

台风残余环流引发的强降雨 灾害分析及应对研究

穆杰^{1,2}, 任仲伟³, 吴泽斌^{1,2}, 许惠敏^{1,2}, 柴福鑫^{1,2,4}, 徐奎⁵, 王帆^{1,2*}

(1. 水利部防洪抗旱减灾技术创新中心(水旱灾害防御中心), 100038, 北京; 2. 中国水利水电科学研究院, 100038, 北京;
3. 西藏自治区水利厅, 850005, 拉萨; 4. 水利部京津冀水安全保障重点实验室, 100038, 北京;
5. 天津大学建筑工程学院, 300354, 天津)

摘要: 台风作为一种破坏力极强的天气系统, 其生命周期各个阶段呈现不同的致灾性。当台风强度明显减弱并停止编号后, 其残余环流(或称残涡)可能长时间维持或再次发展, 在与中纬度西风槽、副热带高压边缘的偏南气流、低空急流等天气系统相互作用后, 会形成有利的降水条件, 这种极端降水在全球范围内造成了多次严重的洪涝灾害, 成为气象预报和灾害管理的新挑战。选取国内外台风残余环流致灾典型案例进行分析, 系统性揭示台风停编后残余环流的致灾严重性及其背后的物理机制, 评估了现有预报和应对体系, 指出存在的不足, 提出应对策略。研究表明, 目前针对残余环流以及由其引发的降水的预报能力均显不足, 且预报预警体系和相关标准尚不完善, 建议设置“台风停编后24~48 h重点监视期”, 制定残余环流预报业务规范方案, 深度融合风云卫星云图、大尺度环境场与地面自动站等多源数据, 改进数值模式, 加强模式集合预报应用, 提升对残余环流移动趋势的预报能力。同时, 持续完善水旱灾害防御体系, 增强公众防范意识和整体抗灾韧性, 以提高对台风全生命周期的灾害应对能力。

关键词: 台风停编; 残余环流; 极端降雨; 预报预警; 防御体系

Characteristics analysis and response strategies on heavy rainfall disasters triggered by typhoon residual circulation

MU Jie^{1,2}, REN Zhongwei³, WU Zebin^{1,2}, XU Huimin^{1,2,4}, XU Kui⁵, WANG Fan^{1,2*}

(1. Technology Innovation Center for Flood & Drought Disaster Prevention and Reduction (Flood and Drought Disaster Prevention Center), Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Water Resources Department of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850005, China; 4. Key Laboratory of Water Safety for Beijing-Tianjin-Hebei Region of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 5. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: Typhoons, as highly destructive weather systems, exhibit different disaster-causing characteristics at different stages of their life cycle. However, after a typhoon significantly weakens and is no longer officially tracked, its residual circulation (also referred to as a remnant vortex) could remain quasi-stationary for a considerable time or reintensify. Through interactions with weather systems such as mid-latitude westerly troughs, southerly flows along the edge of the subtropical high, and low-level jets, it can create favorable conditions for

收稿日期: 2026-06-12 修回日期: 2026-07-20

作者简介: 穆杰, 正高级工程师, 主要从事防洪减灾相关研究工作。

通信作者: 王帆, 高级工程师, 主要从事防洪减灾相关研究工作。E-mail: wangfan@iwhr.com

基金项目: 京津冀环境综合治理国家科技重大专项(2025ZD1208304); 国家自然科学基金项目(U2340225); 天津市防洪调度应急指挥平台建设项目(JZ120205A0042024)。

precipitation. Such extreme precipitation has caused numerous severe flood disasters worldwide, posing a new challenge for meteorological forecasting and disaster management. Through an analysis of representative domestic and international cases, this paper systematically reveals the severity of disasters induced by residual circulation after the typhoon numbering is discontinued, as well as the underlying physical mechanisms. It also evaluates the deficiencies in existing forecasting and response systems and proposes corresponding countermeasures. The results show that current forecasting capability for both residual circulation and the associated precipitation remains insufficient. Furthermore, the forecasting and early warning systems, along with relevant operational standards, remain inadequate. It is recommended to establish a “24 ~ 48 hour key monitoring period after typhoon numbering termination”, formulate operational guidelines for residual circulation forecasting, deeply integrate multi-source data including Fengyun satellite cloud imagery, large-scale environmental fields, and ground-based automatic weather stations, improve numerical models, strengthen the application of ensemble forecasting, and enhance the capability to predict the movement trends of residual circulations. Meanwhile, it is necessary to continuously improve the flood and drought disaster prevention and mitigation system, and enhance public awareness and social resilience, so as to improve disaster response capability throughout the life cycle of typhoons.

Keywords: typhoon numbering termination; residual circulation; extreme rainfall; forecasting and early warning; disaster prevention and mitigation system

中图分类号: TV+P444 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)14-0019-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.14.003

一、研究背景

在全球气候变化的大背景下,台风活动的频率、强度及影响范围正发生着显著变化。2025年西北太平洋和南海共有27个台风生成,较常年偏多1.9个,其中10个登陆我国,较常年偏多2.8个,秋台风强度偏强。以往,人们更关注台风编号期间的灾害,但在全球变暖背景下,停编后的台风带来的影响具有持续更长时间的趋势。

台风强度明显减弱并由气象部门停编后,残余环流并非立刻消散,反而可能在特定的大气环流背景下,长时间维持甚至再度发展,造成大范围持续性的强降雨,这种后续的危害效应往往因人们的防范意识减弱而造成严重损失。大量研究数据和实际案例均证实,台风残余环流仍具有较强致灾性,如2018年台风“温比亚”、2019年台风“利奇马”、2020年台风“巴威”、2021年飓风“艾达”、2023年台风“杜苏芮”和“海葵”、2024年台风“格美”、2025年墨西哥湾生成的热带风暴“巴里”等,停编后所挟带的大量水汽以及残余的涡旋系统,与其他天气系统相互作用,引发极端降雨事件,造成严重损失。

相关研究表明,台风残余环流引发强降雨的主要原因,是其自身仍保留着一定的旋转动力和水汽输送能力。当台风残余环流与中纬度西风槽、副热带高压边缘的偏南气流、低空急流等天气系统相互作用时,会

形成有利的降水条件。一方面,偏南气流或低空急流能够为残余环流持续输送充沛的暖湿水汽,有利于涡旋的维持;另一方面,西风槽带来的冷空气与残余环流中的暖湿气流交汇,会加剧大气层结不稳定,促使水汽垂直上升运动增强,进而形成大量降水。此外,地形也会对台风残余环流降水产生重要影响,当残余环流挟带的暖湿气流遇到山脉等地形阻挡时,会被迫沿山坡上升,进一步增强降水强度,形成局地暴雨中心。另外,当残余环流移入鞍形场等特定环境场时,涡旋环流停滞少动,给局地带来持续降水。

然而,现有研究对台风停编后残余环流致灾物理过程的认知尚不清楚,尤其在残余环流再发展的触发条件、演变规律及与之伴随的强降雨精细化预报方面,理论研究与业务应用仍存在不足。在研究对象上,以往的研究多集中于台风编号阶段的降雨机制,对残余环流引发的降雨关注相对较少,导致对其形成规律、影响范围和强度变化特征的认识还不够深入。在研究方法上,由于台风残余环流的结构复杂,且与多种复杂天气系统相互作用,现有数值模式对其降水过程预报仍存在一定的偏差,难以准确预报其移动趋势及其降水的时空分布和强度变化。因此,在应对过程中,残余环流引发降雨的预报能力与防汛减灾业务需求之间存在差距。

本文通过对多个国内外历史台风案例回顾与分

析,探讨了台风停编后残余环流导致强降雨灾害的发生过程及机制,揭示其水汽来源以及地形等关键因素的影响规律,提出防御台风残余环流引发强降雨的应对策略,为气象风险预警与防洪减灾提供参考。

二、台风残余环流致灾案例分析

1.2023年第5号台风“杜苏芮”

2023年台风“杜苏芮”是近年来残余环流引发极

端强降雨导致严重洪涝灾害的典型案例分析之一。“杜苏芮”于7月28日在福建晋江沿海登陆,随后强度减弱并一路北上,中央气象台于7月29日上午对其停止编号(见图1、图2)。台风残余旋涡维持阶段出现在7月29日下午至30日白天,维持原因为副热带高压阻挡、持续水汽输送、特殊的热动力配置与不稳定机制(冷暖空气的交汇)以及地形的增幅作用。已有研究表明,台风“杜苏芮”残余环流北侧受副热带高压阻挡,在

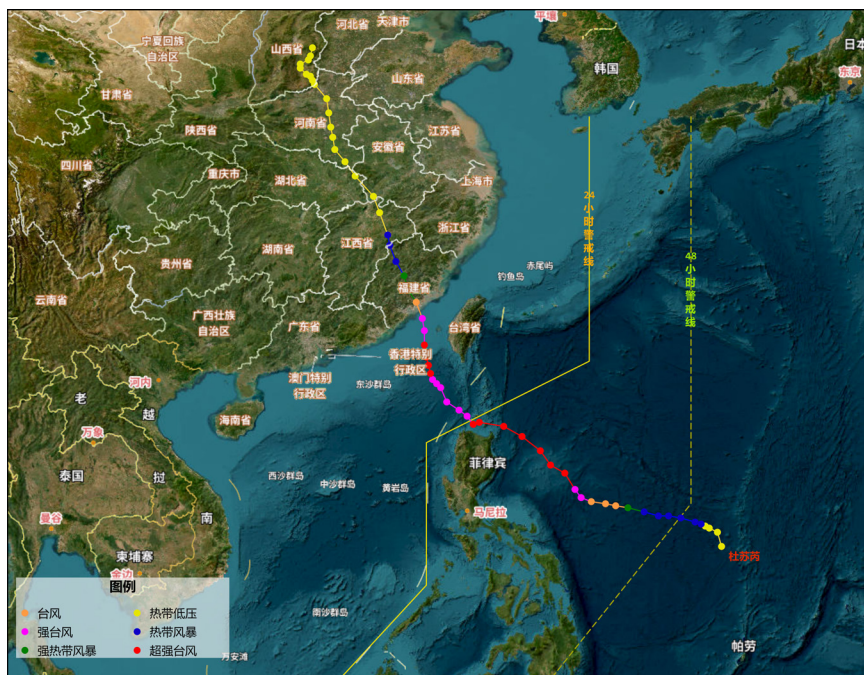


图1 台风“杜苏芮”(2305)路径(图片来源:中央气象台)

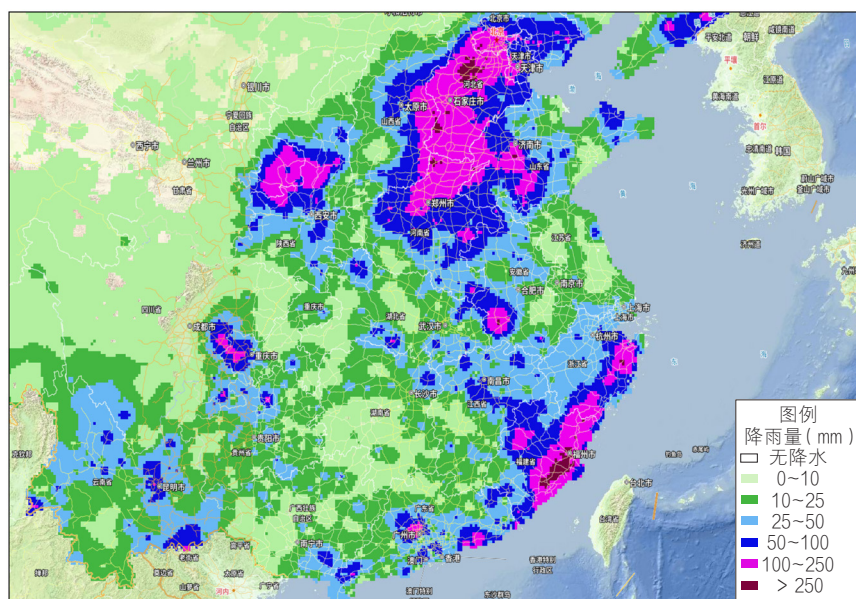


图2 台风“杜苏芮”(2305)累计降雨量
(2023年7月28日—30日 数据来源:中国大陆高精度逐日格点降水数据集CHM_PRE V2)

华北地区长时间停滞徘徊;残余环流东侧与副热带高压南侧的偏东风急流相结合,建立了稳定的低空水汽输送通道,将大量水汽从海洋输送至华北;中高层的干冷气流与低层暖湿气流形成“上干冷、下暖湿”的垂直配置,触发位势不稳定和对流不稳定,导致了残余环流气旋性涡度的垂直发展和极端降水的发生;水汽充沛的东风气流遇华北太行山和燕山山脉地形抬升,进一步加剧了降水强度。台风“杜苏芮”残余环流造成京津冀地区大范围极端性暴雨过程,太行山前

局地累计降雨量超过 1000 mm,海河流域出现特大洪水灾害。

2.2023年第11号台风“海葵”

2023年9月5日早晨,第11号台风“海葵”先后在福建省东山县和广东省饶平县沿海登陆(热带风暴级,8级),5日8时减弱为热带低压,6日17时停止编号(见图3、图4)。台风“海葵”残余环流处于大陆高压、西太平洋副热带高压、赤道辐合带与中纬度冷涡形成的鞍形场控制下,在珠江口地区停滞回旋并复苏增强;涡旋中



图3 台风“海葵”(2311)路径(图片来源:中央气象台)

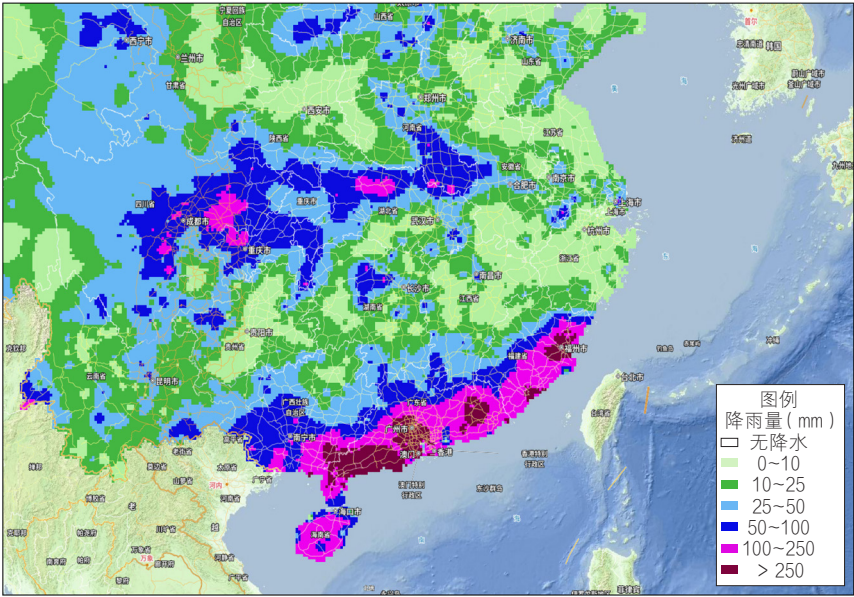


图4 台风“海葵”(2311)累计降雨量
(2023年9月4日—12日 数据来源:中国大陆高精度逐日格点降水数据集CHM_PRE V2)

心东南侧的港深地区处于西南暖湿气流与东南风急流的交汇点,形成类似于风场三合点的准静止结构,由于南海西南季风和粤东偏东风急流之间的边界维持稳定,风场三合点附近产生强烈而持续的低层辐合抬升,在近饱和水汽环境下有利于对流的触发和维持,形成极端性降雨。“海葵”降雨持续时间长、覆盖范围广(福建4天、广东8天、广西4天),残余环流诱发了粤港澳大湾区特大暴雨过程,大湾区多地24 h降雨量超过600 mm,局地雨强达100~158 mm/h,导致严重内涝灾害。

3.2021年的飓风“艾达”

2021年的飓风“艾达”残余环流造成了巨大灾害损失。该飓风于8月29日以四级飓风的强度在美国南部路易斯安那州登陆,30日在内陆减弱为热带风暴,中心经密西西比州、田纳西州、阿肯色州,继续缓慢北移,8月31日至9月1日转向东北,经肯塔基州、西弗吉尼亚州进入宾夕法尼亚州,并逐渐变性为温带气旋(见图5、图6)。相关研究指出,多天气系统的混合作用造成“艾达”飓风的强致灾性。墨西哥湾洋面温度显著高于同纬度的海洋,



图5 2021年飓风“艾达”路径(图片来源:美国国家飓风中心)

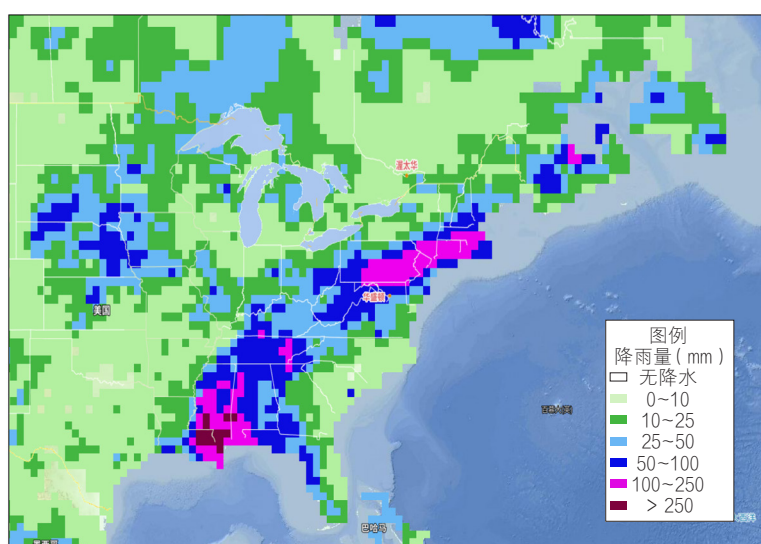


图6 飓风“艾达”累计降雨量
(2021年8月29日—9月2日)
数据来源:美国国家气候预测中心NCEP/NOAACPC GLOBAL PRCP V1.0)

使得“艾达”飓风在经过墨西哥湾之后,吸收了更多热量和水汽,在一天半的时间内从普通飓风迅速发展为四级飓风,最大持续风速直逼五级飓风,并以四级飓风强度登陆美国,其环流在美国陆地长时间维持,且移动缓慢,造成大范围、持续性影响。另外,变性阶段的“艾达”残余环流与北方冷涡之间形成了低空急流通道,纽约市和长岛正好位于低空急流作用最严重的位置,低空急流借助锋面形成的完美坡道,持续输送水汽,最终引发极端暴雨。9月1日,飓风“艾达”残余环流与冷空气结合,引发美国东北部(尤其新泽西、纽约)历史性的极端降雨和严重的城市洪水。纽约市单日降雨量高达181.1 mm,刷新了当地的历史纪录,导致城市公共交通系统陷入瘫痪。系统最终于9月2日消散于加拿大边境附近。“艾达”给美国带来大范围持续性强降雨,造成至少82人死亡,人员伤亡集中在美国东北部各州,此外,还造成路易斯安那州乃至整个墨西哥湾沿岸95%的石油和天然气停产。

三、国内外台风停编及残余环流预报业务现状

1. 台风停编标准

全球主要气象机构对于热带气旋的停编标准通常基于中心最大风速和环流结构来确定。中国气象局(CMA)、美国国家飓风中心(NHC)和日本气象厅(JMA)均规定,当热带气旋中心附近最大风力减弱至热带低压以下,即中心最大平均风力小于6级,或进入高纬度变为温带气旋时,将停止发布专门的台风路径和强度警报,即停止编号。

2. 预报内容与形式的转变

停编之后,各国台风预报内容和主体会发生变化。在美国,停编后台风的预报由国家飓风中心(NHC)转至天气预报中心(WPC),预报内容由以台风路径和强度为主改为侧重于陆域天气和强降水预报、山洪风险预警及河流洪水预报,天气预报中心(WPC)将发布公众提示单,重点提示降雨落区和累计降雨量。在中国,台风停编后,中国气象局(CMA)将停止发布间隔3 h的台风路径、强度等信息快讯,转为发布未来24 h受台风影响区域的大风和降雨预报。降雨预报主要为过程定量降雨预报,即未来特定时间段(如24 h、48 h)内某一区域的累计面雨量预报;鉴于台风残涡的严重影响,中国气象局(CMA)2025年开始对台风残涡预报进行试验。在日本,台风变性后的主要特征是降水和风场的非对称性扩大,日本气象厅(JMA)预报的重点不再是中心的

精准位置,而是右半圆(这是由于影响日本的残涡多为变形后热带气旋,通常为危险半圆)急剧扩大的强风区和气旋前期降水事件(Predecessor Rain Event, PRE),即台风主体尚在远海,但其输送的暖湿气流与日本附近的锋面结合,导致数百公里外的本州岛出现暴雨。因此,在日本,台风的预报形式重点关注锋面与台风残余水汽的复合型降水预报,而非单纯的台风本体降水。

四、当前残余环流预报面临的挑战

1. 观测工具的局限性

目前对台风残余环流的观测主要依赖多种手段协同,但各类观测方式在实际应用中都存在不同程度的局限性。卫星遥感能够提供较高空间分辨率的可见光、红外和水汽通道图像,有利于监测涡旋云系演变和宏观结构变化。但是对于云层厚密、持续阴雨的情况,光学遥感往往难以穿透,导致对底层环流结构和水汽输送等特征无法精密监测。微波遥感虽然具备一定的穿透能力,但其频次和空间分辨率均相对有限,对残余环流内部细致结构的刻画仍显粗糙。天气雷达观测、常规地面与探空观测可有效探测低空急流、回波强度和垂直液态水含量,对捕捉残余环流背景下局地强对流的发展具有重要作用。但站点分布及观测范围有限,主要集中在陆地,对海上及远距离区域的残余环流演变覆盖范围不足。此外,复杂地形还会引起雷达波束遮挡和反射异常,造成部分区域观测缺失或质量下降。

2. 残余环流降雨精准预报难度大

台风涡旋环流内结构特征、台风周围环流和天气系统影响、下垫面地形强迫作用是与台风暴雨相关的三类最主要影响因子。国内学者对历史极端台风降雨的预报性能进行了分析。在预报时效方面,由于数值预报模式积分过程中形成的误差累积,国内数值预报模式整体上随预报时效增加而减弱,误差随之增长。在落区和强度方面,数值预报模式存在低估或高估关键区降水极值,从而导致预报存在严重的空报和漏报,不利于防灾减灾。在动力因子方面,数值预报模式的台风低涡系统强度、副热带高压位置、高压坝的形成以及地形的精细刻画程度对残涡强度和位置影响较大,这在中国西南地区表现尤为显著,原因是数值预报模式采用的地形数据精度,对横断山脉复杂峡谷(如金沙江干热河谷)地形参数化表达不足,导致抬升高度系统性低估误差较大,从而导致环流降雨预报模型精度不足。在热力因子方面,当前模式在对流、云等次网

格物理过程参数化方面依然存在缺陷,随着模式积分迭代,会累积放大初始场引起的偏差,致使涡旋降水预报不准确。最后,因为残余涡旋系统变弱以及影响其移动因素相对海上更加复杂多变,特别是常常受到鞍形场影响,台风移动可预报性差。

3. 缺乏统一的残余环流再发展概率预报内容

台风残余环流长时间维持并造成严重降水影响的原因较为复杂。残余环流并非单向衰减过程,在一定条件下可能发生再增强或路径突变。当季风涌并入台风残余系统时,相当于为其构建了一条持续的水汽输送通道,源源不断地向风暴内部输送低层水汽。这一过程一方面增强了大气对流的不稳定性,另一方面显著延长了残余环流的维持时间,使其生命史明显拉长,同时伴随降水强度显著增强、雨区范围不断扩大。然而,现有业务预报体系中,尚缺少一种标准化、量化的残余环流再发展概率预报产品。目前的模式输出和产品多为单一要素或定性判断,对残余环流是否会重新增强、再生为较强系统难以给出明确的概率化评估。2025年7月,中央气象台针对台风“丹娜丝”发布残余涡旋预报试验产品,承接台风预警产品,推进完善台风全生命史预报服务。但目前仍缺乏残余环流再发展相关概率预报产品。

4. 残余环流信息表述差异加大协同应对难度

目前,尚无台风残余涡旋定义或标准及其预报业务规范,残余环流信息表述差异加大了协同应对难度。美国国家海洋和大气管理局(NOAA)在飓风“艾达”应对服务评估总结报告中指出,该风暴由热带气旋转为温带气旋的过程中,不同机构在信息表述上的不一致性显著增加了跨部门协同应对的难度,并对美国东北部地区合作机构及公众的风险认知产生了不利影响。宾夕法尼亚州虽制定了针对热带天气系统的专项应急响应预案,但并未覆盖“残余环流”这一特殊情景。这导致应急指挥与决策人员在语义理解上出现偏差,将“残余”误判为影响程度低于典型热带系统。然而,实际观测表明,飓风“艾达”残余环流在多数受影响区域造成的灾害强度甚至超过其热带低压阶段。进一步分析显示,相较于未采用“热带系统”称谓的风险通报,明确使用“热带系统”术语的预警信息通常能够触发更高等级的应急响应。此外,评估发现,多个州气象办公室在界定洪水威胁时存在术语不统一的现象。例如,同一类型的洪水示意图在不同场合分别被标注为“洪水降雨威胁”“内陆洪水影响”或“内陆洪水威胁”,这种术语差异降低了信

息传递的一致性和可操作性。当地居民反馈,当飓风“艾达”的气象预警职责由美国国家飓风中心(NHC)转移至美国天气预测中心(WPC)后,公众难以通过美国国家气象局(NWS)官方网站持续获取有关该温带气旋的后续预警产品。这一现象凸显出在气象事件性质转变过程中,信息发布链条与平台衔接机制尚存不足,进而削弱了整体防灾体系的协同效能。

五、应对策略

基于前述台风残涡致灾规律和预报业务挑战的分析,为提升此类灾害的防御能力,提出以下应对策略。

1. 优化残余环流预报机制

基于历史台风残余环流致灾情况,研究提出“台风停编后24~48 h重点监视期”,确保专班业务跟踪不中断;持续推进完善台风全生命史预报服务,研发残余环流相关概率预报产品;基于历史灾情,结合残余环流降水预报,叠加地形、地质、水系及社会经济数据,进一步研究生成村镇级的山洪、洪水及内涝风险预警精细化成果,探索研发“地形增幅降水落区叠加产品”以及“基于影响的灾害风险预估一张图”等具体风险预警产品。完善台风预报(涵盖残余环流阶段)“气象-水利-应急”多部门高度协同的叫应机制,推进预警信息快速直达一线;建立并常态化实施台风残余环流灾后评估机制,借鉴国际典型案例(如美国NOAA对飓风“艾达”应对的服务评估),系统分析气象水文条件变化、预警信息表述差异、部门协同效率、公众风险认知及响应行为等方面的表现。通过定量与定性相结合的方法,识别应急预案、信息发布、技术支撑及组织协调中的薄弱环节,形成可操作的改进建议,并将评估结果反馈至工程规划、调度运行和培训演练环节,实现防御体系的闭环优化。

2. 强化多源监测与“天空地”一体化感知

结合历史台风登陆及致灾规律,在台风残涡频发的内陆关键区、出现险情对下游洪水风险较高的“头顶库”水库密集分布区,布设相控阵雷达及微波辐射计,捕获残涡内部垂直结构演变。深度融合风云卫星云图、大尺度环境场与地面自动站等多源数据,实时精密监测残涡低压环流的移动和结构及其演变特征。

3. 加强动力学机制与关键预报技术研究

加强残涡与高原槽、西南涡等系统的相互作用,以及下垫面热力效应对残涡降水增幅的影响等研究。针对我国复杂地形,尤其是横断山脉、峡谷等特殊地形,

引入高分辨率数字高程模型 (DEM), 校准模式对地形抬升作用的响应。改进数值模式中关于残余环流降水的微物理过程及对流参数化方案, 并加强模式集合预报应用, 降低预报不确定性及误差。系统梳理我国近 30 年台风残余致灾案例, 结合地形特征分析不同区域残余环流发展演变及致灾特性, 建立历史致灾样本库, 采用机器学习算法提取致灾环流模态及特征指标, 研发针对残余环流强降水的 AI 优化算法, 实现对极端降水落区、强度和持续时间的快速预报。加快制定残余环流再发展概率预报图表和文字说明, 便于各级气象、水利等防御部门使用。

4. 完善水旱灾害防御支撑体系

持续完善水旱灾害防御工程体系, 推进防洪控制性水库建设和病险水库除险加固, 提高堤防达标率, 推进中小河流系统治理, 全面加强行蓄洪空间管控, 提升山洪灾害防御能力。提升雨水情监测预报体系现代化水平, 结合纳雨能力等指标, 提出基于残余环流降雨预报的中小水库预泄腾库阈值指标。加强数据共享, 加强洪水风险图成果及平台在风险预警方面的应用, 为精准发布山洪、城市内涝和江河洪水风险信息提供科学支撑。持续完善水旱灾害防御预案, 优化调度方案及应急响应流程。推动水旱灾害保险等市场化风险分担工具落地。

5. 增强公众防灾意识与社会韧性

向公众普及台风残余环流具有降雨强度大、持续时间长、致灾滞后性的特点, 增强公众防灾意识。常态化开展重点区域的专项避险演练, 强化多部门合作, 建立多层级联络备份体系, 并根据演练结果优化预警与处置工作流程, 进一步提升基层自救互救能力。

参考文献:

- [1] Li Lin, Chakraborty P. Reply to: Landfalling hurricane track modes and decay[J]. Nature, 2022, 606(7915): 12–15.
- [2] 陈联寿, 孟智勇, 丛春华. 台风暴雨落区研究综述[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(4): 1–7.
- [3] 马怡轩, 于翡, 徐国强. 台风“暹芭”残余环流引发中国东部暴雨的影响原因及数值模拟研究[J]. 热带气象学报, 2024, 40(5): 834–844.
- [4] 潘劲松, 周玲丽, 陆玮, 等. 两个相似路径台风残余造成局地特大暴雨的成因机制和能量收支对比分析[J]. 大气科学, 2019, 43(6): 1399–1412.
- [5] 王海平, 向纯怡. 2024 年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. 海洋气象学报, 2025, 45(3): 137–150.
- [6] 吕心艳, 向纯怡, 许映龙, 等. 台风“格美”(2403)的

主要特点和预报难点分析[J]. 海洋气象学报, 2025, 45(5): 13–23.

- [7] 刘艳婕, 王晓聪, 刘屹岷, 等. 台风“杜苏芮”(2305)残余特大暴雨的多模式预报性能比较分析[J]. 大气科学, 2025, 49(5): 1527–1540.
- [8] 向纯怡, 董林, 刘达, 等. 2023 年台风杜苏芮登陆后残余维持的热力和动力机制研究[J]. 气象, 2024, 50(11): 1289–1305.
- [9] 李峰, 吴蕾, 张林, 等. 华北“23·7”特大暴雨天气尺度系统活动特征及致雨机制[J]. 大气科学学报, 2025, 48(5): 828–842.
- [10] 陈涛, 李嘉睿, 许先煌, 等. “海葵”台风残余极端暴雨的对流组织特征及成因[J]. 大气科学学报, 2025, 48(1): 77–92.
- [11] 王海平, 张玲, 董林, 等. 台风海葵(2311)的预报难点及模式性能[J]. 气象, 2024, 50(11): 1331–1342.
- [12] Menemenlis S, Vecchi G A, Gao Kun, et al. Extreme Rainfall Risk in Hurricane Ida's Extratropical Stage: An Analysis with Convection-Permitting Ensemble Hindcasts[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2024, 81(7): 1165–1178.
- [13] GB/T 19201—2006 热带气旋等级[S].
- [14] 中国气象局. 台风业务和服务规定(第四次修订版)[M]. 北京: 气象出版社, 2012.
- [15] INTERAGENCY COUNCIL FOR ADVANCING METEOROLOGICAL SERVICES. National Hurricane Operations Plan: FCM-P12-2026[R]. 2026.
- [16] Kitabatake N, Fujibe F. Relationship between Surface Wind Fields and Three-Dimensional Structures of Tropical Cyclones Landfalling in the Main Islands of Japan[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2009, 87(6): 959–982.
- [17] Kodama S, Satoh M. Statistical Analysis of Remote Precipitation in Japan Caused by Typhoons in September[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2022, 100(6): 893–911.
- [18] 罗亚丽, 孙继松, 李英, 等. 中国暴雨的科学和预报: 改革开放 40 年研究成果[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 419–450.
- [19] 端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 等. 台风登陆前后异常变化的研究进展[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 969–986.

责任编辑 杨文杰