

Capacity building for monitoring and early warning of extreme weather and climate events under the background of climate change

Dawaciren

Meteorological Bureau of Lazi County, Xizang Autonomous Region, Xizang, Lazi, 858100, China

Abstract

Against the backdrop of intensifying global climate change, the frequency and intensity of extreme weather events have significantly increased, posing severe threats to socio-economic systems, ecosystems, and human survival security. Enhancing monitoring and early warning capabilities has become a crucial strategic task for countries in addressing climate risks. This paper analyzes the shortcomings in current extreme weather monitoring systems by examining climate change impacts on extreme events. It explores monitoring approaches leveraging new technologies such as multi-source observational data, numerical models, and artificial intelligence, while proposing capacity-building pathways including improving observation networks, optimizing model forecasts, strengthening information sharing, and enhancing interdepartmental collaboration. The study concludes that establishing an integrated monitoring and early warning system featuring “space-ground coordination, intelligent fusion, and collaborative sharing” can not only improve early identification and risk prevention capabilities for extreme weather but also provide scientific support for building climate-adaptive societies.

Keywords

climate change; extreme weather events; monitoring and early warning; capacity building; artificial intelligence

气候变化背景下极端天气气候事件监测预警能力建设

达瓦次仁

西藏自治区拉孜县气象局, 中国·西藏 拉孜 858100

摘要

在全球气候变化加剧的背景下, 极端天气气候事件的发生频率与强度显著增加, 对社会经济系统、生态环境与人类生存安全造成严重威胁。如何提升监测与预警能力, 成为各国应对气候风险的重要战略任务。本文从气候变化对极端事件的影响出发, 分析了当前极端天气监测预警体系存在的短板, 探讨了基于多源观测数据、数值模式与人工智能等新技术的监测手段, 提出了完善观测网络、优化模式预报、强化信息共享与多部门协同的能力建设路径。研究认为, 构建“天地一体、智能融合、协同共享”的综合监测预警体系, 不仅能够提升极端天气的早期识别与风险防范能力, 还能为气候适应型社会建设提供科学支撑。

关键词

气候变化; 极端天气事件; 监测预警; 能力建设; 人工智能

1 引言

近年来, 全球气候变化呈现出加速发展趋势, 极端高温、强降水、台风、干旱与寒潮等事件频发, 对粮食安全、基础设施运行、公共健康及生态系统稳定构成重大威胁。国际气候变化专门委员会 (IPCC) 多次报告指出, 极端事件的强度和范围在未来仍将上升, 对人类社会的冲击不可忽视。面对这一挑战, 提升极端天气气候事件的监测与预警能力已成为全球气候治理和国家安全的重要组成部分。然而, 目前监

测预警体系仍存在观测密度不足、模式精度有限、跨部门联动不畅等问题, 难以完全满足快速响应和科学决策的需要。本文拟在总结现状的基础上, 结合新技术与管理创新, 提出系统性能力建设路径, 为未来气候风险防控提供理论参考与实践支撑。

2 气候变化与极端天气事件的关联性

2.1 全球变暖对极端事件的驱动作用

全球平均气温持续上升, 导致大气水汽含量增加、能量平衡改变, 使极端天气事件的形成条件更加频繁。强降水、台风等事件呈现增强趋势, 而干旱与热浪事件的范围也在扩大。研究表明, 升温 1°C 将导致大气中水汽容量提升 7% 左右,

【作者简介】达瓦次仁 (1995-), 本科, 工程师, 从事县级综合气象观测研究。

这为极端降水事件的爆发提供了更多能量支撑。

2.2 区域差异化影响特征

气候变化对极端天气的影响具有明显区域性。我国南方强降雨事件增多，北方则呈现高温干旱并发的特征。沿海地区受台风与风暴潮威胁显著增强，而高原及山区则面临雪灾和滑坡等次生灾害风险。区域差异使监测与预警能力建设必须因地制宜。

2.3 极端事件的社会经济风险加剧

极端天气事件对农业生产、交通运输、能源供应与公共健康均构成重大影响。例如，持续干旱导致粮食减产，强台风造成城市内涝与电力中断，高温事件增加老年人和儿童的健康风险。这些风险叠加放大了社会系统脆弱性，亟须通过精准预警与有效应对降低灾害损失。

3 现有监测预警体系的不足

3.1 观测网络分布不均与数据缺口

我国气象观测体系已形成较大规模，但在复杂地形与特殊区域仍存在不足。高山、荒漠、边远牧区和海洋广域由于自然环境恶劣、建设成本高和维护难度大，导致观测站点稀疏，形成明显盲区。这些区域往往是极端事件孕育和演变的关键地带，缺乏实时数据严重制约了监测精度与预警提前量。自动气象站虽然数量逐年增加，但受限于传感器精度、校准不统一及运维保障不足，数据稳定性和连续性存在隐患，难以满足分钟级、公里级的高时空分辨率需求。同时，雷达、卫星与地面站之间的协同覆盖能力尚待提升，例如低空大气观测和海洋气象监测仍显薄弱。这些不足直接影响了对突发极端天气的早期识别与全过程追踪，制约了综合预警能力的提升。

3.2 数值预报模式的适应性不足

数值天气预报模式作为极端事件监测与预警的核心工具，其中长期趋势预测上已取得进步，但在短时临近与小尺度极端天气的模拟方面仍存在较大瓶颈。强对流、龙卷风、短时暴雨等灾害性天气往往具有空间局地性和时间突发性，现有模式在分辨率、物理参数化方案和边界层刻画上仍存在局限，难以捕捉关键演变过程。模式初值对观测依赖度高，而数据不均进一步放大了误差。即便通过集合预报与多模式融合，仍存在区域偏差和预报不确定性偏大的问题。尤其在城市热岛效应、复杂地形下，现有模式对局地极端天气的适应性不足，导致预警时效与可信度降低。这种不足不仅削弱了模式在业务预报中的应用价值，也在一定程度上制约了灾害风险管理和防范措施的科学性。

3.3 信息共享与部门协同存在障碍

极端天气气候事件的监测预警涉及气象、水利、交通、农业、应急、医疗等多个部门，但跨部门的信息共享与协同机制尚不完善。各部门往往基于自身业务需求建立独立的数据平台，数据标准不一、接口不兼容，形成信息孤岛。预警

产品在生成与发布过程中，存在重复发布、内容不一致甚至延迟等问题，影响公众和政府的快速反应与科学决策。缺乏系统化的协同机制，使得多部门间的资源无法充分整合，影响了预警链条的整体效能。解决这一障碍，需要推动跨部门的数据标准统一、信息互联互通与联合会商机制，形成合力提升极端天气事件的综合防控水平。

4 新技术在极端天气监测预警中的应用

4.1 多源观测与大数据融合

极端天气事件的形成与演变往往涉及大气、水文、海洋及地表多要素的综合作用，仅依赖单一观测手段难以全面反映其特征。多源观测体系的构建，成为提升监测精度与预警能力的重要基础。卫星遥感可提供大范围、高时效的气象场与地表状态信息，尤其在云顶高度、风场分布及降水估算方面具备优势；地面自动气象站则保证了地表气象要素的连续监测；无人机巡测能够在极端事件发生前后进入危险或盲区区域，采集近地层气象与灾害现场数据。上述不同来源的数据若能实现高效融合，可形成时空分辨率互补的多维观测体系。大数据技术的引入使得这些异构数据能够在统一平台中整合与处理，通过模式识别、聚类分析与时空关联挖掘，揭示极端事件的发生规律与发展路径。例如，在暴雨监测中，融合卫星亮温、雷达回波与地面雨量计信息，可显著提升降水估测精度；在台风监测中，卫星云图与浮标观测的结合，能够更早锁定台风路径与强度演变。通过大数据驱动的多源观测融合，极端天气事件的动态监测与早期识别能力得以提升，为预警信息的精准发布奠定了基础。

4.2 人工智能与机器学习方法

极端天气的监测与预报需要应对非线性、随机性与不确定性并存的复杂系统，传统数值模式在短时临近与小尺度灾害性天气的预测上存在局限。人工智能与机器学习方法为突破这一瓶颈提供了可能。深度学习尤其是卷积神经网络（CNN）、循环神经网络（RNN）和注意力机制模型，能够在海量历史气象数据中自动提取隐含特征，捕捉复杂的时空耦合关系。例如，基于雷达回波影像的深度学习模型可在分钟级时间尺度上预测强对流系统的演变趋势，大幅提高临近预报的准确率。机器学习在模式误差订正中的应用也逐渐成熟，通过支持向量机、随机森林或集成学习方法，对数值模式输出进行偏差修正，能够显著降低预报误差。同时，生成对抗网络（GAN）在模拟稀缺极端事件样本方面展现了潜力，可为模型训练提供更多情境化数据。人工智能方法的引入不仅提升了极端天气识别与预报的精度，也推动了气象业务由“基于物理”向“物理+数据驱动”融合的转型。其在未来的应用前景，不仅体现在提高预报水平，还在于实现从“被动预测”向“主动学习”的自适应演进。

4.3 智能预警与可视化传播

预警不仅在于预报结果的准确性，还在于能否高效传

递至社会公众并被有效理解与执行。传统的预警信息往往采用文字或符号,难以直观反映风险范围与程度,而在极端天气事件中,时间与信息解读的延迟可能造成严重后果。智能预警平台的构建,使预警信息能够通过多渠道快速传递,例如手机 APP 推送、社交媒体即时发布、物联网终端自动告警等,实现“多端覆盖、及时送达”。同时,可视化技术的应用提升了信息的可读性与直观性。通过动态图表、风险热力图与三维模拟,预警信息可以以空间化、动态化的形式呈现,帮助公众迅速理解灾害发生位置、影响范围与风险等级。在实践中,如台风路径预测图与暴雨落区动画,已成为公众认知极端天气风险的重要工具。智能化平台还可结合用户位置与历史行为数据,实现个性化预警服务,如为特定区域居民推送洪水风险提示,为交通参与者提供实时路况与灾害信息。智能预警与可视化传播的结合,极大提升了预警信息的可达性、可理解性与可执行性,为社会整体的快速响应和科学防御提供了有力支撑。

5 极端天气监测预警能力建设路径

5.1 完善观测网络与基础设施

围绕极端事件“早识别—准定位—强追踪”的目标,应构建天地空海一体化的综合观测网络。陆地侧在关键地形带和城市热岛区加密自动气象站、微型雨量网和地基雷达/激光雷达,完善闪电定位、GNSS 掩星与水汽反演观测,形成分钟级更新、百米级格点的高时空分辨率数据场。海洋侧布设远近海浮标、岸基波浪仪与海气通量塔,提升风暴潮与强对流外海孕育期的监测能力。高山与干旱区增设高寒站与沙尘观测塔,弥补边远地区数据缺口。卫星层面持续推进高分辨率静止/极轨气象卫星与微波、红外、可见光多载荷协同成像,构建从对流初生到成熟阶段的立体监测链。同步强化站网运维和质量控制,建立统一计量溯源与自动校准制度,完善电力与通信冗余、边缘计算与 5G/北斗回传,确保在极端条件下观测不中断、数据不断链。

5.2 提升数值模式与模拟能力

面向强对流、暴雨、台风、热浪等事件的快速演变特征,应发展区域对流允许模式与城市精细化模式,细化地形、下垫面与城市参数化,提高边界层、云微物理与海气耦合刻画真实性。通过四维变分与集合卡尔曼同化融合多源资料(卫星、雷达、GNSS、浮标、地面站),实现从初值到外强迫的全链路优化。引入机器学习进行误差订正与模式后处理,以神经网络模拟昂贵的辐射与微物理过程,形成“物理—数据”混合框架,兼顾可解释性与计算效率。依托高性能计算平台推进大规模并行、CPU/GPU 异构加速与弹性云算力,缩短滚动预报周期,实现小时级迅预报与街区级精细预报的协同。建立集合预报与多模式集成系统,量化不确定性并输

出概率化产品,为阈值触发和风险分级提供依据;同时完善模式研发—测试—业务—一体化流水线与自动评估体系,确保持续迭代与稳定上线。

5.3 建立跨部门协同与社会参与机制

极端事件预警需从“气象单兵作战”转向“全要素联动”。构建气象、水利、应急、能源、交通、医疗与自然资源等部门的综合预警平台,统一数据标准与元数据目录,打通 API 接口与权限管理,实现实时数据共享、联合会商与同屏决策。建立基于影响的预警流程,将灾害致险因子、暴露度与脆弱性纳入评估,形成“天气—灾害—影响”转换与行业定制化指引。完善信息发布的多通道与可达性建设,部署蜂窝广播、应急广播、物联网终端与社区网格短信,实现面向老人、儿童、残障群体与流动人口的差异化触达。强化公众风险沟通与科普教育,常态化开展学校与社区演练、企业连续性管理培训,壮大志愿者与社会组织参与的基层响应网络。建立事后复盘与数据归档机制,推动保单理算、基础设施韧性评估与空间规划联动,将预警成果嵌入城市治理与产业链风险管理的全周期闭环。

6 结语

气候变化背景下,极端天气气候事件的频发性与破坏性日益凸显,对人类社会构成了前所未有的挑战。提升监测与预警能力,是应对气候风险、保障公共安全和促进可持续发展的必然选择。通过完善观测网络、发展新兴技术、优化数值模式、强化协同机制,可以逐步建立起高效、智能与开放的监测预警体系。未来,应进一步推动气象科技与人工智能、信息化技术的深度融合,实现从灾害被动应对向主动预防的转型,以全面提升我国在气候变化背景下的极端天气监测预警能力,为建设韧性社会与实现可持续发展目标提供坚实保障。

参考文献

- [1] 裴曦紫,廖珊,潘俊道,等.气象分析在灾害性天气预警中的关键技术研究[J].农业灾害研究,2025,15(04):190-192.
- [2] 赵元昌,叶鹏,李薇,等.恶劣天气高影响路段气象监测预警服务优化提升技术[C]//中国公路学会养护与管理分会.中国公路学会养护与管理分会第十四届学术年会论文集.云南省交通投资建设集团有限公司曲靖管理处;云南省交通规划设计研究院股份有限公司;2025:747-753.
- [3] 吴美玲.关于提高中小机场极端天气预报预警能力的思考[J].农业灾害研究,2024,14(11):101-103.
- [4] 谢展文.应对极端天气智慧手段提升城市韧性[J].中华民居,2024,17(06):57-58.
- [5] 苏爱芳,基于多源数据的强对流天气监测预警预报技术研究与应用.河南省,河南省气象台,2022-08-29.