪姣, 王正宇, 王耀函. 低温天气下考虑风机运行状态聚类的短期风电功率预测方法. 发电技术, 2025, **46**(2): 326–335)
- 139 Ge Quan-Bo, Song Yuan, Yang Ming-Peng, Li Yuan-Lu, Chen Guo. Wind power forecast based on temporal enhancement and periodic decomposition. *Control Theory & Applications*, 2026, **43**(6): 1301–1310
(葛泉波, 宋源, 杨明鹏, 李远禄, 陈果. 基于时序增强与周期分解的风电功率预测. 控制理论与应用, 2026, **43**(6): 1301–1310)
- 140 Meenal R, Binu D, Ramya K C, Michael P A, Kumar K V, Rajasekaran E, et al. Weather forecasting for renewable energy system: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, **29**(5): 2875–2891



葛泉波 南京信息工程大学自动化学院教授. 主要研究方向为信息融合, 非线性滤波, 无人系统和分布式优化.
E-mail: quanboge@163.com

(GE Quan-Bo Professor at the School of Automation, Nanjing University of Information Science and

Technology. His research interests include information fusion, nonlinear filtering, unmanned system, and distributed optimization.)



陆振宇 广东技术师范大学人工智能学院教授. 主要研究方向为智慧气象, 人工智能和随机控制.

E-mail: luzhenyu76@163.com

(LU Zhen-Yu Professor at the School of Artificial Intelligence, Guangdong Polytechnic Normal

University. His research interests include smart meteorology, artificial intelligence, and stochastic control.)



朱凤增 临沂大学自动化与电气工程学院讲师, 南京信息工程大学博士后. 主要研究方向为分布式估计. 本文通信作者.

E-mail: zhufengzeng@lyu.edu.cn

(ZHU Feng-Zeng Lecturer at the

School of Automation and Electrical Engineering, Linyi University, and postdoctor at Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interest is distributed estimation. Corresponding author of this paper.)



董建平 成都信息工程大学自动化学院讲师, 南京信息工程大学博士后. 主要研究方向为缺陷检测, 图像处理和优化算法. E-mail: djp@cuit.edu.cn

(DONG Jian-Ping Lecturer at the School of Automation, Chengdu University of Information Techno-

logy, and postdoctor at Nanjing University of Information Science and Technology. His research interests include defect detection, image processing, and optimization algorithms.)



智协飞 南京信息工程大学教授. 主要研究方向为数值天气预报, 季风动力学, 短期气候预测和区域气候模拟. E-mail: zhi@nuist.edu.cn

(ZHI Xie-Fei Professor at Nanjing University of Information Science and Technology. His research inter-

ests include numerical weather forecasting, monsoon dynamics, short-term climate prediction, and regional climate simulation.)



张恒德 国家卫星气象中心高级工程师. 主要研究方向为灾害性天气机理与预报技术.

E-mail: zhanghengde1977@163.com

(ZHANG Heng-De Senior Engineer at National Satellite Meteorological Center. His research interests

include mechanisms and forecasting technologies of severe weather.)