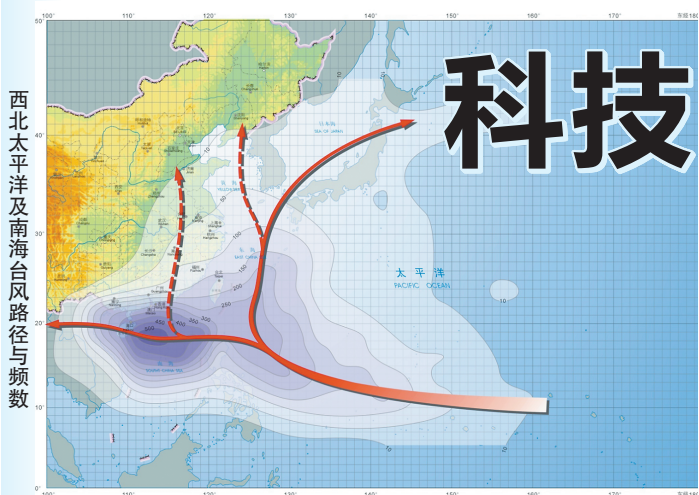




地海空天一体化监测 开启与台风全新对话

上海亚太台风研究中心主任 汤杰

1956年,超强台风“温黛”重创浙江,造成5000余人遇难——当时的气象预报员只能在台风登陆前3小时发出模糊预警。2024年,当我们面对强台风“贝碧嘉”时,在高精度卫星监测配合高分辨数值模式以及人工智能模型帮助下,预报员们能够提前2到3天就划出它的可能登陆点,最终台风24小时预报与实况登陆点误差小于50公里,因而此次创纪录强度登陆上海的台风没有造成人员直接伤亡。

这场变革的核心,一方面是台风科研人员不断创新观测技术,构建地海空天一体化台风监测体系;另外一方面大力提升预报模型能力,积极推动数值模式与人工智能的深度融合。从穿透云层的多源探测体系到精准灵巧的人工智能模型,人类拥有了能与台风更深度对话的全新语言。

立体观测“三维扫描”台风结构

观测资料是深入理解热带气旋活动的基础。1831年,美国瑞德菲尔德依观测首次推断飓风为环绕中心旋转的风暴,揭开科学认知台风序幕。1879年,上海徐家汇观象台捕捉到台风“漏斗型”气压骤降,能恩斯等人手绘出人类首张台风结构示意图。

近年,静止和极轨卫星、无人机、火箭、智能船舶、光学及微波雷达等新技术应用,实现从边界层到对流层顶、从外围到内核的全方位三维观测,提升了台风动态掌握能力。

卫星是核心观测手段之一。1960年,首颗气象卫星TIROS-1传回云图,突破地面站点依赖,提升台风路径预测时效与覆盖。越来越多的星载传感器成为人类“穿透云层看台风”的显微镜,台风预报员们能精确获取台风内部温度、湿度、降水和海面风场等关键信息。风云三号G星上的微波辐射计像灵敏的“顺风耳”,通过地球微波辐射反演海面风速与降水强度;微波散射计(如风云三号E星)则如主动“探测雷达”,分析回波精确测量风速风向;合成孔径雷达(SAR,搭载在我国高分系列卫星)则以米级分辨率还原台风风场等结构,被誉为高精度“CT扫描仪”。而小卫星群创新利用导航卫星反射信号,高频次、全天候捕捉台风,配合风云系列及海洋系列卫星等对台风实时高精度观测。中国气象局上海台风研究所研发的“星载主被动微波协同的台风风圈识别系统”,融合多源卫星观测,创新提出多层级台风风圈定量提取算法。2021年精准发现“烟花”台风在登陆前阶段有尺寸迅速增大的现象,为预报员提供了科学定量的一手参考信息,相关算法已应用于各台风业务部门。

飞机观测进一步弥补了传统高空气象观测的空白。无人机不仅像探空气球一样直接观测多种气象要素,更能抵达极端环境或人迹罕至的区域长期作业。2020年中国气象局组织“海燕计划”,利用大型无人机下投探空仪和毫米波雷达,对台风“森拉克”外围云系立体扫描。2024年,“海燕”无人机在南海再次试验,其搭载摄像头获取台风内部珍贵影像。同年,上海台风研究所与香港天文台首次在南海针对台风“潭美”展开双有人机观测,实现南海台风科学试验的突破。

与此同时,我国的台风观测团队多次组建以多普勒激光雷达和相控阵雷达为主要“骨干”的台风高精度观测网,形成十米级分辨率台风精细观测网络,实现实时动态追踪。

科技突破 精准“捕台风”

话题主持:本报记者 马丹

今年7月,全球台风数据中心发布双语平台“StormHub”,实现台风信息15分钟级动态更新,标志着我国台风预报正式迈入分钟级精准时代。支撑这一突破的,是“空—天—地—海”立体观测体系与人工智能的深度融合。

然而,科技飞跃正面临气候变暖催化的“台风悖论”:全球台风频数减少16%,但强度与灾

害反增。2024年“摩羯”“贝碧嘉”接连刷新我国秋台风、上海登陆台风强度纪录,极端降水事件频次较30年前激增60%。面对“少而更强”的台风趋势,台风科学家提出“将风抓在指尖,把雨装进算法”。正如上海亚太台风研究中心主任汤杰所言:“科技韧性为全球协作是抵御灾害风险的硬核盾牌。”

台风预报精度不断提升

资料同化技术被誉为“连接观测与模拟的桥梁”。通过将卫星、雷达、无人机、地面观测站等多源观测数据与数值天气预报模型实时融合,资料同化有效填补了观测时空空白,极大提升了大气初始场精度。四维变分同化(4D-Var)、集合卡尔曼滤波(EnKF)等先进同化方法,已能高效利用全球卫星云图、三维风场、海面温度及台风内部结构等关键资料,为台风路径和强度预报奠定坚实基础。中国气象局上海台风所等机构已实现多源观测数据的集成同化,并与区域高分辨率数值模式深度耦合,显著提升台风路径和强度的预报准确率。

与此同时,数值预报模式正向更高分辨率、更复杂物理过程快速迭代。新一代全球及区域数值模式(如GRAPES等),不仅能细致模拟台风生成、发展、移动、消亡的全过程,还能准确还原台风眼墙、雨带等细节结构。物理过程参数化、云微物理、多尺度耦合等创新技术的应用,使模式在极端天气下表现日益逼真。在超级计算机的帮助下,台风模拟已可实现准实时、精细化运行。2016年,“中国智造”的GRAPES全球预报系统正式进入业务运行,标志着我国数值模式步入世界先进行列。

人工智能 引领预报智能化

深度学习、大模型等AI技术在台风监测与预报中持续突破,极大提升了预报的智能化与精准化水平。包括风乌、伏羲、盘古等著名AI模型首先通过深度挖掘海量观测数据、卫星雷达观测等多源数据中的复杂规律,实现对台风路径和强度等关键要素的快速、智能预测。例如,基于深度学习的AI模型可在数秒内给出台风未来路径概率分

布,也可以在几分钟内给出长达10天的台风路径预报,为应急响应争取宝贵时间。更值得关注的是,人工智能技术不仅提高了短期路径预报精度,还能挖掘台风生成与演变的气候背景信号,推动季节与年际变化的预测。当前,国内多家单位已将AI算法与传统数值模式深度耦合,构建新一代台风预报系统,在今年多次台风实战与极端天气防控中展现出极强的智能预警能力。

未来将迈向“主动防御”时代

能否将台风预报和人工干预台风技术的发展结合,提升人类对台风的趋利避害响应能力?这一问题正受到中外学者的共同关注,日本等国已开始相关科研攻关。对这一类问题的探索能否给台风科技带来颠覆性的变革非常值得进一步探讨,也将成为亚太台风中心未来深度探索的方向。随着量子计算、人工智能等技术的融入,台风防御正在进入新阶段,一场静悄悄的技术革命正在防台减灾领域内发生。这场科技革命不仅提升了人类对台风的防御能力,更可能改变人类与台风的关系。人们从被动应对到主动防御,科技创新正在将台风这个“海洋猛兽”转化为可预测、可防御的自然现象甚至可控制可利用的自然资源。

此外,要提升台风预报必须加强数据分析应用和国际合作。台风从生成到消亡往往经历多个国家,是一个高度需要国际协作的气象灾害。位于上海临港的亚太台风研究中心,充分发挥国际组织下属国际科研平台优势,推出“全球台风数据中心”,为全球台风相关人员提供数据和算法支持。

『矛盾式』趋势：生成数减少 破坏力反增

中国气象局上海台风研究所研究员 李永平

随着全球气候变化加剧,天气和气候异常极端事件频发,台风作为地球上最强烈的较大尺度天气系统也呈现出较明显的异常特征。较多的研究都指出,全球台风频数将减少。在中等碳排放情景下,本世纪后期全球台风频数将减少16%,东亚沿海地区登陆台风频数也将减少。但是,台风平均强度、降水率以及强台风的数量和发生天数将增加。

近年来,西北太平洋及登陆我国的台风正经历台风强度增强、生成位置和移动路径更偏北、极端降水增强增多等气候变化,而且,未来还有进一步加剧的趋势。对此,我们应该做好长远布局,一是提高台风监测预警能力,加密空—天—海—一体化观测,实现预警信息“最后一公里”到户到人;二是加强工程韧性,提升基础设施抗台标准,建设“海绵+韧性”城市;三是提高社会响应能力,建立“预警信号—自动响应”清单和应急响应的网格化管理等。

西北太平洋及南海是全球台风发生频率最多的海域,每年约有26个台风生成,其中13个左右影响我国沿海、7个左右台风登陆我国。近年来,台风生成频数和影响我国的台风频数都略呈减少趋势。2023年,西北太平洋及南海海域生成年频数仅为16个。2025年第1号台风“蝴蝶”6月10日才生成,比常年平均推迟了2个月多。登陆台风频数同样具有明显年际波动,总数在最近几年呈现一定的下降趋势,其中登陆华南沿海的台风略少,登陆华东沿海的台风略多。

但是,台风强度却在增强。近年来,袭击东亚和东南亚的登陆台风强度增强了12%—15%。例如,2024年11号台风“摩羯”9月6日以超强台风级别(17级以上,中心附近最大风力达62米/秒)登陆海南文昌,是有气象记录以来秋季登陆我国的最强台风。而且,台风“摩羯”在超强台风级别维持时间长达极其罕见的64小时,凸显了其异常强大的能量和稳定性。又例如,2024年“贝碧嘉”台风是新中国成立以来登陆上海的最强台风,其登陆上海浦东临港沿海时最大强度达强台风级,近中心最大风速42m/s(14级)。

因台风强度的增强和我国沿海经济的高速发展,台风造成的灾害也呈逐年增大趋势,2023和2024年因致灾而被除名的台风达9个,为历年之最。1991年—2024年,影响上海的强台风及以上(指台风生命周期中曾达到的最大强度)年均影响频数为1.39个台风,明显的上升趋势。同时,台风极端降水强度和频数等都有增加的趋势。研究表明,我国台风过程雨量年极值和日降水极值超过250毫米的台风频数分别自20世纪70年代和20世纪80年代起增多;我国东南部地区台风极端降水呈现显著的增加趋势。

近几十年来,虽然西北太平洋台风频数和登陆频数略有减少,但台风路径整体西移,其登陆点存在向北偏移趋势;随着台风活动范围的向北、向西扩张,我国东南部和华南西南部、日本等区域超强台风登陆数量增加,我国沿海地区其受台风影响的年平均时长有所增加,尤其是华东沿海地区台风发生的年频数和受台风活动影响的时长均呈显著上升趋势。在此背景下,登陆上海台风有增多趋势。2018年有3个台风接连登陆上海,成为登陆上海台风数最多的年份。接着的2021年和2024年又分别出现1个和2个台风登陆上海。而历史上平均间隔5—6年才有1个台风直接登陆上海。