

# 气候变化背景下极端天气的新特征与防御技术对策

董林, 贾莉, 王月冬, 李泽椿\*

(国家气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 本文旨在系统分析全球气候变化背景下我国主要极端天气的新特征、演变趋势及成因, 评估当前预报预警与防御能力并提出系统性提升策略。综合现有观测数据、科研成果、业务实践, 梳理了台风、暴雨、强对流、高温干旱、低温雨雪冰冻等极端天气的变化规律: 气候变化正在引起我国极端天气的强度、频次、持续时间、地理分布等出现显著变化, 核心因素是全球变暖导致的大气持水能力增加、北极升温引发“北极放大”效应所致的大尺度环流调整; 台风强度增强、移速减慢, 内陆影响加深; 暴雨总频次略有减少, 但极端性、影响范围、北移趋势增强; 强对流天气突发性更强、碎片化趋势更加明显; 高温干旱复合事件增多; 低温雨雪冰冻事件单次危害加大。我国气象现代化水平显著提升, 极端天气防御工作取得积极进展, 体现在“地空天”立体监测网初步建成、自主研发的数值模式和人工智能模型水平明显提升、预警系统和信息发布渠道逐步完善, 但在观测数据分布均匀性、极端天气精准预报、链式灾害防御等方面依然面临严峻挑战。建议在加强核心技术攻关、提升防灾减灾硬实力, 实施跨部门数据共享、构建智能协同预警平台, 完善递进式服务与全链条响应机制、提升韧性基础设施科技支撑能力, 提升公众参与度、加强社会保障体系建设等方面采取切实行动, 同步开展从技术突破到社会赋能的系统性转型, 全面提升我国极端天气防御能力。

**关键词:** 气候变化; 极端天气; 预报预警; 监测网; 数值模式; 防御策略

**中图分类号:** P46; P429 **文献标识码:** A

## New Characteristics of Extreme Weather in the Context of Climate Change and Defense Countermeasures

Dong Lin, Jia Li, Wang Yuedong, Li Zechun\*

(National Meteorological Centre, Beijing 100081, China)

**Abstract:** This study aims to systematically analyze the new characteristics, evolution trends, and causes of major extreme weather in China in the context of global climate change, and evaluate the current forecasting, early-warning, and defense capabilities of the country. Based on this, a systematic improvement strategy is proposed. By integrating existing observational data, research results, and operation practices, this study sorts out the changing patterns of extreme weather such as typhoons, heavy rain, severe convection, high temperature and drought, as well as low temperature, freezing rain, and blizzard. The results indicate that climate change is leading to significant alterations in the intensity, frequency, duration, and geographical distribution of extreme weather in China. The core driving mechanisms are the increase in atmospheric water-holding capacity caused by global warming and the large-scale

**收稿日期:** 2025-08-13; **修回日期:** 2025-12-03

**通讯作者:** \*李泽椿, 国家气象中心研究员, 中国工程院院士, 研究方向为天气动力和数值预报; E-mail: Lizc@cma.gov.cn

**资助项目:** 国家重点研发计划项目(2023YFC3107902); 中国工程院咨询项目“极端灾害下城市与社会系统安全韧性技术发展战略研究”(2024-XBZD-21)

**本刊网址:** sscae.engineering.org.cn

circulation adjustment resulting from the Arctic amplification effect triggered by Arctic warming. The specific manifestations are as follows: the intensity of typhoons increases, their movement slows down, and their impact on the inland deepens. Although the total frequency of heavy rain has slightly decreased, its extremity, affected areas, and northward movement trend have intensified. Severe convective weather is more sudden and shows a more obvious trend of fragmentation. The number of compound events of high temperature and drought has increased. The harm caused by low temperature, freezing rain, and blizzard has increased each time. China's meteorological modernization level has significantly improved, and the defense work for extreme weather has made positive progress, including the establishment of a ground-air-space three-dimensional monitoring network, significant improvement in the level of independently developed numerical models and artificial intelligence models, and gradual improvement in the early warning system and information dissemination channels. However, there are still severe challenges in aspects such as the uniformity of observational data distribution, precise forecasting of extreme weather, and chain disaster defense. It is recommended to take practical actions in strengthening core technology research and development to enhance the country's disaster prevention and mitigation capabilities, implementing cross-departmental data sharing to build an intelligent collaborative early-warning platform, improving the progressive service and full-chain response mechanism to enhance the technological support capacity for resilient infrastructure, improving public participation, and strengthening the construction of the social security system. Meanwhile, it is necessary to carry out a systematic transformation from technological breakthrough to social empowerment to enhance China's capabilities to defense against extreme weather conditions.

**Keywords:** climate change; extreme weather; forecast and early warning; monitoring network; numerical model; defense strategy

### 一、前言

2023年,联合国政府间气候变化专门委员会发布了第六次评估报告并详细阐述了全球变暖导致的破坏性后果<sup>[1]</sup>,由自然因素、人类活动共同导致的全球变暖已是科学界的共识<sup>[2-5]</sup>。这种地球表面温度的长期上升趋势引发了全球或区域气候模态的长期、大幅度变化。气候变化指气候平均状态和离差(距平)两者中的1个或共同出现了统计意义上的显著变化<sup>[6]</sup>,对我国天气的影响主要表现在两方面:大气运行模式改变,导致降水和温度变化的可预报性降低;极端天气发生频率增加、极端性增强并有碎片化的趋势<sup>[7]</sup>。极端天气指某一地点或某一时间不常或极少发生的天气,一般发生概率<10%(位于累积分布函数0~10%或90%~100%)<sup>[8]</sup>,但造成的灾害影响极大。降水和温度变化的可预报性变差,导致多年来气象工作者基于统计分析、机理研究得到的阈值以及预报方法的适用性降低,也使日常预报的准确率下降;频繁出现的极端天气则会引发原本就阻碍精准预报的技术瓶颈问题更加突出<sup>[9]</sup>。

我国是世界上自然灾害较为严重的国家,面临较多种类的极端天气,如致灾严重的台风、暴雨、强对流、高温干旱、低温雨雪冰冻等<sup>[10]</sup>。各类极端天气在我国具有不同的分布特征,在全球气候变暖的背景下又表现出不同的变化趋势<sup>[11]</sup>。台风影响呈现东南沿海重、内陆轻的特点,但台风强度的极端性以及对内陆地区的影响有增强趋势<sup>[12]</sup>。暴雨影响范围广,持续性暴雨常引发多种次生灾害,在我国

气候变化导致暴雨的影响范围更大、时间更长、强度更高,也更容易发生在人口密集和经济发达的地区<sup>[13]</sup>。强对流天气突发性强、分布地域广,更易导致人员伤亡,然而引发强对流的天气系统时空尺度小、可预报性低,开展精准预报仍是国际难题<sup>[14]</sup>。高温干旱极端事件明显增加,严重威胁粮食安全,需要针对性开展监测和预报<sup>[15]</sup>。低温雨雪冰冻的发生频率整体上呈减少趋势,但极端性仍在增强,对能源、交通、经济社会运行等构成极大影响<sup>[16]</sup>。

经过数十年的持续努力,我国天气预报预警技术进展显著,气象现代化能力大幅提升<sup>[17-20]</sup>。然而,气候变化导致环流异常和极端天气加剧,对气象灾害防御提出了新的挑战。《气象高质量发展纲要(2022—2035年)》要求,气象工作应筑牢防灾减灾的第一道防线,切实做到“人民至上、生命至上”。为此,我国气象工作者应把握科技迅猛发展的契机,加快梳理新的天气气候特征与规律,改进客观预报技术;依托多源观测资料,深入探究天气发生和发展机理,提升数值模式的预报精准度;深化人工智能(AI)技术在气象领域的应用,尽早突破极端天气精准预报的瓶颈;尽快研判极端天气的技术防御对策,为国家防灾减灾做出积极贡献。

### 二、气候变化背景下我国极端天气的新特征

全球变暖并非以单一方式影响所有天气,而是通过改变大气和海洋的基本物理状态以及大尺度环流,进而对不同类型极端天气的强度、频率、持续

时间、地理分布等产生深远影响（见图1）。地球表面温度升高引发的水汽增加是导致台风、暴雨、强对流、降雪强度增强的共同关键物理因素，且温度与水汽的变化呈非线性关系（遵循克劳修斯·克拉伯龙方程<sup>[21]</sup>）。北极地区近地表温度正在以全球平均水平两倍以上速率升高，被称为“北极放大”效应<sup>[22]</sup>。海冰融化导致地表反照率改变并形成正反馈，加快了北极地区升温的速度。极地与低纬地区温差减小导致急流减弱变慢（但弯曲程度加大），引起大气环流调整（如副高变化、经向环流加剧）。这些是极端天气空间分布变化（如雨带北移、台风北上深入内陆）和持续性变化（如持久高温干旱）的核心因素。“北极放大”效应引起的极涡不稳定和分裂导致环流经向度加大，也是整体变暖背景下冬季仍会发生极端寒潮、低温雨雪事件的关键机理<sup>[22]</sup>。这些影响是相互关联的，甚至可能形成“高温-干旱-暴雨-低温冰冻”等天气急剧变化导致的灾害链，进一步增加了防灾减灾的复杂性。在全球气候变化的背景下，我国各类极端天气的特征也

在悄然变化，主要表现在5个方面。

**（一）台风对我国的影响极端性更强、对内陆的影响增加**

我国是世界上受台风影响最严重的国家之一，平均每年有7个台风在我国登陆。台风引发的灾害主要有大风、暴雨、风暴潮等<sup>[23]</sup>，空间分布具有明显的区域特征，表现为东南沿海地区重、内陆轻<sup>[12,24]</sup>。气候变化导致台风灾害影响的极端性增强、内陆影响增加，如西北太平洋、南海的台风生成个数略有减少，而台风的移动速度减慢、登陆强度增加，台风极值有向北、向岸迁移的趋势<sup>[25,26]</sup>。近年来，登陆我国的台风强度不断刷新记录，如2024年登陆海南省的台风“摩羯”、登陆上海市的台风“贝碧嘉”分别打破了当地同时期的台风登陆强度记录。此外，台风残余环流在陆地上维持的时间更长，台风的远距离水汽输送更强和更远，导致暴雨的累计雨量更大、极端性更强、对内陆地区的影响变大<sup>[27]</sup>。2021年7月的郑州市特大暴雨、2024年

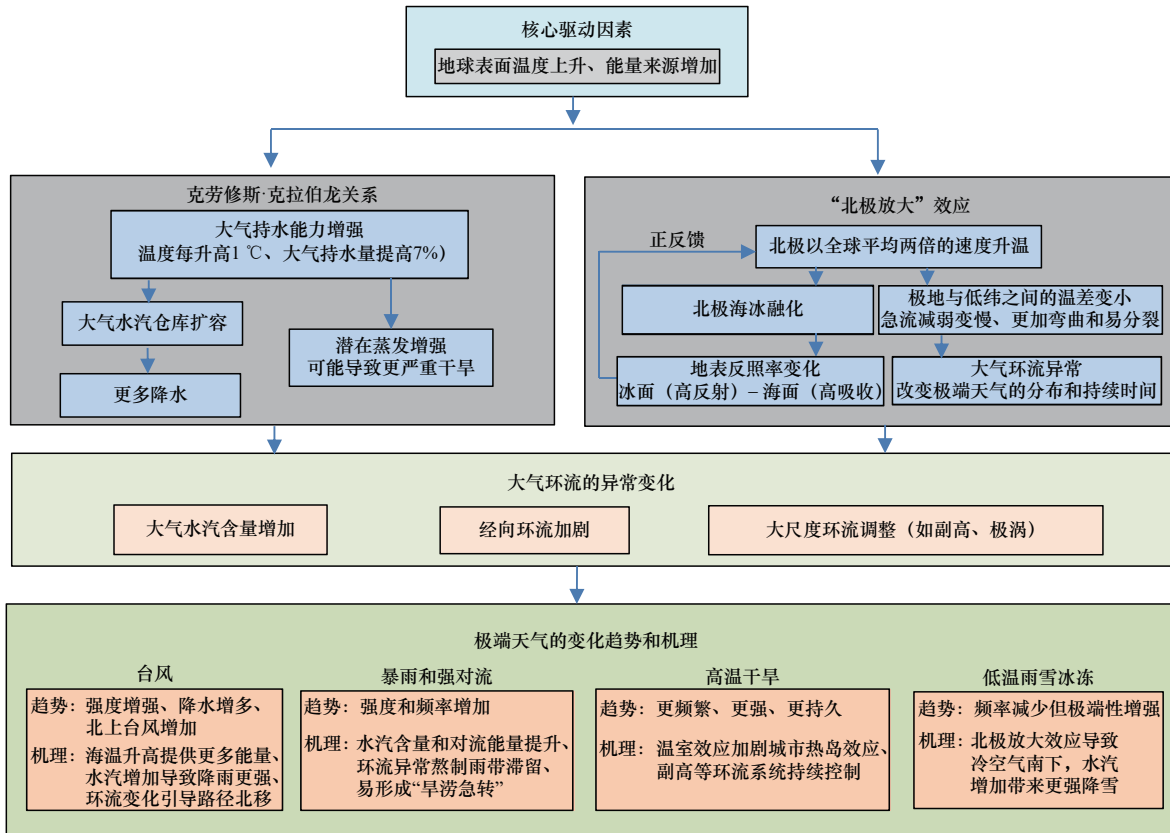


图1 气候变化对我国极端天气的影响机理

8月的葫芦岛市特大暴雨均与台风的远距离水汽输送有关<sup>[28]</sup>，2023年的台风“杜苏芮”、2024年的台风“格美”残涡分别引发了华北地区、湖南省等内陆地区的极端暴雨和次生灾害<sup>[29,30]</sup>。

### (二) 单次暴雨极端性更强、更容易发生在人口密集和经济发达地区

暴雨是影响我国的主要灾害性天气之一，分布地域广、影响时间长。引发暴雨的天气系统复杂多样，如中纬度的西风槽、高空冷涡或温带气旋以及热带或副热带的台风、西南涡、切变线、季风<sup>[31]</sup>。大范围、持续性的暴雨可同时引发山洪、泥石流、城市内涝、山体滑坡等次生灾害。我国暴雨灾害有从东南地区向西北地区递减的空间分布特征，华南地区是暴雨发生次数最多的区域，华东地区次之；暴雨的影响时间集中在4—9月，其中南方影响时间相对长，北方多在7—8月<sup>[32]</sup>。

2012—2022年，我国暴雨发生次数走势振荡，并没有明显的增加趋势，而且自2019年以来暴雨发生次数还有缓慢减少的趋势。然而，单次极端暴雨的影响范围更大、时间更长、强度更高，也有向北方迁移的趋势，故暴雨的总体影响是在增加的<sup>[11,33]</sup>。此外，在气候变化、城市化进程加快的双重作用下，极端暴雨呈现单点散发的碎片化趋势，更容易发生在人口密集和经济发达地区，导致特大或超大城市的“雨岛”效应更为明显，伴生了更为严重的灾害损失<sup>[13]</sup>。例如，2021—2024年的多个极端暴雨过程均发生在郑州、北京、广州、上海等大城市或超大城市附近<sup>[34]</sup>。

### (三) 强对流天气突发性强、精准预报仍是国际难题

国内一般认为，落到地面上直径 $\geq 2$  cm的冰雹、阵风速度 $> 17$  m/s的对流性大风（下击暴流）、发生在陆地上所有级别的龙卷、短时强降水（ $\geq 20$  mm/h）均为强对流天气<sup>[35]</sup>。这类天气具有突发、时空尺度小、演变快的特点，易致重大人员伤亡和财产损失<sup>[36]</sup>。强对流天气的出现以具有强烈上升的暖湿气流为前提，故多发生在春夏季节，但不同种类的强对流发生地域有较大差别。雷暴高发区集中在华南、西南地区。冰雹的高发区集中在青藏高原、内蒙古高原东部、中西部山地<sup>[37]</sup>。龙卷主要分布在东

部、中部的平坦地区，其中华南地区的龙卷部分由台风登陆引发<sup>[38,39]</sup>。短时强降水的分布区域与暴雨基本重合<sup>[40]</sup>。

大气环流异常导致我国强对流天气发生频率提高且极端性更强，如2024年4月广州市白云区的龙卷、增城区的极端大冰雹事件等。从2025年北京市、河北省、甘肃省出现的严重灾害事件可以看出，极端暴雨均有强对流导致短时强降水的贡献。经过数十年的技术积累，我国的强对流天气监测和预报技术取得明显进步，但因产生强对流的天气系统时空尺度较小、可预报性不高，开展精准监测和预报依然是难题，如强对流预报面临空报率偏高、准确率偏低、有效预报时效偏短等问题<sup>[41]</sup>。

### (四) 高温干旱复合事件明显增多、严重威胁粮食安全

根据中国气象局的定义，日最高气温 $\geq 35$  °C为1个高温日，连续3天及以上的高温为1次热浪事件<sup>[5]</sup>。长时间的降水减少或温度升高造成水分亏缺，可能引起干旱。我国高温热浪问题逐年加剧，发生频率与幅度已超过1960年基准水平的两倍<sup>[41,42]</sup>。按照当前的气候变化速率，预计2050年我国将有1.1亿~2.5亿人遭受极端高温和热浪的侵袭，年均经济损失将达到数万亿元<sup>[43]</sup>。持续高温不但影响正常生活和能源供给，亦可引发山火，如2022年夏季的极端高温导致重庆市发生了严重的山火。干旱或“旱涝急转”可致农作物绝收，威胁粮食安全。需要对高温和降水进行综合分析，结合时间变化和生态环境等因素，系统评估高温干旱复合事件，形成对高温灾害影响的正确认识<sup>[44,45]</sup>。

整体上，随着全球变暖的持续，我国大部分地区夏季高温干旱复合事件出现了明显的增加和增强趋势；由于降水增加，西北、华东地区的复合事件略有减少<sup>[46]</sup>。目前，国内对复合事件的认识和研究处于起步阶段，业务监测和预报仍以温度、降水、干旱等单要素为主，亟需开展高温干旱复合事件的研究和预报，保障粮食生产和供应安全<sup>[47]</sup>。

### (五) 低温雨雪冰冻频次减少、但单次事件的影响程度加大

低温雨雪冰冻是由降雪（或雨夹雪、霰、冰粒、冻雨）和降雨遇低温形成的积雪、结冰现象，

易引发电线结冰、道路湿滑等<sup>[48]</sup>。我国是世界上遭受低温雨雪冰冻灾害较为严重的国家之一，南方地区发生频次高、持续时间长。一般认为，中高纬度及副热带环流异常造成冷暖气团在长江中下游地区长时间对峙是引发低温雨雪冰冻的主要原因<sup>[49]</sup>。

在气候变化的背景下，低温雨雪冰冻事件整体上呈减少趋势<sup>[50,51]</sup>。然而，“北极放大”效应引起的环流经向度加大，导致单次低温雨雪冰冻事件的极端性更强、持续时间更长，造成的灾害损失更加严重<sup>[52,53]</sup>。例如，2009年11月北方8省份遭受雪灾，直接经济损失为69.6亿元<sup>[54]</sup>。低温雨雪冰冻的形成机理较复杂，相关研究和可预报性工作不多。低温雨雪冰冻是复合极端事件，尚无适用于不同地区和季节的统一标准，也未开展此类极端天气的监测和预报业务。

### 三、我国极端天气防御工作进展及面临的挑战

我国天气预报预警技术取得显著进展，台风路径预报误差稳定在65 km，暴雨预警信号准确率达到91%，强对流预警提前发布时间缩短至43 min<sup>[17,36,55,56]</sup>。然而，极端天气的精准预报仍面临诸多挑战：“地空天”协同的综合观测网络虽已建成，但观测数据分布不均且针对极端天气的观测数据较少；统计分析和机理研究增强了对极端天气的认识与规律把握，但气候变化加大了精准预报的难度；国产数值模式和AI模型发展较快，而在极端天气的精准预报方面遭遇瓶颈。此外，提高天气预报精准度的最终目的是更好地防御自然灾害，而灾害防御是涉及社会运行诸多方面的综合性工作，天气预报预警能力增强仅是其中的环节之一，还需在交叉学科协同发展、城市运行指挥系统和灾害防御平台高度集成及智能决策等方面取得同步提升。

#### （一）综合观测网络初步建成、但观测数据分布不均

气象观测是气象科学领域的支柱之一、气象科学研究和业务的基础支撑，对了解大气状态、预测天气演变、研究气候变化等具有重要意义<sup>[57]</sup>。我国初步建成“地空天”协同、以大气圈为主的地球系统多圈层立体观测网络<sup>[58]</sup>，由超过 $9 \times 10^4$ 个地面气象观测站、842部天气雷达、131个探空站、10颗

在轨风云气象卫星组成的综合气象观测系统（截至2025年12月）。乡镇地面气象观测站覆盖率为100%，国家级地面气象观测站数量较2012年增长3.5倍。地面气象观测频次提高4~8倍，数据量增加5倍以上，数据传输速度优化至秒级。在暴雨灾害较高风险区域，天气雷达对距地1 km高度的空间覆盖率提升到86%<sup>[59]</sup>。风云极轨气象卫星实现全球范围、全天候、多光谱、三维、定量对地观测，风云静止气象卫星在世界上率先开展了静止轨道大气高光谱垂直探测和昼夜快速成像，具备了多通道、高频次、全天时、立体化的观测能力，气象卫星的部分性能达到国际领先水平<sup>[60,61]</sup>。

也要注意，观测极端天气不仅受到探测仪器、定量分析技术的制约，而且获得数据在空间分布、天气系统方面均处于不均衡状态。①观测数据往往受探测仪器的制约。我国配置的大部分测风仪的观测上限是70 m/s，而2014年台风“威马逊”登陆海南省的风力超出了仪器的测风上限，导致仪器损毁、数据传输中断<sup>[62]</sup>。但是，如果为了捕捉这种50年或100年一遇的极端大风而将沿海地区的测风仪全部更换为测风上限为100 m/s的高性能设备，必然极大地增加观测和维护成本。②观测能力受定量分析技术的制约。台风的大部分生命史位于海洋上，开展观测主要依靠卫星，但静止轨道卫星无法观测到云层下方靠近海面的状况，极轨卫星需要将观测到的物理量换算为洋面风速（存在偏差）。目前，较为准确的洋面风观测只能依靠海上的岛屿或浮标站以及飞机飞入台风区域后投掷的下投式探空仪。卫星定量分析需要积累大量直接观测的洋面风样本，再与同时刻的卫星云顶亮温、极轨卫星观测值形成相关性关系，这样才能在没有飞机和站点观测时依靠卫星观测值推算出洋面风。美国自20世纪40年代起，一直在北大西洋、东北太平洋进行飞机观测，不断校正卫星观测值和洋面风之间的关系，推动定量分析技术的不断进步<sup>[63]</sup>。开展台风的飞机观测需要较高的技术能力和资金投入，我国至今未能实现<sup>[64,65]</sup>，因而西北太平洋上台风的卫星定量分析技术受到严重制约，影响了台风预报业务和数值模式的发展。③观测资料在空间分布上表现出平面、立体、海陆三方面的不均衡。平面分布不均指沿海发达地区观测站点多、内陆和西部地区观测站点少。立体分布不均指地面观测密集而高空观测少。

海陆分布不均指陆地观测多、海上观测少。④ 天气系统方面的观测数据不均主要体现在常规天气观测多、极端天气观测少。极端天气是小概率事件，发生时因观测设备常遭到破坏或观测条件受限而致有效的观测数据远不及常规天气。例如，冰雹、龙卷等强对流天气常发生在没有观测站的地区；雷暴、极端暴雨、台风常导致观测设备损毁或数据传输中断等。此外，探测仪器也涉及成本、性价比等方面的考量。

鉴于数值模式、AI模型的数据均为空间上有规律的格点数据，上述观测数据的分布不均对整个天气预报链条以及进一步的防灾减灾工作均有深远的影响<sup>[66-72]</sup>。

## （二）国产数值模式和AI气象应用水平提升明显、但精准预报面临诸多挑战

数值天气预报是支撑天气预报业务和防灾减灾的核心科技。在我国，数值天气预报研究和业务应用一直受到高度重视，基础理论研究、关键技术突破、业务系统研制等取得了具有国际影响的成果<sup>[68]</sup>。自主发展了GRAPES、YHGSMS两大业务预报系统：前者在模式动力框架等核心技术方面取得突破，支持建立了无缝隙、包含确定性预报和集合预报系统的中国气象局数值天气预报业务体系；后者拓展了以高分辨率全球中期和月延伸数值预报系统为核心的数值预报体系<sup>[69-73]</sup>。中国气象局在台风、暴雨、强对流等极端天气预报方面发展了多个区域模式和集合预报系统，加快研发模式释用产品，显著提高了极端天气预报能力<sup>[14,19,20,66,74,75]</sup>。得益于AI技术进步，数据驱动的AI模型在气象预报领域的应用获得拓展，自主研发的盘古、风乌、伏羲、风清、风雷、风顺等AI气象模型已在预报中开展业务应用<sup>[76-79]</sup>，针对灾害天气预报展现出良好潜力，尤其是在台风路径预报方面较传统数值模式有明显优势。

然而，当关注点聚焦到极端天气精准预报时，传统的数值模式、新兴的AI模型均面临诸多挑战<sup>[68]</sup>。传统的数值模式建立和发展，核心在于根据人类对天气系统的理解，构建数学物理模型（动力框架，即大气运动方程组），以观测资料作为初值，通过计算机运算求取数值解，以此推演大气未来的演变趋势。可见，数值模式的预报准确率主要与模

式的动力框架和初值有关。此外，模式计算数值求解的方式是将地球表面和周围大气划分为网格点，通常按照模式需要的方式来处理网格点的排列方式及间隔，即所谓的模式分辨率。例如，CMA-GFS V4.0业务系统的水平分辨率为 $0.125^\circ$ （约为12.5 km，在不同的经纬度上有差别），垂直方向有87层，模式层顶高度为63 km（约0.1 hPa）；垂直方向上采用基于高度的混合地形追随坐标，变量垂直分布跟随Charney-Phillips跳点设置<sup>[80]</sup>。

数值模式面临的挑战主要涉及三方面。① 动力框架。大气运动是非线性过程，目前对天气系统发生发展的机理认识并不完全，尚未被认知的规律也就无法在模式的动力框架中进行正确描述。② 初值误差。观测资料的时空分辨率和精度会影响数值模式的预报水平。大气是三维空间中的流体，在时间上的变化是连续的，而获取到的观测资料是在时间上瞬时、在空间上离散的数值，也叠加了观测仪器的误差。非线性过程对初值（即观测值）的误差非常敏感，误差不断积累将导致模式在积分一段时间后给出可信度明显降低的天气预报结果。③ 参数化方案。对于局地对流、龙卷等比模式网格尺度小的天气过程，需要使用经验参数进行描述。参数化方案是可行的解决方法，但如果不够精确将导致时空尺度小或位于边界层的天气过程出现预报偏差。如果没有足够多且精确的观测，而只是将一些零散的观测插值到网格点上，并不能提高预报精度，甚至导致模式的预报性能下降。极端天气的预报精度中包含多个尺度的天气系统及其复杂作用的预报误差，现有的数值模式无法精准描述并预报其中较小尺度的系统演变。

对于数据驱动的AI模型，尽管不存在模型框架中对天气过程的描述不准确问题，但是训练数据中包含误差、数据时空分辨率不足或分布不均（很大一部分格点上的数据是插值得到的）导致的训练模型不精准问题同样存在。例如，AI模型对台风路径的预报准确率较好，但对台风强度、精细结构、台风暴雨等的预报精准度不高<sup>[81]</sup>。这是因为台风路径主要受大尺度环流系统的影响，AI模型的训练数据通常为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ （约25 km的网格），对尺度较大的系统具有较好的预报精度；而强度、结构、暴雨量等主要受较小尺度系统的影响，导致AI模型的台风精细化预报效果欠佳。此外，数值模式、

AI模型都需要面对气候变化导致的大气环流异常造成预报精准度下降的问题。

### （三）预警系统和信息发布渠道逐步完善、但链式防灾减灾依然任重道远

我国在气象预警系统建设方面进展显著，建立了国家、省、市、县四级预警信息发布体系<sup>[82,83]</sup>。

① 预警信息的覆盖率、准确性、时效性快速提高。目前，我国气象预警信息的公众覆盖率为99.12%，面向互联网的预警信息传播平均送达时间为3 min 48 s，在“闪信”矩阵服务模式下实现预警强制提醒秒级触达。

② 预警信息的针对性和精细化程度不断改善。预警信息发布的“叫应”服务业务投入运行，2024年完成高级别预警服务 $3.38 \times 10^5$ 人次。分行业、分群体预警指向性得到增强，预警服务领域不断延伸，全国各级预警信息发布机构面向自然资源、住建、交通运输等22个管理部门提供预警信息服务<sup>[84]</sup>。多源数据融合的自动化预警图文产品实现秒级发布，预警信息达到基于位置的千米级精准发布水平。预警信息发布自主核心技术从“软”向“软硬结合”拓展，15个省份建设了预警机终端。

③ 我国预警信息发布渠道逐步完善，建立了多渠道、多层次的信息发布体系。在电视、广播等传统媒体之外，拓展了新媒体渠道，手机短信、社交媒体、移动应用程序（APP）等成为重要的预警信息传播平台。一些地区建立了社区级的预警信息发布系统，通过大喇叭、电子显示屏等方式确保预警信息的充分覆盖<sup>[85]</sup>。

尽管如此，链式防灾减灾依然任重道远。灾害链的复杂性和不确定性增加了风险评估及预测的难度。不同灾害类型的相互作用机制尚未厘清，灾害链的发展过程难以准确预测。究其原因，我国幅员辽阔，地形地貌和气候复杂，不同的灾害性天气在不同地点引发的链式灾害差异显著；不同的管理部门责任划分明确，资料共享机制不完善，导致完整灾害链研究不够深入。现有的防灾减灾体系较多针对单一灾害类型来设计，缺乏系统性和协调性，难以有效应对复杂的灾害链。跨部门、跨区域的协同机制尚不完善，影响了链式防灾减灾的整体效能<sup>[86]</sup>。公众对灾害链风险的认知也有不足，社区层面的参与度不高，同样制约了链式防灾减灾措施的有效实施。

## 四、我国极端天气防御的技术对策

### （一）加强核心技术攻关、提升防灾减灾硬实力

提升极端天气精准预报预警和防灾减灾能力，关键在于发展核心技术。在当前形势下，需要同步发展数值模式、AI模型，即研发自主可控的下一代气象数值预报模式，推进AI与气象大数据的深度融合。实施相关技术攻关的前提是推进新型观测技术布局，尽快解决观测数据获取方面的问题。集中力量进行核心技术攻关，加快研发自主可控的“千米级-分钟级”超高分辨率数值预报系统，融合量子计算以突破模型面临的算力瓶颈。推进“大气-海洋-陆地-城市”多圈层耦合建模，嵌入城市建筑群、地下管网等方面的精细化数据，提高暴雨外洪内涝的模拟精度。积极利用AI技术和应用优势，发展可解释的AI模型，提高模型的抗攻击能力，防范AI模型的自身安全风险<sup>[87]</sup>；开发“气象AI模型+”多场景应用，基于迁移学习适配区域灾害特征。部署新型观测技术和多源数据收集系统，解决数据不足和分布不均问题，实现科技赋能基础设施。强化气象监测网络、智能化技术等的应用，提升灾害预警的时空精度。发射搭载微波雷达、激光雷达的气象卫星，增强台风三维结构、暴雨云团垂直运动的实时监测能力。布设低空无人机群、物联网传感器网络，补强地面和低空的观测盲区。

### （二）实施跨部门数据共享、构建智能协同预警平台

通过动态风险防范将灾害损失减小到最低程度，是提升极端天气预报精准度的最终目的。开展不同部门之间的数据共享，构建协同预警平台，据此进行实时的智能决策。构建国家级灾害链数据中台，打通气象、水利、交通、电力等部门的数据壁垒，应用区块链技术保障数据共享的安全性。通过交叉学科协作研发和多部门合作，建立气象预警+“三合一”防灾减灾调度指挥平台，形成山洪、滑坡、城市内涝等灾害的演变过程动态模拟能力。推广“AI+专家”的混合决策模式，发挥AI模型在快速、全面处理多源异构数据方面的优势以及领域专家在极端情况下对AI误判结果的纠偏能力。

### (三) 完善递进式服务与全链条响应机制、提升韧性基础设施科技支撑能力

从软、硬两个方面出发，结合灾前、灾后两类场景进行技术创新，提升韧性基础设施的科技支撑能力。建议将预警准确率、递进式服务、人员转移效率等纳入地方管理部门的考核指标，强化“叫应”机制责任闭环。借鉴中央气象台、省级气象台的递进式预警与服务经验<sup>[88]</sup>，建立提前划定风险区、预置救援力量、确定转移人员的分级响应机制，将预警细化至乡镇级别；推广风险“靶向”预警技术，结合通信基站定位、移动终端大数据，实现预警信息面向高风险街区的定向提醒能力。开发多灾种耦合预警APP，集成实时避险导航、应急物资地图等功能。研发和应用自适应防洪材料，嵌入传感器以提供实时调节城市排水的能力。推广地下空间水灾智能阻断系统，利用AI模型预测内涝倒灌路径，部署自动开启防水屏障设施。针对灾情出现后的场景，研发灾后快速评估与恢复技术，应用“卫星遥感+无人机航拍”快速生成灾损三维地图，结合AI图像识别评估房屋倒塌、农田淹没面积。打通“生命线”，提升应急救援个人防护装备、通信导航装备、医疗救生装备的科技支撑能力。

### (四) 提升公众参与度、加强社会保障体系建设

公众对自然灾害的认知和参与程度将直接影响防灾减灾的成效。建议通过立法、发布规范等形式，明确递进式预警和服务的法律地位，提升公众对灾害防御的重视和参与程度。加强科普宣传，利用虚拟现实/增强现实技术模拟灾害场景，开展社区与学校应急培训，在社交媒体上普及避险知识。鼓励公众通过APP上传实时灾情，作为观测数据的有益补充。采取管理部门与企业合作的方式，加强包括灾后补偿、恢复重建在内的社会保障体系建设。优化和完善灾害保险与补偿机制，创新农业巨灾保险、气象金融等产品，合理分散经济损失风险。

## 五、我国极端天气防御的发展思考

我国气象事业历经了七十余年发展，在天气预报预警技术方向取得了举世瞩目的成就。也要清醒地认识到，面对频发的极端天气气候事件，在精准

预报、链式灾害防御方面仍然面临着基础性和系统性的严峻挑战。我国气象现代化的“主战场”正从常规天气的“追平赶超”转向极端天气这一世界性难题的“攻坚克难”，也从单纯提升预报技术迈向与社会治理深度融合的防灾减灾“最后一千米”。

未来提升我国极端天气应对能力的根本路径是开展从技术突破到社会赋能的系统性转型。应当抛弃单一技术路线“强挑重担”、单一部门“单打独斗”的发展思维，构建以精准预报为“智慧大脑”、协同共享为“神经网络”、韧性社会为“强健躯体”的新型防灾减灾体系。可同步推进两方面工作：持续加强核心技术攻关，集中力量研发“千米级-分钟级”的下一代数值预报模式、可解释且安全的AI模型，布局新型观测技术，补强数据层面短板，筑牢防灾减灾的硬实力；打破壁垒、连通“孤岛”，构建国家级灾害链数据中台、智能协同预警平台，推动气象、水利、交通、电力等部门数据的融合及共享，推广“AI+专家”的混合决策模式，将技术优势转化为指挥决策优势。

现代气象防灾减灾本质上是对科技硬实力、社会治理软实力深度融合的考验，需要一体化推进技术手段创新、社会机制建设。在“软”的层面，通过立法和考核强化“叫应”机制的责任闭环，完善递进式预警服务和分级响应机制，提升公众的避险意识和参与能力。在“硬”的层面，以科技赋能基础设施，切实提升应急救援装备的科技含量。同时健全灾害保险与社会保障体系，为灾后恢复提供经济韧性。通过科技、管理、社会、文化层面的综合治理，真正打通从精准预警到有效避险的“最后一千米”，构筑有效抵御极端天气冲击的韧性生活环境。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** August 13, 2025; **Revised date:** December 3, 2025

**Corresponding author:** Li Zechun is a research fellow from National Meteorological Center, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include weather dynamics and numerical forecasting. E-mail: Lizc@cma.gov.com

**Funding project:** National Key R & D Program of China (2023YFC3107902); Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of Safety and Resilience Technologies for Urban and Social Systems under Extreme Disasters” (2024-XBZD-21)

## 参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2023: Synthesis report [R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.
- [2] Oreskes N. The scientific consensus on climate change [J]. Science, 2004, 306(5702): 1686.
- [3] Doran P T, Zimmerman M K. Examining the scientific consensus on climate change [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2009, 90(3): 22–23.
- [4] Cook J, Oreskes N, Doran P T, et al. Consensus on consensus: A synthesis of consensus estimates on human-caused global warming [J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(4): 048002.
- [5] Myers K F, Doran P T, Cook J, et al. Consensus revisited: Quantifying scientific agreement on climate change and climate expertise among earth scientists 10 years later [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(10): 104030.
- [6] 丁一汇, 柳艳菊, 徐影, 等. 气候变暖对天气预报的影响及应对策略 [J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(6): 682–688.  
Ding Y H, Liu Y J, Xu Y, et al. The impact of climate warming on weather forecasting and coping strategies [J]. Climate Change Research, 2024, 20(6): 682–688.
- [7] 周佰铨, 杨婷婷, 周波涛, 等. 中国区域气候变化预估研究进展 [J]. 气象学报, 2025, 83(3): 716–728.  
Zhou B Q, Yang T T, Zhou B T, et al. Research advances in projections of regional climate change over China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2025, 83(3): 716–728.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [9] Scher S, Messori G. How global warming changes the difficulty of synoptic weather forecasting [J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(5): 2931–2939.
- [10] 郭进修, 李泽椿. 我国气象灾害的分类与防灾减灾对策 [J]. 灾害学, 2005, 20(4): 106–110.  
Guo J X, Li Z C. Classification of meteorological disasters and strategies for hazard prevention and reduction in China [J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(4): 106–110.
- [11] 张存杰, 张思齐, 宁惠芳. 近 60 年中国极端天气气候事件变化趋势及 2023 年特征分析 [J]. 干旱气象, 2024, 42(4): 536–552.  
Zhang C J, Zhang S Q, Ning H F. Trends of extreme weather and climate events in China in recent 60 years and their characteristics in 2023 [J]. Journal of Arid Meteorology, 2024, 42(4): 536–552.
- [12] 李雾杭, 沈雨辰, 陈佩燕. 1989—2021 年中国台风灾害及其在自然灾害和气象灾害中的影响研究 [J]. 气象科技进展, 2024, 14(6): 33–39.  
Li J H, Shen Y C, Chen P Y. Research on typhoon disasters in China from 1989 to 2021 and their weighting in natural and meteorological disasters [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2024, 14(6): 33–39.
- [13] 严昇. 我国大型城市暴雨特性及雨岛效应演变规律 [D]. 上海: 东华大学(硕士学位论文), 2015.  
Yan S. The characteristics of heavy rain in large cities in China and the evolution law of the rain island effect [D]. Shanghai: East China University (Master's Thesis), 2015.
- [14] 周康辉, 郑永光, 杨波, 等. 强对流天气客观临近预报技术进展和展望 [J]. 气象学报, 2025, 83(3): 798–812.  
Zhou K H, Zheng Y G, Yang B, et al. Objective nowcasting of severe convective weather: Technological progress and outlook [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2025, 83(3): 798–812.
- [15] 熊少堂, 赵钢铁, 郭成超, 等. 我国各大流域复合高温干旱事件变化趋势与归因分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(1): 83–96.  
Xiong S T, Zhao T T G, Guo C C, et al. Evaluation and attribution of trends in compound dry-hot events for major river basins in China [J]. Scientia Sinica Terrae, 2024, 54(1): 83–96.
- [16] 严中伟, 杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局 [J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 267–272.  
Yan Z W, Yang C. Geographic patterns of extreme climate changes in China during 1951–1997 [J]. Climatic and Environmental Research, 2000, 5(3): 267–272.
- [17] 矫梅燕, 张小玲, 吕梦瑶, 等. 中国天气预报业务现代化发展综述 [J]. 气象学报, 2025, 83(3): 761–769.  
Jiao M Y, Zhang X L, Lyu M Y, et al. Modernization of weather forecasting operations in China: A review [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2025, 83(3): 761–769.
- [18] 李泽椿, 湛芸, 张夕迪, 等. 中央气象台暴雨预报业务的发展及思考 [J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 407–415.  
Li Z C, Chen Y, Zhang X D, et al. Development and perspectives on torrential rain forecasting operation in National Meteorological Center [J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(5): 407–415.
- [19] 余晖, 陈联寿, 谈哲敏, 等. 中国台风预报技术发展的历史、现状与未来 [J]. 气象学报, 2025, 83(3): 786–797.  
Yu H, Chen L S, Tan Z M, et al. Development of tropical cyclone forecasting technology in China: Past, present, and future [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2025, 83(3): 786–797.
- [20] 郑永光, 杨波, 蓝渝, 等. 强对流天气形成机制和预报研究综述 [J]. 气象, 2025, 51(11): 1495–1522.  
Zheng Y G, Yang B, Lan Y, et al. A review of mechanisms and forecasting technology of severe convective weather [J]. Meteorological Monthly, 2025, 51(11): 1495–1522.
- [21] Adam D. What a 190-year-old equation says about rainstorms in a changing climate [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2023, 120(14): e2304077120.
- [22] 李杰峰, 赵传峰, 陈安南, 等. “北极放大”现象驱动机制的研究进展 [J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(12): 3860–3877.  
Li J F, Zhao C F, Chen A N, et al. Advances in understanding the mechanisms of Arctic amplification [J]. Scientia Sinica Terrae, 2024, 54(12): 3860–3877.
- [23] 陈联寿, 端义宏, 宋丽莉, 等. 台风预报及其灾害 [M]. 北京: 气象出版社, 2012.  
Chen L S, Duan Y H, Song L L, et al. Typhoon forecast and disaster [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012.
- [24] 张鹏, 张云霞, 汪洋, 等. 1978—2020 年中国台风灾害灾情时空分布格局及影响因素分析 [J]. 热带地理, 2024, 44(6): 1047–1063.  
Zhang P, Zhang Y X, Wang Y, et al. Analysis of temporal-spatial patterns and impact factors of typhoon disaster losses in China

- from 1978 to 2020 [J]. *Tropical Geography*, 2024, 44(6): 1047–1063.
- [25] Shen Z Q, Gu J F, Wang Q W, et al. Increased threat of strong typhoons along the Pacific coast of Japan: Combined effect of track change and seasonal advance [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2024, 25(11): e1261.
- [26] Xiang Q, Zhao H K, Klotzbach P J, et al. Amplified bimodal distribution of Western North Pacific tropical cyclone lifetime maximum intensity [J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52(2): e2024GL111637.
- [27] 李英, 陈联寿, 王继志. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征 [J]. *气象学报*, 2004, 62(2): 167–179.  
Li Y, Chen L S, Wang J Z. The diagnostic analysis on the characteristics of large scale circulation corresponding to the sustaining and decaying of tropical cyclone after its landfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 167–179.
- [28] 孔期, 符娇兰, 谌芸, 等. 河南“21·7”特大暴雨过程中尺度低空急流和低涡的演变特征及成因分析 [J]. *气象*, 2022, 48(12): 1512–1524.  
Kong Q, Fu J L, Chen Y, et al. Evolution characteristics and formation analysis of mesoscale low-level jet and vortex in Henan Province during the July 2021 severe torrential rain [J]. *Meteorological Monthly*, 2022, 48(12): 1512–1524.
- [29] 向纯怡, 董林, 刘达, 等. 2023年台风杜苏芮登陆后残涡维持的热力和动力机制研究 [J]. *气象*, 2024, 50(11): 1289–1305.  
Xiang C Y, Dong L, Liu D, et al. Thermodynamic and dynamic mechanism of maintenance of typhoon dokhuri remnant vortex after its landfall in 2023 [J]. *Meteorological Monthly*, 2024, 50(11): 1289–1305.
- [30] 贾莉, 向纯怡, 吕心艳, 等. 超强台风“格美”(2403)影响下不同类型降水特征及成因 [J]. *海洋气象学报*, 2025, 45(1): 1–11.  
Jia L, Xiang C Y, Lyu X Y, et al. Characteristics and causes of different types of precipitation under impact of super typhoon Gaemi (2403) [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2025, 45(1): 1–11.
- [31] 陶诗言. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.  
Tao S Y. Heavy rainfalls in China [M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [32] 於琰, 徐影, 张永香. 近25 a中国暴雨及其引发的暴雨洪涝灾害影响的时空变化特征 [J]. *暴雨灾害*, 2018, 37(1): 67–72.  
Yu L, Xu Y, Zhang Y X. Temporal and spatial variation of rainstorms and the impact of flood disasters due to rainstorms in China in the past 25 years [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2018, 37(1): 67–72.
- [33] 谷星月, 冯爱霞, 霍子墨. 近十年我国暴雨变多变强了? 大数据揭秘 [N]. *中国气象报*, 2023-10-12(03).  
Gu X Y, Feng A X, Huo Z M. Has the heavy rain in China increased or intensified in the past decade: Big data reveals the truth [N]. *China Meteorological News*, 2023-10-12(03).
- [34] 邓梓锋, 高玮志, 廖耀星, 等. 气候变化对城市暴雨洪涝影响研究进展 [J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(2): 1–14.  
Deng Z F, Gao W Z, Liao Y X, et al. Research progress on the impact of climate change on urban rainstorm and flooding [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2024, 45(2): 1–14.
- [35] 俞小鼎, 郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展 [J]. *气象学报*, 2020, 78(3): 391–418.  
Yu X D, Zheng Y G. Advances in severe convective weather research and operational service in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(3): 391–418.
- [36] 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等. 强对流天气监测预报预警技术进展 [J]. *应用气象学报*, 2015, 26(6): 641–657.  
Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, 26(6): 641–657.
- [37] 薛晓颖, 任国玉, 孙秀宝, 等. 中国中小尺度强对流天气气候学特征 [J]. *气候与环境研究*, 2019, 24(2): 199–213.  
Xue X Y, Ren G Y, Sun X B, et al. Climatological characteristics of meso-scale and micro-scale strong convective weather events in China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2019, 24(2): 199–213.
- [38] 郑永光. 中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述 [J]. *气象科技进展*, 2020, 10(6): 69–75.  
Zheng Y G. Review of climatology and favorable environmental conditions of tornado in China [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2020, 10(6): 69–75.
- [39] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征 [J]. *气象*, 2015, 41(7): 793–805.  
Fan W J, Yu X D. Characteristics of spatial-temporal distribution of tornadoes in China [J]. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(7): 793–805.
- [40] 史文丽, 闵锦忠, 费建芳, 等. 全球变暖背景下对流性降水变化特征及影响因子分析 [J]. *气候与环境研究*, 2013, 18(1): 32–42.  
Shi W L, Min J Z, Fei J F, et al. Analysis of characteristics of convective precipitation under global warming and its impact factors [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(1): 32–42.
- [41] 林纾, 李红英, 黄鹏程, 等. 2022年夏季我国高温干旱特征及其环流形势分析 [J]. *干旱气象*, 2022, 40(5): 748–763.  
Lin S, Li H Y, Huang P C, et al. Characteristics of high temperature, drought and circulation situation in summer 2022 in China [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2022, 40(5): 748–763.
- [42] Wang J, Yan Z W. Rapid rises in the magnitude and risk of extreme regional heat wave events in China [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2021, 34: 100379.
- [43] Woetzel J, Henderson K, Krishnan M, et al. Leading the battle against climate change: Actions for China [R]. New York: McKinsey & Company, 2020.
- [44] Zeng J N, Li H X, Sun B, et al. Summertime compound heat wave and drought events in China: Interregional and subseasonal characteristics, and the associated driving factors [J]. *Environmental Research Letters*, 2024, 19(7): 074046.
- [45] 姜雨彤, 郝增超, 冯思芳, 等. 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 70–77.  
Jiang Y T, Hao Z C, Feng S F, et al. Spatiotemporal evolution characteristics in compound hot-dry events in Yangtze River and Yellow River Basins [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 70–77.
- [46] 祝亚丽, 刘洋, 孔祥慧, 等. 中国高温、干旱及其复合事件的

- 研究进展和展望 [J]. 大气科学学报, 2025, 48(1): 26–36.
- Zhu Y L, Liu Y, Kong X H, et al. Research progress and prospect on the drought, heatwave, and compound drought and heatwave events in China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2025, 48(1): 26–36.
- [47] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望 [J]. 气象学报, 2020, 78(3): 500–521.
- Zhang Q, Yao Y B, Li Y H, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 500–521.
- [48] 樊灵孟, 龚博, 高锡明, 等. 低温雨雪冰冻灾害监测预警技术与业务实践 [J]. 中国减灾, 2022 (23): 30–33.
- Fan L M, Gong B, Gao X M, et al. Monitoring and early warning technology and business practice for low-temperature, rain, snow and ice disasters [J]. Disaster Reduction in China, 2022 (23): 30–33.
- [49] 顾雷, 魏科, 黄荣辉. 2008 年 1 月我国严重低温雨雪冰冻灾害与东亚季风系统异常的关系 [J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 405–418.
- Gu L, Wei K, Huang R H. Severe disaster of blizzard, freezing rain and low temperature in January 2008 in China and its association with the anomalies of East Asian monsoon system [J]. Climatic and Environmental Research, 2008, 13(4): 405–418.
- [50] 李倩, 闫正涛, 许映军. 1951—2020 年中国南方地区低温雨雪冰冻危险性评估 [J]. 地理科学, 2023, 43(1): 163–172.
- Li Q, Yan Z T, Xu Y J. Assessment of low temperature, rain/snow and freezing events of the Southern China from 1951 to 2020 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(1): 163–172.
- [51] Guan Y H, Zheng F L, Zhang P, et al. Spatial and temporal changes of meteorological disasters in China during 1950—2013 [J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2607–2623.
- [52] Smith M D. An ecological perspective on extreme climatic events: A synthetic definition and framework to guide future research [J]. Journal of Ecology, 2011, 99(3): 656–663.
- [53] Thibault K M, Brown J H. Impact of an extreme climatic event on community assembly [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(9): 3410–3415.
- [54] 王颖, 王晓云, 江志红, 等. 中国低温雨雪冰冻灾害危险性评估与区划 [J]. 气象, 2013, 39(5): 585–591.
- Wang Y, Wang X Y, Jiang Z H, et al. Assessment and zoning of low-temperature, rain/snow and freezing disasters in China [J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(5): 585–591.
- [55] 邵楠, 李斐斐, 滕玉鹏, 等. 中国天气雷达业务技术能力现代化 60 年进展 [J]. 气象学报, 2025, 83(4): 1007–1025.
- Shao N, Li F F, Teng Y P, et al. The 60-year progress of China's modernization of weather radar operation and technical capabilities [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2025, 83(4): 1007–1025.
- [56] 李泽椿, 张玲, 钱奇峰, 等. 中央气象台台风预报业务的发展及思考 [J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 10–19.
- Li Z C, Zhang L, Qian Q F, et al. The development and consideration of typhoon forecast operation of National Meteorological Center [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(1): 10–19.
- [57] 吕达仁, 王普才, 邱金桓, 等. 大气遥感与卫星气象学研究的发展与回顾 [J]. 大气科学, 2003, 27(4): 552–566.
- Lyu D R, Wang P C, Qiu J H, et al. An overview on the research progress of atmospheric remote sensing and satellite meteorology in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(4): 552–566.
- [58] 张鹏, 李锐, 赵坤, 等. 中国综合气象观测系统的业务发展 [J]. 气象学报, 2025, 83(3): 729–760.
- Zhang P, Li R, Zhao K, et al. Development of an integrated meteorological observation system in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2025, 83(3): 729–760.
- [59] 曹晓钟, 夏元彩, 罗皓文, 等. 气象探空观测的技术发展与未来展望 [J]. 气象科技进展, 2022, 12(5): 27–36.
- Cao X Z, Xia Y C, Luo H W, et al. Technical development and prospect of meteorological sounding observation [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2022, 12(5): 27–36.
- [60] 董瑶海, 陈文强, 杨军. 星耀中国——我们的风云气象卫星 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2022.
- Dong Y H, Chen W Q, Yang J. Starlight shines on China—Our fengyun meteorological satellite [M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2022.
- [61] 卢乃锰, 谷松岩. 气象卫星发展回顾与展望 [J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 832–841.
- Lu N M, Gu S Y. Review and prospect on the development of meteorological satellites [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 832–841.
- [62] 程正泉, 林良勋, 杨国杰, 等. 超强台风威马逊快速增强及大尺度环流特征 [J]. 应用气象学报, 2017, 28(3): 318–326.
- Cheng Z Q, Lin L X, Yang G J, et al. Rapid intensification and associated large-scale circulation of super typhoon Rammasun in 2014 [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(3): 318–326.
- [63] 钱传海, 李泽椿, 张福青, 等. 国际热带气旋飞机观测综述 [J]. 气象科技进展, 2012, 2(6): 6–16.
- Qian C H, Li Z C, Zhang F Q, et al. Review on international aircraft reconnaissance of tropical cyclones [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2012, 2(6): 6–16.
- [64] 雷小途. 无人飞机在台风探测中的应用进展 [J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 276–283.
- Lei X T. Progress of unmanned aerial vehicles and their application to detection of tropical cyclone [J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(2): 276–283.
- [65] 翟薇, 钱传海, 吴昊, 等. 台风飞机观测工程设计思考 [J]. 中国工程科学, 2025, 27(2): 86–94.
- Zhai W, Qian C H, Wu H, et al. Engineering design for aircraft-based observations of typhoons [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(2): 86–94.
- [66] 陈静, 朱跃建, 段晚锁, 等. 集合预报进展、挑战及展望 [J]. 气象学报, 2025, 83(3): 480–502.
- Chen J, Zhu Y J, Duan W S, et al. A review on development, challenges, and future perspectives of ensemble forecast [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2025, 83(3): 480–502.
- [67] 金荣花, 曹勇, 赵瑞霞, 等. 中央气象台智能数字天气预报业务的技术进展 [J]. 气象, 2025, 51(11): 1321–1334.
- Jin R H, Cao Y, Zhao R X, et al. Technological advances in the in-

- telligent digital weather forecasting operational system of National Meteorological Centre [J]. *Meteorological Monthly*, 2025, 51(11): 1321–1334.
- [68] 沈学顺, 王捷, 李泽椿, 等. 中国数值天气预报的自主创新发展 [J]. *气象学报*, 2020, 78(3): 451–476.  
Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al. China's independent and innovative development of numerical weather prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(3): 451–476.
- [69] 张卫民, 沈学顺, 曹小群, 等. 中国数值天气预报业务系统70年发展 [J]. *气象学报*, 2025, 83(3): 435–463.  
Zhang W M, Shen X S, Cao X Q, et al. 70 years of development in China's operational numerical weather prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2025, 83(3): 435–463.
- [70] 雷荔傑, 翁富忠, 段晚锁, 等. 数值天气预报资料同化的发展与展望 [J]. *气象学报*, 2025, 83(3): 503–535.  
Lei L L, Weng F Z, Duan W S, et al. Overview and prospect of data assimilation in numerical weather prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2025, 83(3): 503–535.
- [71] 谢元富, 朱舒君, 和玉君, 等. 数据同化百年史: 演化、里程碑和未来方向 [J]. *气象学报*, 2025, 83(3): 536–551.  
Xie Y F, Zhu S J, He Y J, et al. A century of data assimilation: Evolution, milestones, and future directions [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2025, 83(3): 536–551.
- [72] 王勇, 夏雯雯, 韩轶伦, 等. 数值模式中对流与云参数化的回顾与展望 [J]. *气象学报*, 2025, 83(3): 552–565.  
Wang Y, Xia W W, Han Y L, et al. Progress and perspective of convection and cloud parameterizations in numerical models [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2025, 83(3): 552–565.
- [73] 陈昊明, 李建, 李普曦, 等. 中国数值模式评估方法的研究进展综述 [J]. *气象学报*, 2025, 83(3): 566–581.  
Chen H M, Li J, Li P X, et al. A review of research progress on numerical model verification and evaluation in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2025, 83(3): 566–581.
- [74] Qi L B, Yu H, Chen P Y. Selective ensemble-mean technique for tropical cyclone track forecast by using ensemble prediction systems [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, 140(680): 805–813.
- [75] Dong L, Zhang F Q. OBEST: An observation-based ensemble subsetting technique for tropical cyclone track prediction [J]. *Weather and Forecasting*, 2016, 31(1): 57–70.
- [76] Bi K F, Xie L X, Zhang H H, et al. Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks [J]. *Nature*, 2023, 619(7970): 533–538.
- [77] Chen L, Zhong X H, Zhang F, et al. Fuxi: A cascade machine learning forecasting system for 15-day global weather forecast [J]. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2023, 6: 190.
- [78] Chen K, Tao H, Gong J, et al. FengWu: Pushing the skillful global medium-range weather forecast beyond 10 days lead [EB/OL]. (2023-04-06)[2025-12-15]. <https://arxiv.org/abs/2304.02948>.
- [79] Sun Y Z, Luo W T, Xiang Y F, et al. Deploying atmospheric and oceanic AI models on Chinese hardware and framework: Migration strategies, performance optimization and analysis [EB/OL]. (2025-10-14)[2025-12-15]. <https://arxiv.org/abs/2510.17852>.
- [80] 张红亮, 沈学顺, 苏勇. 预估-校正的半隐式半拉格朗日时间积分方案及其在CMA-GFS模式中的应用 [J]. *气象学报*, 2022, 80(2): 280–288.  
Zhang H L, Shen X S, Su Y. A semi-implicit semi-Lagrangian time integration schemes with a predictor and a corrector and their applications in CMA-GFS [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2022, 80(2): 280–288.
- [81] 黄建平, 陈斌. 人工智能技术在未来改进天气预报中的作用 [J]. *科学通报*, 2024, 69(17): 2336–2343.  
Huang J P, Chen B. How artificial intelligence is transforming weather forecasting for the future [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(17): 2336–2343.
- [82] 张迪, 李泽椿, 施培量, 等. 气象灾害预警信息广播系统总体设计与信息编码研究 [J]. *中国工程科学*, 2009, 11(9): 8–12.  
Zhang D, Li Z C, Shi P L, et al. The study on general design framework and message encoding of weather hazards warning information broadcasting system [J]. *Strategic Study of CAE*, 2009, 11(9): 8–12.
- [83] 郭俊萍. 提升气象预警信息传播效果的分析与建议 [J]. *气象科技进展*, 2020, 10(6): 131–133.  
Guo J P. Analysis on improving the dissemination effect of meteorological early warning information [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2020, 10(6): 131–133.
- [84] 赵宁. 国家预警信息发布中心: 发挥气象预警先导作用 守护人民生命财产安全 [N]. *中国气象报*, 2025-05-16(01).  
Zhao N. National Warning Information Release Center: Giving full play to the leading role of meteorological warnings to safeguard people's lives and property [N]. *China Meteorological News*, 2025-05-16(01).
- [85] 中国气象局. 早期预警中国实践 [M]. 北京: 气象出版社, 2025. China Meteorological Administration. *China's practice of early warning* [M]. Beijing: Meteorological Press, 2025.
- [86] 易成岐, 窦悦, 陈东, 等. 全国一体化大数据中心协同创新体系: 总体框架与战略价值 [J]. *电子政务*, 2021 (6): 2–10.  
Yi C Q, Dou Y, Chen D, et al. National integrated big data center collaborative innovation system: Overall framework and strategic value [J]. *E-Government*, 2021 (6): 2–10.
- [87] 周康辉, 代刊, 曾沁, 等. 全球人工智能治理现状及气象领域人工智能治理的挑战 [J]. *气象学报*, 2025, 83(1): 168–177.  
Zhou K H, Dai K, Zeng Q, et al. Current status of artificial intelligence governance and its challenges in the meteorological community [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2025, 83(1): 168–177.
- [88] 姚秀萍, 张悦含, 袁俊肖. 台风“杜苏芮”(2305)过程的气象服务分析与思考 [J]. *气象科技进展*, 2024, 14(1): 59–62.  
Yao X P, Zhang Y H, Yuan J X. Analysis and reflection on the meteorological services for typhoon doksuri (2305) [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2024, 14(1): 59–62.