

王海平,吕心艳,王靖,2025. 2024 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象,51(12):1608-1620. Wang H P, Lyu X Y, Wang Q, 2025. Analysis on the characteristics and forecast difficulties of Typhoons in the Northwest Pacific in 2024[J]. Meteor Mon, 51(12):1608-1620(in Chinese).

2024 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析^{*}

王海平 吕心艳 王 靖

国家气象中心,北京 100081

提 要: 利用 1949—2024 年中国气象局台风最佳路径资料、2024 年中央气象台台风路径和强度实时业务资料、欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料等,对 2024 年西北太平洋和南海台风活动的主要特征进行分析。结果表明:2024 年台风生成数和生命史平均极值强度均接近气候平均,生成源地偏北、偏西;登陆个数偏多,强度偏强,登陆地段集中;秋季台风活跃;台风深入内陆,造成大范围强降水。中央气象台主观路径预报整体上优于日本和美国;台风强度预报误差大于日本,但小于美国。业务预报中的重要难点问题包括:由于模式对台风登陆后的复杂结构变化及其所受的引导气流影响难以把握,导致路径预报产生较大误差,对此类过程的订正较为困难;台风残涡的陆上维持预报及其降水影响的预报;台风“摩羯”的快速增强及超强台风长时间维持预报等。

关键词: 台风,活动特征,预报难点,残涡,快速增强

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.060602

Analysis on the Characteristics and Forecast Difficulties of Typhoons in the Northwest Pacific in 2024

WANG Haiping LYU Xinyan WANG Qian

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Utilizing the best track data of tropical cyclones from China Meteorological Administration (CMA) in 1949—2024, observed data of typhoon track and intensity from National Meteorological Centre (NMC) in 2024, and ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), this paper analyzes the main characteristics of typhoon activities over the Northwest Pacific and South China Sea in 2024. The results indicate that the number of generated typhoons and average maximum intensity in typhoon lifespan approximated climatological mean, with their average birth locations by north and by west. The landfall typhoon count surpassed the climatological mean with enhanced intensity and concentrated impact areas. The autumn typhoon activities significantly exceeded climatological mean. Notable inland movement of the typhoons caused extensive heavy precipitation processes. The NMC demonstrated superior track forecasting capability compared to the Japan Meteorological Agency (JMA) and the U. S. Joint Typhoon Warning Center (JTWC), while the typhoon intensity prediction errors by NMC exceeded that of JMA but was lower than that of JTWC. Key challenging issues in the operational forecasting include that, firstly, significant track forecast errors arose from numerical models' limited capability in catching the complex structural evolution of typhoons after their landfall and their interactions with steering flows, which makes the correction to such processes highly challenging. Then, forecasting

^{*} 国家气象中心总结专项(FPZJ2025-161)和国家重点研发计划(2023YFC3107902)共同资助

2025 年 4 月 1 日收稿; 2025 年 9 月 22 日收修定稿

第一作者:王海平,主要从事台风与海洋气象预报研究. E-mail: wanghp@cma.gov.cn

the persistence of typhoon remnant vortices over land and their associated precipitation impacts is the second challenging issue, and the third difficulty is predicting the rapid intensification (RI) of Typhoon Yagi and the prolonged maintenance of super typhoon.

Key words: typhoon, activity characteristic, forecast challenge, remnant vortex, rapid intensification

引 言

热带气旋(tropical cyclone, TC)活动严重影响海上、沿海及部分内陆地区的作业与人们的生产生活,其变化规律和预报质量的科学研究对于提升预测预警和防灾减灾能力具有重要意义。近年来,受气候变化影响,极端天气事件频发,西北太平洋台风(热带风暴级及以上的 TC)活动的异常事件多发,给业务预报带来极大困难。气候变化会如何影响 TC 的生成、移动路径、强度以及风雨情况等是科学家面临的重要问题与挑战,需要不断总结预报中遇到的难点问题,分析和研究在变化的气候背景下台风活动的规律和影响机制、台风监测和预报技术(雷小途,2021;潘佳文等,2025)。Knutson and Tuleya (2004)认为气候变化会使得低层大气的比湿和对流有效位能增加,导致更为强烈的 TC,从而产生更强的风雨影响。地球系统模式成为研究 TC 气候变化的重要工具(吴启蒙等,2022)。Wu and Wang (2004)利用 GFDL 气候模式资料评估了气候变化对台风路径的影响,认为台风移动路径主要是由大尺度环境引导气流及台风的生成位置所决定,引导气流在 2030—2059 年期间可能表现为热带地区偏东气流异常和中纬度偏西气流异常,伴随向北分量增强。

中央气象台对多年台风预报业务的难点问题进行了总结后发现,数值预报模式对于较长时效的路径预报误差是明显减小的。同时,近年来随着对人工智能(AI)模型的开发与应用(Bi et al, 2022; Chen et al, 2023)、多源观测资料的应用(赵兵科等, 2022)、客观定量产品的研发(钱奇峰等, 2021)等新技术和新产品的利用也是进一步提高台风预报准确率的重要手段,但确定性预报误差及集合预报的发散度在通常情况下仍随预报时效的延长而增大(吕心艳等, 2021; 王海平等, 2021; 周冠博等, 2022; 向纯怡等, 2022)。当模式预报分歧和集合成员的发散度都偏大时,业务预报仍面临订正困难(王海平等, 2021),此时模式对影响台风的大尺度环流引导系

统,如副热带高压(以下简称副高)的预报(刘菲菲等, 2024)性能极为重要。此外,多台风相互作用对路径和强度的影响(吕心艳等, 2021)、近海台风的快速增强(钱奇峰等, 2023)、大尺度环流调整造成的不确定性增加(向纯怡等, 2022)、登陆台风的移动路径和强度维持(周冠博等, 2022)、登陆台风的残涡维持及降水影响(聂高臻等, 2025)等方面的研究工作取得了一定程度的进展,但仍是困扰业务预报的难点,需要开展更加深入的研究。其中台风残涡及其降水影响的预报在近几年来也备受瞩目,残涡的维持受多种因素共同影响。陆地与海洋上空残涡的增强或维持的共同有利条件包括:充沛的水汽输送、稳定的大尺度环流背景以及弱垂直风切变和辐散辐合配置等,此外,陆地上的台风在有利的下垫面(高温、高湿)条件下也能够得到维持。冷空气的卷入与斜压能量转换在特定情况下也有利于残涡的维持并显著增强降水强度(赵培娟等, 2019)。2023 年台风“杜苏芮”残涡因高压坝的形成而在华北地区停滞,同时有利的水汽输送和下垫面环境使得残涡长时间维持,导致了极端强降水(向纯怡等, 2024)。2018 年台风“安比”登陆后因高空急流的辐散作用和较小的垂直风切变使得其暖心结构得以维持(郭蕊等, 2019)。2023 年台风“海葵”残涡通过季风将大量水汽汇聚到登陆区域,形成极端降水(王海平等, 2024)。数值模式在对流、云等物理过程参数化方面的不足,是其产生预报偏差的主要原因(刘艳婕等, 2024)。

本文通过对 2024 年西北太平洋和南海台风活动特征的统计分析,了解台风变化趋势,分析和讨论在业务预报中面临的主要困难,以期未来能够针对所提出的问题开展更加深入的科学研究工作,从而持续推进台风预报质量的提高。所用研究资料包括中国气象局(CMA)提供的 1949—2024 年台风最佳路径资料,中央气象台、日本气象厅(JMA)和美国联合台风预警中心(JTWC)提供的官方实时业务主观分析和预报资料,以及欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的确定性预报产品。

全文基于审图号 GS(2019)3082 号的标准地图

制作,底图无修改;所用时间为北京时。

1 2024 年西北太平洋和南海台风活动特征

1.1 台风生成特征

1.1.1 生成数量特征

2024 年,西北太平洋和南海共有 26 个台风生成(图 1),与多年(1949—2023 年,下同)平均(26.7 个)相比偏少 0.7 个,较气候平均(1991—2020 年,下同)(25.1 个)偏多 0.9 个。

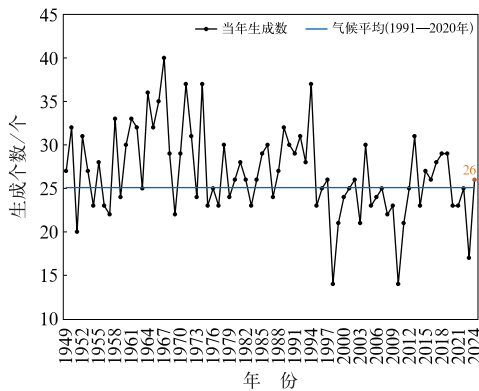


图 1 1949—2024 年西北太平洋和南海台风逐年生成个数

Fig. 1 Annual numbers of typhoons generated in the Northwest Pacific and South China Sea in 1949—2024

2024 年上半年(1—6 月)仅 5 月有 2 个台风生成,其余月份无台风生成,生成总数较气候平均值(3.9 个)偏少。下半年(7—12 月)生成 24 个台风,生成总数较气候平均值(21.1 个)偏多,尤其是 9 月和 11 月,分别较气候平均值偏多 3 个和 1.8 个(图 2)。

1.1.2 生成源地特征

全年 26 个台风的平均生成位置(18.8°N 、 134.3°E)较多年平均(16.2°N 、 136.8°E)偏北约 2.6° ,偏西约 2.5° (图 3a)。其中,仅有 4 个台风(“马力斯”“苏力”“派比安”“帕布”)在南海生成(图 3b),南海生成台风数较多年平均(4.5 个)偏少 0.5 个;未生成从中太平洋移入西北太平洋的台风。

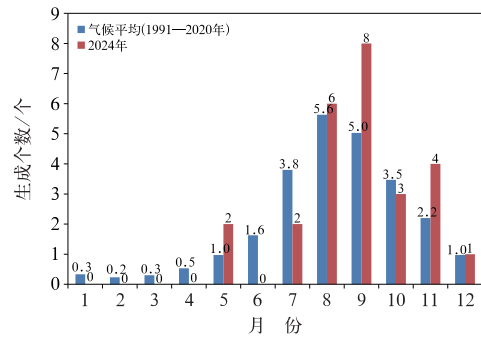
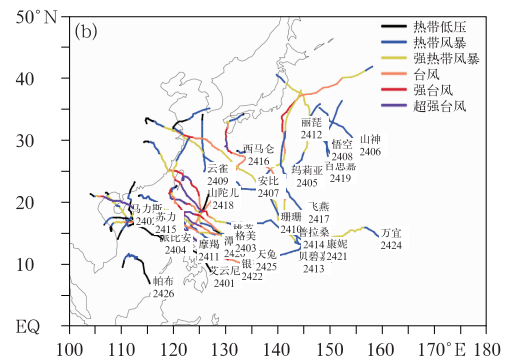
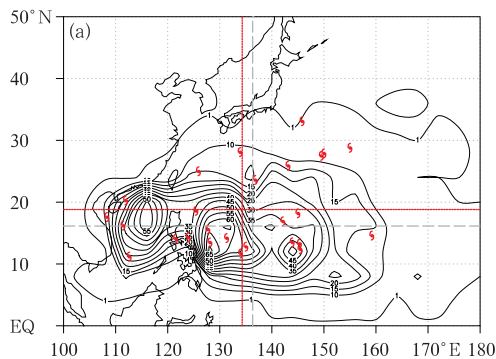


图 2 气候平均与 2024 年的逐月台风生成个数

Fig. 2 Monthly averaged numbers of typhoons generated in 2024 and the climatological mean



注:图 a 为每 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 空间范围内台风生成个数,台风符号为 2024 年台风生成位置,红色实线和灰色虚线垂直相交位置分别为 2024 年平均和多年平均(1949—2023 年)的台风生成位置。

图 3 西北太平洋和南海(a)1949—2023 年台风生成源地密度分布(等值线)和(b)2024 年台风路径

Fig. 3 (a) Density distribution (contour) of typhoon generation areas in 1949—2023 and (b) tracks of typhoons generated in 2024 over the Northwest Pacific and South China Sea

1.2 台风活动特征

1.2.1 强度特征

2024 年共有 8 个超强台风活动(气候平均值为 4.6 个),占全年台风个数的 30.8%(气候平均占比为 18.3%)。2024 年超强台风个数和个数占比均明显偏多,与 2023 年情况相似(聂高臻等,2025)。达到台风级及以上的台风个数共有 13 个,比气候平均(14.6 个)略偏少,所占比例(50%)略低于气候平均(58.2%)。全年台风的平均生命史极值强度为 $36.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (12 级),较多年平均值 $39.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (13 级)偏弱,与气候平均值 $37.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (13 级)基本持平。

按照 24 h 台风最大风速增加达到 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 即可认定为台风快速增强(Bhatia et al,2018)的标准,

2024 年共有 8 个台风在其生命史中经历过快速增强,分别为“艾云尼”“格美”“摩羯”“山陀儿”“康妮”“银杏”“万宜”“天兔”(表 1)。8 个快速增强台风中有 7 个达到超强台风级,占 2024 年超强台风总数的 87.5%,即 2024 年绝大多数的超强台风都经历了快速增强过程。24 h 强度增幅最大的台风是“康妮”,增幅为 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。快速增强维持总时长最长的是“万宜”和“天兔”,维持时长均为 54 h。从快速增强发生的位置来看,除“摩羯”的快速增强发生在南海北部以外,其余过程发生在菲律宾以东和琉球群岛以东洋面。从发生时间来看,“艾云尼”和“格美”的快速增强分别发生在 5 月和 7 月,其余过程均发生在 9—11 月,可见 2024 年的快速增强过程主要发生在秋季。

表 1 2024 年西北太平洋及南海出现的台风快速增强事件

Table 1 Rapid intensification events of typhoons in the Northwest Pacific and South China Sea in 2024				
编号	台风名称	最大 24 h 强度增幅/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	时段(BT)	持续时长/h
2401	艾云尼	20	5 月 26 日 11:00 至 27 日 11:00	24
2403	格美	18	7 月 23 日 14:00 至 24 日 14:00	24
2411	摩羯	23	9 月 3 日 14:00 至 5 日 14:00	48
2418	山陀儿	22	9 月 28 日 11:00 至 30 日 14:00	51
2421	康妮	25	10 月 28 日 20:00 至 30 日 14:00	42
2422	银杏	22	11 月 6 日 08:00 至 7 日 14:00	30
2424	万宜	20	11 月 14 日 08:00 至 16 日 14:00	54
2425	天兔	23	11 月 12 日 08:00 至 14 日 14:00	54

1.2.2 台风生命史和活跃程度

2024 年台风的累积活动时长为 2787 h,虽然全年的台风生成个数与多年平均基本持平,但台风的累积活动时长较多年平均(4001 h)明显偏短(图 4a)。台风累积动能(accumulated cyclone energy, ACE)为

$190.18\times 10^4\text{ kn}^2$ ($1\text{ kn}=1.852\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$),较多年平均 ACE($278.81\times 10^4\text{ kn}^2$)偏低约 32%(图 4b)。可见,虽然 2024 年的台风个数与气候平均值基本持平,且超强台风的个数和占比明显高于气候平均值,但整体活跃程度仍明显偏弱。

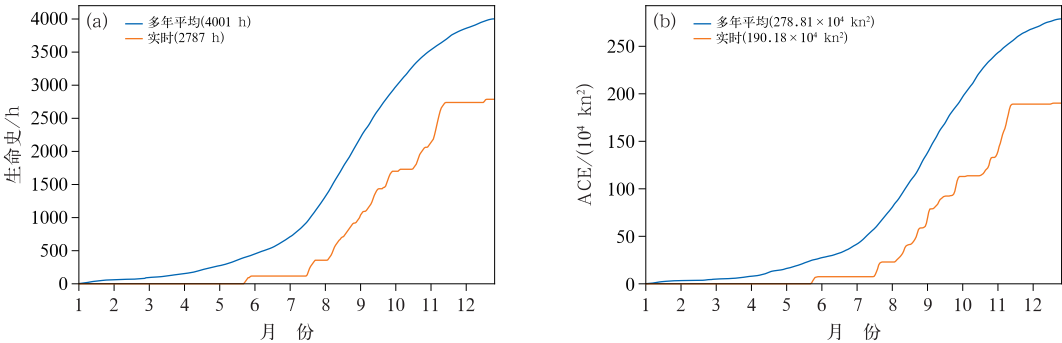


图 4 1949—2023 年与 2024 年台风(a)累积活跃时长和(b)年累积动能
Fig. 4 (a) Accumulated active duration and (b) annually accumulated cyclone energy of typhoons in 1949—2023 and in 2024

1.3 台风登陆特征

2024 年共有 8 个台风登陆我国(登陆时中心附近最大风速达到或超过 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 其中 2402 号“马力斯”和 2414 号“普拉桑”登陆强度为热带风暴级、2404 号“派比安”登陆强度为强热带风暴级, 2418 号“山陀儿”登陆强度为台风级, 2403 号“格美”两次登陆强度分别为强台风级和台风级, 2413 号“贝碧嘉”和 2421 号“康妮”登陆强度为强台风级, 2411 号“摩羯”登陆强度为超强台风级(图 5)。

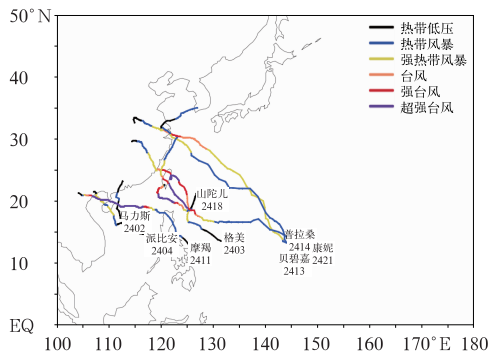


图 5 2024 年登陆我国的台风路径
Fig. 5 Tracks of typhoons making landfall in China in 2024

1.3.1 登陆台风偏多偏强

2024 年全年登陆台风个数较气候平均(7.2 个)偏多 0.8 个。夏季仅有 3 个台风登陆, 登陆个数较气候平均(4.7 个)偏少 2.7 个(图 6)。继 2023 年 8 月无台风登陆后, 2024 年 8 月仍无台风登陆, 为 1949 年以来第 8 个无台风登陆的 8 月(1949 年、1950 年、1977 年、1983 年、2010 年、2014 年、2023 年)。秋季有 5 个台风登陆, 较气候平均(2.3 个)异

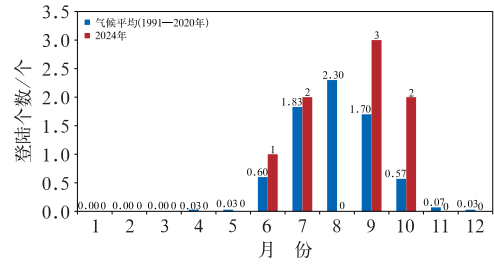


图 6 气候平均与 2024 年的逐月台风登陆个数
Fig. 6 Monthly averaged numbers of typhoons making landfall in China in 2024 and in the climatological mean

常偏多 3.7 个。登陆台风的平均初次登陆强度为 $38.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (13 级), 较气候平均值 $32.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (11 级) 偏强 $5.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.3.2 登陆地段集中

从登陆地段来看, 2024 年 8 个登陆台风先后共计 9 次登陆我国沿海(不含热带低压登陆), 登陆地点集中于华东和华南地区。其中登陆台湾次数最多, 达到 3 次。另外, 登陆海南、上海各 2 次, 广东、福建各 1 次(图 5)。

2 2024 年台风预报误差分析

2.1 路径预报误差

以中央气象台业务定位数据作为台风实际位置, 对 2024 年中央气象台的台风路径预报误差进行检验, 结果表明, 2024 年中央气象台对西北太平洋及南海生成的 26 个台风的 24、48、72、96、120 h 各时效主观路径预报误差分别为 67、105、154、254、403 km(图 7a), 与过去 5 年(2020—2024 年)各时效

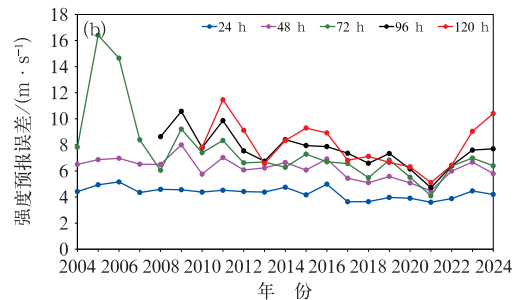
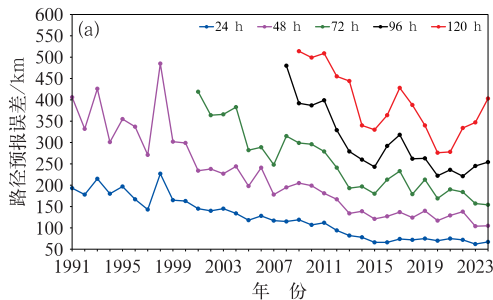


图 7 中央气象台逐年台风平均(a)1991—2024 年路径和(b)2004—2024 年强度预报误差
Fig. 7 The average (a) track forecast error in 1991—2024 and (b) intensity forecast error in 2004—2024 of typhoons by National Meteorological Centre

的平均误差(69、119、171、236、328 km)相比,24、48、72 h 误差分别减小了 2.9%、11.8%和 9.9%;96 h、120 h 误差则分别增加了 7.6%、22.9%。此外,中央气象台路径预报整体上优于日本气象厅(24~120 h 误差分别为 75、106、151、238、414 km)和美国联合台风预警中心(24~120 h 误差分别为 72、110、175、277、431 km)。可见各国的官方主观综合路径预报均对较长时效(120 h)的预报误差较过去 5 年平均出现了明显的增大,主要原因是均对在琉球群岛附近北上登陆日本的“珊珊”路径预报较实况明显偏东和偏快,造成中、日、美官方主观 120 h 预报平均误差都达到了 1000 km 左右。

2.2 强度预报误差

2024 年中央气象台 24、48、72、96、120 h 各时效主观强度预报误差分别为 4.2、5.8、6.4、7.7、10.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7b),与过去 5 年(2020—2024 年)各时效的平均误差(4.0、5.6、5.9、6.5、7.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)相比,强度预报误差分别上升了 5.0%、3.6%、8.5%、18.5%和 38.7%。与同类主观预报相比,中央气象台强度预报差于日本气象厅(24~120 h 强度误差分别为 3.3、4.3、5.2、6.2、8.1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),优于美国联合台风预警中心(24~120 h 强度误差分别为 5.0、6.3、7.0、8.4、10.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。强度预报误差增大的主要原因是对“摩羯”等快速增强的超强台风估计不足,以及对“潭美”西行移入南海的强度估计偏强。

3 2024 年台风预报难点分析

2024 年对我国有较大风雨影响的台风众多。“格美”登陆台湾岛前快速增强,深入内陆后维持时间长,受台风本体及外围远距离降水影响,福建、浙江、广东、湖南、江西、台湾以及辽宁、吉林等地发生大范围、长时间的大暴雨或特大暴雨。“摩羯”先后在菲律宾、中国海南和越南沿海 3 次登陆,其中 2 次登陆强度为超强台风级,是有气象记录以来秋季登陆我国的最强台风($62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),也是北部湾海面活动的最强台风,同时也是登陆越南的最强台风,海南及两广地区出现严重强风雨天气。“贝碧嘉”和“普拉桑”相隔 3 d 先后在上海登陆,造成叠加风雨影响。其中“贝碧嘉”是 1949 年以来登陆上海的最强台风。此外,“山陀儿”和“天兔”在靠近台湾岛前发

生路径北折,“潭美”虽未直接登陆我国沿海,但由于其残涡长时间徘徊,对海南的降水影响甚至超过了超强台风“摩羯”。在对以上台风的预报过程中均出现了不同程度的预报难点,以下选取部分个例展开具体分析。

3.1 台风登陆后的路径预报分歧

台风暴雨的落区预报与登陆后移动路径的预报质量密切相关,路径预报如果偏差大,会使暴雨预报落区出现相应偏差,因此应当特别关注。“格美”穿过台湾海峡后于 7 月 25 日 19:55 前后在福建沿海登陆并折向西北方向移动,穿过福建、江西,进入湖北境内,强度逐渐减弱,27 日 20:00 减弱为热带低压,中央气象台于 28 日 08:00 对其停止编号。28—29 日,台风残涡仍在湖南境内维持滞留。

由于模式不确定性较大,多数主观综合预报、主流数值模式以及集合预报的多数成员均在“格美”生成初期对其登陆位置及登陆后的路径预报较实况偏北且偏快,预报将影响我国北方地区,从而造成了较大的路径预报误差。其中 ECMWF 的确定性路径预报最为偏东,误差也最大。一些 AI 模型的预报与实况较为接近,其中 AIFS、风乌的预报效果最佳。中央气象台主观综合的 24 h 路径预报最大误差高达 350 km,远高于中央气象台 2024 年 24 h 路径预报平均误差。

分析造成较大误差的主要原因是数值模式对台风北侧的副高脊点的位置预报出现较大偏差。从 ECMWF 确定性模式在 7 月 20 日 20:00 起报的 500 hPa 位势高度场和 850 hPa 风场的 72 h 预报(图 8a、8b)来看,模式预报的“格美”位于副高西南侧,588 dagpm 线西伸至了河南、江西境内,而从所对应的 23 日 20:00 的实况可见,副高西脊点仅西伸至华东沿海的江苏境内。这一时刻的 72 h 预报虽然对“格美”的位置预报较实况位置偏东,但西脊点的预报较其实际位置并未偏东,而是更加偏西。一般情况下,按照预报的形势场判断,“格美”的移动应该有较明显的向西分量,但预报却是继续向偏北方向移动,较实际移动位置明显偏东。从 20 日 20:00 起报的 96 h 预报(图 8c、8d)来看,“格美”北侧的高压脊出现明显的东退,但对比对应时刻的模式初始场,模式对高压脊的东退预报偏快,这也是导致模式对于台风引导气流的预报较实况明显偏东,路径预报较实况偏北的主要原因。

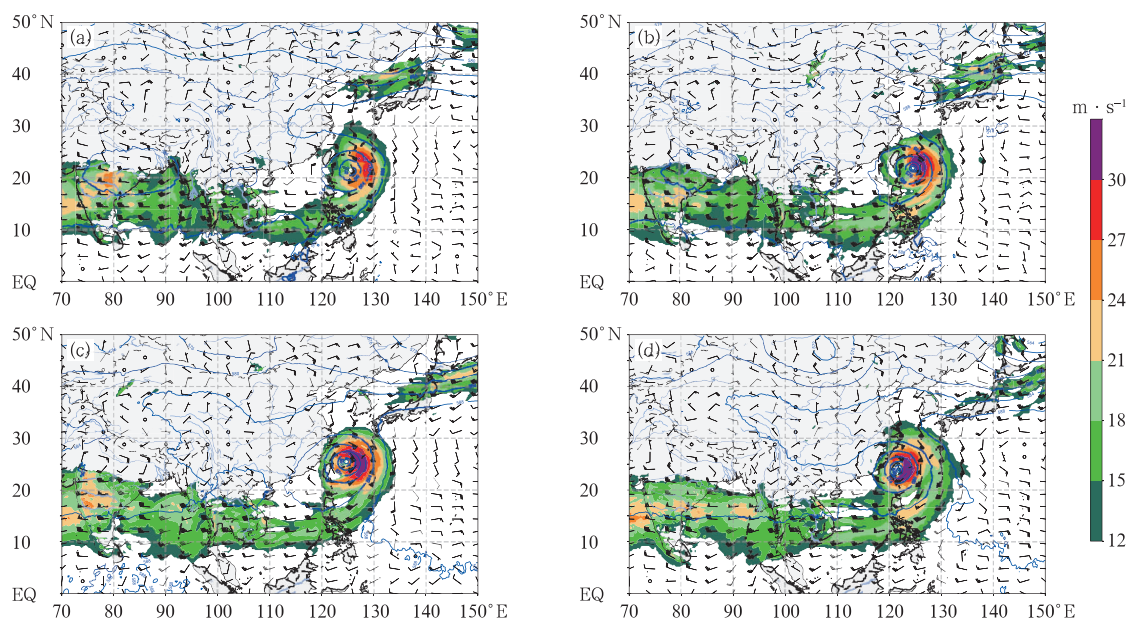


图 8 2024 年 7 月 20 日 20:00 ECMWF 起报的(a,b)72 h 与(c,d)96 h 预报时效的
500 hPa 位势高度(等值线,单位: dagpm)和 850 hPa 风场(填色和风羽)
(a,c)预报, (b,d)模式初始场

Fig. 8 (a, b) The 72 h and (c, d) 96 h forecasts of 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm)
and 850 hPa wind (colored and barb) by ECMWF initiated at 20:00 BT 20 July 2024
(a, c) forecast, (b, d) model initial field

此外,从 7 月 22 日 20:00 的卫星云图和 850 hPa 风场及 500 hPa 位势高度场(图略)上可以看到,“格美”与其西侧的“派比安”距离较近。双台风的相互作用以及与大尺度环流之间相互影响会导致其路径、结构、强度的突变,使得预报更加困难(韩峰等, 2019)。数值模式在对“格美”路径的预报过程中,出现了路径预报在实况路径左侧或右侧来回摆动调整的情况,预报误差偏大(图略)。集合预报发散度也较大(图略),不同模式的预报分歧显著,特别是在大尺度环流场的调整阶段,集合预报对副高西脊点的预报存在较大的发散度。

从 ECMWF 确定性模式在 7 月 23 日 20:00 的 500 hPa 位势高度场 96 h 预报(图 9a)与对应时刻(27 日 20:00)的模式初始场(图 9b)对比来看,模式预报的副高与实况接近,“格美”都是位于东西向的带状副高内,即预报“格美”移向偏北方向并非是由于副高的预报偏弱。由图 9 可见,在 500 hPa 预报场中,“格美”向北穿过副高,实况中“格美”变形为南北向的狭长倒槽,一方面是由于受到“格美”东侧较强的偏南气流破坏,另一方面是受到台风西侧大别山脉地形的影响,数值模式未能很好地反映以上影响,从而造成较大误差。

由 850 hPa 位势高度场上可见(图略),23 日 20:00 的 96 h 预报“格美”位于块状副高西侧,受偏南气流引导向偏北方向移动。由于此时“格美”强度减弱,对流伸展高度较低,其移动主要受低层引导气流的作用而移向偏北方向。从对应时刻的实况可见,模式对 850 hPa 副高强度和位置的预报与实况是较为接近的,不同的是对“格美”后期结构变化的预报存在明显差异。从 850 hPa 的风场预报(图 9a)来看,“格美”保持较为完整的螺旋结构向偏北方向移动,而从模式初始场(图 9b)来看,“格美”变形为南北向倒槽后,其南侧仍存在一个残涡环流,该环流在湖南滞留。由于模式对“格美”结构、移动路径的预报偏差,使得暴雨预报也出现了较大偏差。

由上可见,在“格美”生成初期数值模式对副高变化的预报质量是影响台风路径预报的重要因素,模式对副高等台风关键影响系统变化趋势的预报,是业务预报面临的难点之一。模式预报“格美”登陆后向偏北方向移动,出现较大误差的主要原因并不是预报环流形势场出现较大偏差,而可能是对登陆后的结构难以把握。因此,在业务预报中关注台风结构(包括垂直伸展高度、受地形影响的结构变化等)的影响及其与路径的相互关系,研究模式路径预

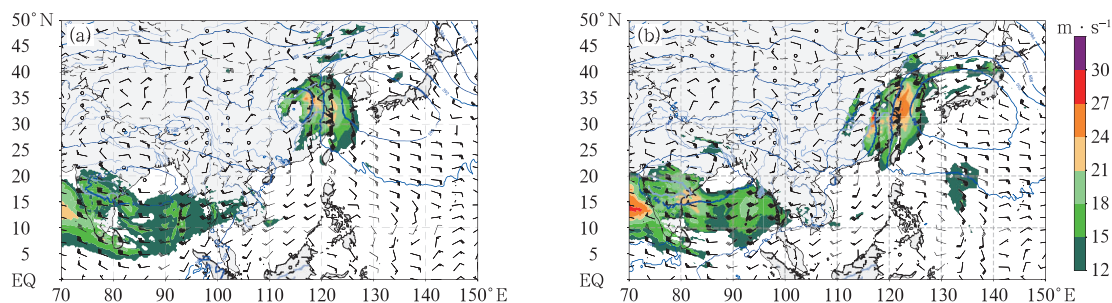


图 9 2024 年 7 月 (a) 23 日 20:00 ECMWF 起报的 96 h 时效预报, (b) 27 日 20:00 模式

初始场的 500 hPa 位势高度(等值线, 单位: dagpm)和 850 hPa 风场(填色和风羽)

Fig. 9 (a) The 96 h forecast initiated at 20:00 BT 23 July and (b) model initial field at 20:00 BT 27 July 2024 of 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and 850 hPa wind (colored and barb) by ECMWF

报订正方法尤为重要。

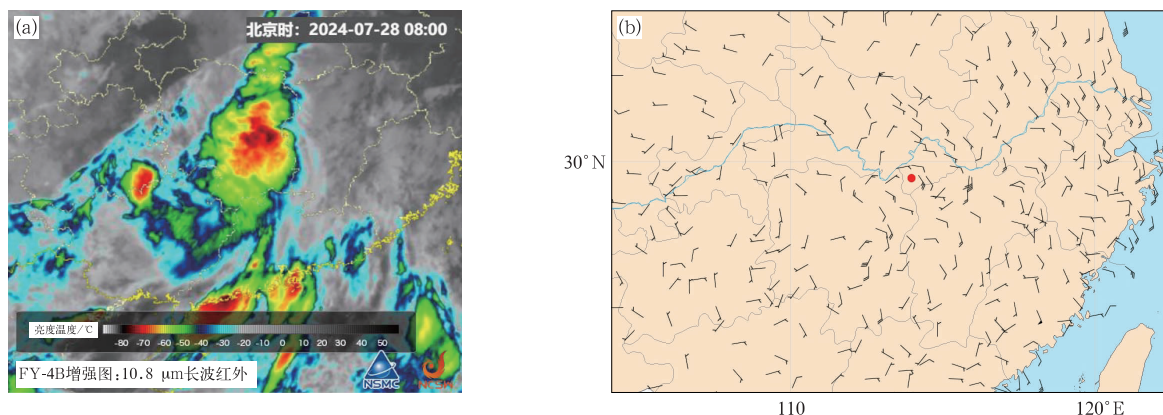
3.2 台风残涡陆上维持及其降水预报

台风减弱为残涡后, 虽然风力的影响减小, 但弱环流长时间维持所带来的水汽输送仍会引发强降水过程。例如 2023 年“海葵”(王海平等, 2024)、“杜苏芮”(向纯怡等, 2024), 2024 年“格美”“贝碧嘉”“潭美”等均是在停止编号后仍引起极端强降水过程。数值模式对此类过程的预报往往偏差较大, 特别是较长时效的预报效果不理想。“格美”登陆福建秀屿后, 深入内陆, 强度减弱为热带低压, 7 月 28 日 08:00 在湖北境内停止编号, 此后其残涡西折进入湖南并长时间滞留, 导致湖南郴州和株洲等地出现了极端强降水(24—28 日), 过程降水量达 400~875 mm, 湖南多个国家级气象观测站日降水量突破历史极值。尤其是在“格美”停止编号后的 28 日白天至夜间, 湖南中部仍出现了大范围大到暴雨、局地大暴雨。从停编时刻(28 日)的红外云图(图 10a)可以看到, 在残涡中心的南侧和西侧仍有强烈的对流云团活动, 地面 10 m 风场(图 10b)显示, 虽然弱的环流系统仍然维持, 但其中心已并不清晰。“格美”减弱后的残涡南侧西南季风显著增强(图略), 为残涡的维持和降水的产生带来了不稳定能量和水汽供应, 同时残涡和季风槽的存在又为降水的产生提供了有利的动力条件(卢珊等, 2012), 是降水增强的重要原因。数值模式预报的 28 日 08:00 “格美”停止编号后的残涡位置存在较为明显的偏差。从 ECMWF 确定性模式 28 日 20:00 初始场(图 11a)与 26 日 08:00 起报的 60 h 预报时效(图 11b)的 850 hPa

流场和风速对比来看, 模式预报的残涡位置在河南境内, 而实际位于湖北南部至湖北北部一带。

7 月 28 日 08:00 至 29 日 08:00 的累计降水量实况(图 12a)显示, “格美”残涡造成湖南中北部出现大范围暴雨和大暴雨, 部分地区出现特大暴雨。而对比 26 日 08:00 模式起报的 28 日 08:00 至 29 日 08:00 的累计降水量(图 12b), 降水主要落区位于河南东部至湖北东部一带, 基本对应了“格美”残涡的预报位置, 预报的降水量级主要为大雨到暴雨、局地大暴雨; 而湖南预报中部和东北部中雨、局地大到暴雨。模式对降水落区的预报范围较实况明显偏小, 量级也较实况严重偏弱。也就是说, 模式在极端降水出现前 2 d 仍对降水落区和量级的把握都产生了非常明显的偏差。后期随着预报时效的临近, 模式对残涡位置和降水预报逐渐调整, 直至 28 日 08:00, 未来 24 h 的预报降水量与实况较为接近(图略)。

近年来, 由台风残涡导致的极端降水事件频发。从上述分析以及以往残涡预报分析结果来看, 仍常常存在较明显的预报偏差, 这也是业务预报的难点问题之一。因此在业务与科研工作中, 除了关注热带低压及其以上强度的 TC 预报外, 还应关注减弱后残涡系统的移动和结构变化, 开展相应的研究和预报检验, 从而提高预报质量。此外, 尽管“格美”残涡长时间维持、移动缓慢, 且有西南季风提供充沛水汽, 这些都是其产生极端降水的重要原因, 但是这些条件并不能充分解释此次过程降水的极端性。如何在面临此类事件时提高预报能力, 是业务中的关键问题和难题。



注:红色圆点表示残涡估计中心。

图 10 2024 年 7 月 28 日 08:00 台风“格美”残涡的(a)FY-4B 红外云图,(b)10 m 风场

Fig. 10 (a) FY-4B infrared image and (b) 10 m wind field of Typhoon Gaemi remnant vortex at 08:00 BT 28 July 2024

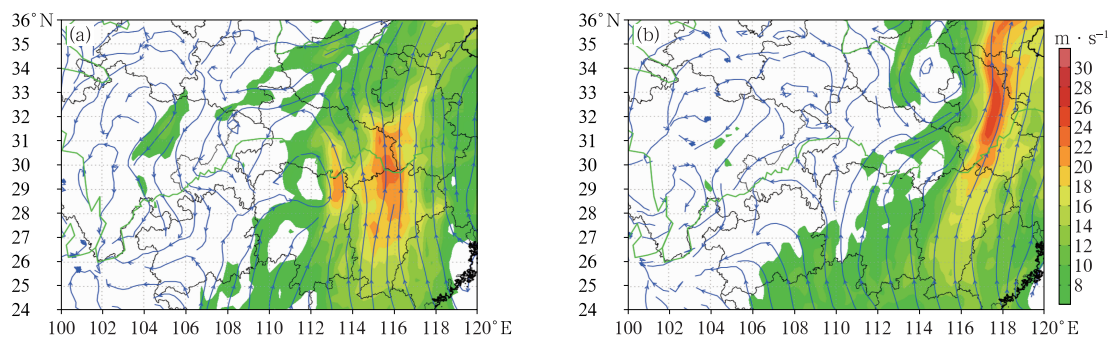
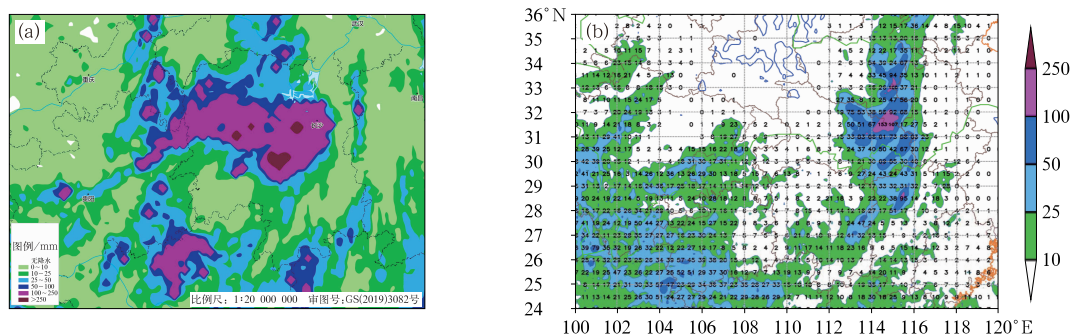


图 11 2024 年 7 月 ECMWF(a)28 日 20:00 模式初始场与(b)26 日 08:00 起报的 60 h 预报时效的 850 hPa 流场(流线)和风速(填色)

Fig. 11 The 850 hPa flow field (streamline) and wind speed (colored) of (a) model initial field at 20:00 BT 28 July and (b) 60 h forecast by ECMWF initiated at 08:00 BT 26 July 2024



注:图 b 中数字和填色为降水量,单位:mm。

图 12 2024 年 7 月 28 日 08:00 至 29 日 08:00(a)实况和(b)26 日 08:00 ECMWF 起报的累计降水量

Fig. 12 (a) The observed and (b) forecast by ECMWF initiated at 08:00 BT 26 July of accumulated precipitation from 08:00 BT 28 to 08:00 BT 29 July 2024

3.3 台风“摩羯”快速增强及超强台风长时间维持预报

台风的快速增强一直是科研和业务中的主要难点之一, AI 目前对于强度预报质量仍明显较数值模式偏差更大。近年来, 中央气象台开发了台风快速增强的概率预报产品(渠鸿宇等, 2024)和基于数值预报的强度订正方法(胡海川和董林, 2023), 很大程度上给了预报员一定的提示。2024 年第 11 号台风“摩羯”于 9 月 1 日在菲律宾以东洋面生成, 之后向北偏西方向移动, 于 4 日进入南海后转向偏西方向移动, 强度快速增强至超强台风级, 3 日 14:00 至 5 日 14:00“摩羯”持续快速增强, 24 h 最大强度增加值为 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。“摩羯”维持超强台风级 64 h, 强度极值达 $62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

分析“摩羯”强度发展条件, 有利的环境条件包括: 台风高层出流清晰, 强度较强, 有利于次级环流的形成和增强(金茹等, 2024); 中层的环境风垂直切变较小, 有利于暖心结构的维持和发展; 低层的西南季风携带充沛的水汽卷入台风核心区域, 提供了持续的能量来源(图 13a); 下垫面海面温度较气候平均明显偏高(图 13b)。从“摩羯”本体的结构变化可见, 其下风方向切变左侧对流发展, 有利于对流爆发(马艺铭等, 2023); 最大风速半径快速收缩(图略), 有利于气旋强度快速增强; “摩羯”的对流层高层暖心结构明显(图略), 眼区温度快速降低; 双眼墙替换过程清晰, 伴随着快速增强过程(图略)。

各家主客观预报对“摩羯”强度发展的估计都明显偏弱(图略)。中央气象台在业务预报中关注到了台风快速增强的有利因素, 以及快速增强过程中所

伴随的最大风速半径快速收缩和眼墙替换过程, 较好地预报了“摩羯”的增强过程。例如, 在 9 月 3 日 14:00 预报未来 24 h 台风强度由 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增强至 $33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 但实况 4 日 14:00 已经达到 $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 估计仍明显不足。随后, 配合影响因素分析、相似个例对比及模式订正, 中央气象台主观综合预报对“摩羯”强度发展的速率和极值强度都进行了逐步调整。4 日 14:00 预报未来 24 h 强度将由 $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增强至 $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 实况为 5 日 14:00 强度达到 $58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 可见此时主观预报对强度的估计已基本与实况吻合。

“摩羯”强度预报的难点在于对快速增强速度和增幅的预报是否能够进一步改进。高拴柱和吕心艳(2023)研究表明, 在台风强度突变过程中, 常规的环境影响因子并未出现明显的突变。例如水汽通过降水凝结潜热释放等间接影响台风强度, 但一般季风背景下台风的水汽供应都较为充足, 海温条件一般也能得到满足。此外, 在较强环境风垂直切变下也有可能发生快速增强过程(吕心艳等, 2023)。因此, 在日常业务预报工作中难以找到导致强度发生突变的关键因子, 通过关键因子判断台风是一般增强还是快速增强, 今后仍需探索更多影响因素, 包括关注台风的惯性稳定度、潜热等相关指标变化, 环境因子的协同作用或综合影响指数等。

此外, “摩羯”不仅经历了强烈的快速增强过程, 且维持超强台风级的时长罕见。远超 2014 年超强台风“威马逊”(9 h); 而 2023 年第 9 号台风“苏拉”进入巴士海峡后加强为超强台风, 之后维持超强台风级向西偏北方向移动进入南海东北部, 直至在珠江口近海减弱为强台风级, 维持超强台风级达 80 h。

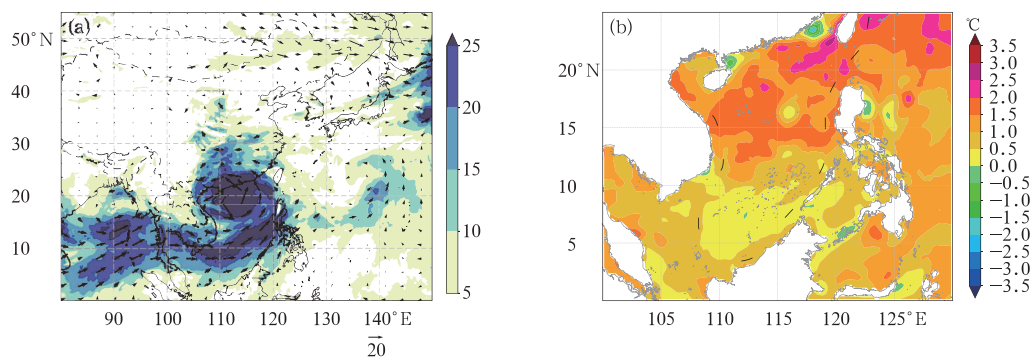


图 13 2024 年 9 月 (a) 6 日 08:00 850 hPa 水汽通量(箭头和填色, 单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) 4 日海面温度距平

Fig. 13 (a) Water vapor flux (arrow and colored, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa at 08:00 BT 6 September, and (b) SST anomaly on 4 September 2024

超强台风长时间维持的原因一般也是台风增强的有利因子(如海温较高、垂直风切变小、地形的辐合作用等)。此外,台风内核区的水平、垂直输送及凝结加热的大值收支对台风长时间强度维持具有重要影响(李启华等,2019)。“摩羯”维持超强台风级长达 64 h,特别是在 9 月 6 日晚经琼州海峡进入北部湾后,强度依然维持在超强台风级(16 级),并在靠近越南近海时强度再次增强至 17 级,使得“摩羯”成为有气象记录以来在北部湾活动的最强台风,也是登陆越南的最强台风。

一般认为,台风在进入北部湾之后,受周围地形的影响往往会逐渐减弱,但也有可能在有利的条件下强度维持甚至增强。中央气象台主观预报“摩羯”在进入北部湾后强度逐渐减弱,并未预报出强度的维持和再次增强。从图 14 中 9 月 6 日 20:00 起报的中央气象台主观预报、主流模式与中国气象局台风最佳路径资料的中心最大风速和中心附近最低气压可见,ECMWF、NCEP 的确定性预报对于“摩羯”进入北部湾后的强度再次增强趋势是有所反映的,CMA-TYM 也预报了强度维持而非减弱,直至登陆越南后各模式才开始预报逐渐减弱。

图 15 为“摩羯”在 9 月 6 日晚进入北部湾至 7 日

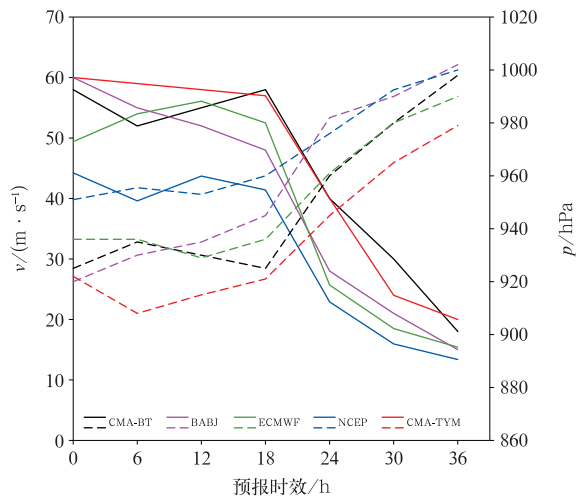


图 14 2024 年 9 月 6 日 20:00 中央气象台主观预报(BABJ)、ECMWF、NCEP、CMA-TYM 起报的 36 h 时效预报与相应时刻的中国气象局台风最佳路径(CMA-BT)的台风中心最大风速(实线)和中心附近海平面最低气压(虚线)
Fig. 14 A comparison of CMA Best Track (CMA-BT) and 36 h forecasts by BABJ, ECMWF, NCEP and CMA-TYM for maximum wind speed (solid line) and minimum central pressure (dashed line) near the center initiated at 20:00 BT 6 September 2024

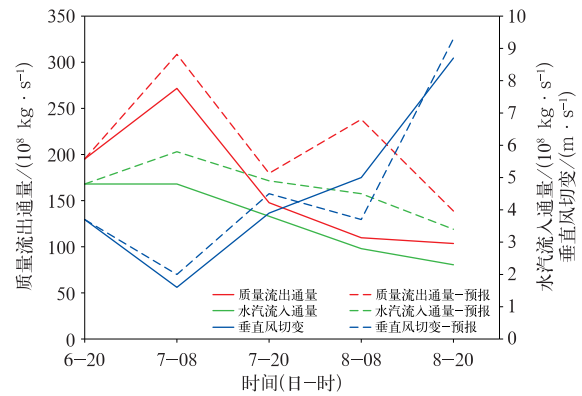


图 15 2024 年 9 月 6 日 20:00 ECMWF 起报的 36 h 预报时效的高层质量流出通量(300~100 hPa)、水汽流入通量(1000~300 hPa)和垂直风切变(850~200 hPa)的预报(虚线)与分析(实线)

Fig. 15 A comparison between the forecast (dashed line) and analysis (solid line) of upper-level mass outflow flux (300—100 hPa), moisture inflow flux (1000—300 hPa), and vertical wind shear (850—200 hPa) from ECMWF initiated 20:00 BT 6 September 2024

下午登陆越南及之后(6 日 20:00 至 8 日 20:00)台风在一定范围内的平均高层质量流出通量(300~100 hPa)、水汽流入通量(1000~300 hPa)和垂直风切变(850~200 hPa)的演变情况,对比 ECMWF 确定性模式在 6 日 20:00 的预报场计算所得的上述物理量,在北部湾活动期间,高层质量流出增加,整层水汽流入通量也维持较强的正流入,整层垂直风切变基本在 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。模式也很好地区报了上述物理量的变化趋势,并且北部湾海面温度在此期间也达到 30°C 以上(图略)。通过以上条件分析可基本判断台风的强度存在维持或者进一步加强的可能,但如何更加明确或者精确地预报快速增强和强度维持仍是难点,业务中除了通过影响因子的定性判别、对数值模式预报的参考和性能的检验、客观产品的支撑外,目前仍依赖预报员的综合判断能力、经验以及预报服务策略。

4 结论与讨论

对 2024 年西北太平洋和南海台风的活动特征和预报难点进行了分析和总结,主要结论如下:

(1)2024 年西北太平洋和南海共生成 26 个台风,与气候平均基本持平。生成源地较多年平均偏北、偏西;全年共有超强台风 8 个且都经历了快速增

强过程;共有8个台风登陆我国,个数偏多、强度偏强,登陆地段集中于华东和华南地区,登陆台湾次数最多;8月无台风登陆;台风残涡引发的极端降水多发。

预报误差分析表明,2024中央气象台整体台风预报质量较好。24 h主观路径预报平均误差为67 km,整体上优于日本(75 km)和美国(72 km)。24 h台风强度预报误差是 $4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,差于日本($3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),但优于美国($5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

(2)数值模式预报“格美”登陆后期折向偏北方向移动,因而出现较大误差,但并不是对环流形势场的预报出现较大偏差,主要是对“格美”登陆后的结构难以把握。因此业务预报的难点在于参考模式预报并进一步关注地形对弱台风或者残涡移动及结构变化的影响。

(3)西南季风为“格美”残涡的维持和降水的产生带来不稳定能量和水汽供应,同时台风残涡和季风槽的存在又为降水的发生提供了有利的动力条件。在有持续的季风供应充足的水汽情况下,降水释放的潜热会持续加热大气。除了充沛的西南季风水汽输送外,残涡下垫面湿度大,温度高,也有助于残涡环流的维持。残涡的移动位置和极端降水预报能力的提高是业务中的关键难点,需要进一步分析和研究模式预报性能和订正方法。对于相应的残涡降水影响因子,更应关注极端性的发生原因及客观预报方法的研发。

(4)“摩羯”的高层出流清楚,强度较强,有利于台风次级环流的形成和增强;中层的环境风垂直切变较小,有利于台风暖心结构的维持和发展;低层的西南季风携带充沛的水汽卷入“摩羯”核心区域,提供了持续的能量来源;下垫面的海面温度较气候平均明显偏暖,存在清楚的海洋暖涡。如何定量预报台风快速增强和强度维持仍是难点,业务中除了采用影响因子定性判别、数值模式预报参考和性能检验、客观产品支撑外,仍依赖预报员的综合判断经验及预报服务的策略考虑。

参考文献

高拴柱,吕心艳,2023.台风快速增强爆发前后的背景环流和热力动力条件的演变[J].气象学报,81(5):702-716. Gao S Z, Lü X Y, 2023. Evolution of environmental circulation and dynamic and thermodynamic conditions before and after the onset of typhoon rapid intensification[J]. Acta Meteor Sin, 81(5): 702-716 (in Chinese).

郭蕊,贾小卫,吴丹,等,2019.1810号台风“安比”登陆后长时间维持机制分析[J].地球科学前沿,9(5):408-419. Guo R, Jia X W, Wu D, et al, 2019. Analysis on long-time maintenance mechanism of Typhoon Ampil (1810) after its landing[J]. Adv Geosci, 9(5): 408-419 (in Chinese).

胡海川,董林,2023.一种基于集合数值预报产品的台风强度订正方法[J].气象学报,81(2):316-327. Hu H C, Dong L, 2023. A typhoon intensity correction method based on ensemble numerical forecast products[J]. Acta Meteor Sin, 81(2): 316-327 (in Chinese).

韩峰,储可宽,谈哲敏,等,2019.双台风“玛娃(2005)”和“古超(2005)”移动路径与强度的伴随敏感性分析[J].地球物理学报,62(9):3247-3258. Han F, Chu K K, Tan Z M, et al, 2019. The adoint—derived sensitivity analysis of the motion and intensity of the binary typhoons: Mawar (2005) and Guchol (2005)[J]. Chin J Geophys, 62(9): 3247-3258 (in Chinese).

金茹,董美莹,李颖,等,2024.高层环境场对台风“黑格比”(2020)迅速增强的影响分析[J].热带气象学报,40(5):776-788. Jin R, Dong M Y, Li Y, et al, 2024. Impact of upper-tropospheric environmental field on rapid intensification of Typhoon Hagupit (2020)[J]. J Trop Meteor, 40(5): 776-788 (in Chinese).

雷小途,2021.中国台风联防与科研协作及其对中国台风学科发展的作用综述[J].气象学报,79(3):531-540. Lei X T, 2021. Overview of typhoon prevention and cooperative research and their contribution to typhoon study in China[J]. Acta Meteor Sin, 79(3): 531-540 (in Chinese).

李启华,陆汉城,黄小刚,等,2019.长时间强度维持台风内核区位置的中尺度分布特征及诊断[J].地球物理学报,62(8):2821-2834. Li Q H, Lu H C, Huang X G, et al, 2019. Diagnosis on the characteristics of the mesoscale inner-core potential vorticity in intensity-maintaining typhoons[J]. Chin J Geophys, 62(8): 2821-2834 (in Chinese).

刘菲菲,陶丽,张俊凯,2024.夏季西北太平洋副热带高压主模态年际变化特征及其季节预报模型[J].大气科学,49(1):67-92. Liu F F, Tao L, Zhang J K, 2025. Interannual variability in the dominant modes of western North Pacific subtropical high in summer and its statistical prediction model[J]. Chin J Atmos Sci, 49(1): 67-92 (in Chinese).

刘艳婕,王晓聪,刘屹岷,等,2024.台风“杜苏芮”(2305)残涡特大暴雨的多模式预报性能比较分析[J].大气科学,49(5):1527-1540. Liu Y J, Wang X C, Liu Y M, et al, 2024. Comparison of the performance of multiple operational models on prediction of heavy rain caused by residual vortex of Typhoon Doksuri (2305)[J]. Chin J Atmos Sci, 49(5): 1527-1540 (in Chinese).

卢珊,王黎娟,管兆勇,等,2012.低纬季风涌影响登陆台风“榴莲”(0103)和“碧利斯”(0604)暴雨增幅的比较[J].大气科学学报,35(2):175-185. Lu S, Wang L J, Guan Z Y, et al, 2012. Comparison of impacts of low-latitude monsoon surge on the enhanced rainstorm from landing typhoons Durian and Bilis[J]. Trans Atmos Sci, 35(2): 175-185 (in Chinese).

吕心艳,董林,高拴柱,2023.台风“米克拉”在台湾海峡南部快速增强

- 的原因分析[J]. 气象学报, 81(6): 866-878. Lü X Y, Dong L, Gao S Z, 2023. Analysis for the rapid intensification of Typhoon Mekkhala in southern Taiwan Strait[J]. Acta Meteor Sin, 81(6): 866-878(in Chinese).
- 吕心艳, 许映龙, 董林, 等, 2021. 2018年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 47(3): 359-372. Lyu X Y, Xu Y L, Dong L, et al, 2021. Analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs over northwestern Pacific in 2018[J]. Meteor Mon, 47(3): 359-372(in Chinese).
- 马艺铭, 方娟, 王晨迪, 2023. 涡旋结构和环境场对台风“黑格比”(2020)强度变化的影响[J]. 气象学报, 81(6): 879-896. Ma Y M, Fang J, Wang C D, 2023. Impacts of vortex structure and environment on the intensity of Typhoon Hagupit (2020)[J]. Acta Meteor Sin, 81(6): 879-896(in Chinese).
- 聂高臻, 许映龙, 王海平, 2025. 2023年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 51(3): 369-381. Nie G Z, Xu Y L, Wang H P, 2025. Analysis of the characteristics and forecast difficulties of typhoon activities in the western North Pacific in 2023[J]. Meteor Mon, 51(3): 369-381(in Chinese).
- 潘佳文, 高珊, 郑秀云, 等, 2025. 超强台风“莫兰蒂”(2016)内核微物理特征的双偏振雷达观测分析[J]. 气象学报, 83(2): 366-388. Pan J W, Gao S, Zheng X Y, et al, 2025. Analysis of microphysical features in the inner core of Super Typhoon Meranti (2016) based on dual-polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 83(2): 366-388(in Chinese).
- 钱奇峰, 董林, 许映龙, 等, 2023. 2022年西北太平洋和南海台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 49(10): 1254-1266. Qian Q F, Dong L, Xu Y L, et al, 2023. Analysis on the characteristics and forecast difficulties of the typhoons over the Northwest Pacific and the South China Sea in 2022[J]. Meteor Mon, 49(10): 1254-1266(in Chinese).
- 钱奇峰, 王川, 徐雅静, 等, 2021. 一种基于深度学习的台风强度估测技术[J]. 气象, 47(5): 601-608. Qian Q F, Wang C, Xu Y J, et al, 2021. A deep learning technique of typhoon intensity estimation[J]. Meteor Mon, 47(5): 601-608(in Chinese).
- 渠鸿宇, 董林, 马新野, 等, 2024. 基于XGBoost的西北太平洋台风快速增强预报模型[J]. 气象, 50(12): 1531-1541. Qu H Y, Dong L, Ma X Y, et al, 2024. Forecast model of Northwest Pacific typhoon rapid intensification based on XGBoost[J]. Meteor Mon, 50(12): 1531-1541(in Chinese).
- 王海平, 董林, 许映龙, 等, 2021. 2019年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 47(8): 1009-1020. Wang H P, Dong L, Xu Y L, et al, 2021. Analysis on the characteristics of typhoon activity and forecasting difficulties in western North Pacific in 2019[J]. Meteor Mon, 47(8): 1009-1020(in Chinese).
- 王海平, 张玲, 董林, 等, 2024. 台风海葵(2311)的预报难点及模式性能[J]. 气象, 50(11): 1331-1342. Wang H P, Zhang L, Dong L, et al, 2024. Forecast difficulties and model performances in Typhoon Haikui (2311) forecasting[J]. Meteor Mon, 50(11): 1331-1342(in Chinese).
- 吴启蒙, 吴立广, 曹剑, 2022. NUIST地球系统模式模拟 ENSO 对西北太平洋热带气旋活动的影响[J]. 大气科学, 46(2): 251-262. Wu Q M, Wu L G, Cao J, 2022. Impact of ENSO on tropical cyclone activities in Northwest Pacific simulated by the NUIST earth system model[J]. Chin J Atmos Sci, 46(2): 251-262(in Chinese).
- 向纯怡, 董林, 刘达, 等, 2024. 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, 50(11): 1289-1305. Xiang C Y, Dong L, Liu D, et al, 2024. Thermodynamic and dynamic mechanism of maintenance of Typhoon Doksuri remnant vortex after its landfall in 2023[J]. Meteor Mon, 50(11): 1289-1305(in Chinese).
- 向纯怡, 许映龙, 高拴柱, 等, 2022. 2021年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 48(9): 1195-1208. Xiang C Y, Xu Y L, Gao S Z, et al, 2022. Analysis of the characteristics and forecast difficulties of typhoon over the western North Pacific in 2021[J]. Meteor Mon, 48(9): 1195-1208(in Chinese).
- 赵兵科, 汤杰, 雷小途, 等, 2022. 近海台风立体协同观测科学试验进展[J]. 地球科学进展, 37(8): 771-785. Zhao B K, Tang J, Lei X T, et al, 2022. Progress on the experiment of a multi-platform collaborative field campaign on offshore typhoon[J]. Adv Earth Sci, 37(8): 771-785(in Chinese).
- 赵培娟, 邵翔翔, 张霞, 2019. 相似路径台风“摩羯”“温比亚”登陆后环境场对比分析[J]. 气象与环境科学, 42(3): 17-28. Zhao P J, Shao Y X, Zhang X, 2019. Comparative analysis of the after landed environmental field of the similar track typhoons Yagi and Rumbia[J]. Meteor Environ Sci, 42(3): 17-28(in Chinese).
- 周冠博, 柳龙生, 董林, 等, 2022. 2020年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 48(4): 504-515. Zhou G B, Liu L S, Dong L, et al, 2022. The analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs in western North Pacific in 2020[J]. Meteor Mon, 48(4): 504-515(in Chinese).
- Bhatia K G, Vecchi H, Murakami S, et al, 2018. Projected response of tropical cyclone intensity and intensification in a global climate model[J]. J Climate, 31(20): 8281-8303.
- Bi K F, Xie L X, Zhang H H, et al, 2022. Pangu-Weather: a 3D high-resolution model for fast and accurate global weather forecast[J]. arXiv:2211.02556.
- Chen K, Han T, Gong J C, et al, 2023. Fengwu: pushing the skillful global medium-range weather forecast beyond 10 days lead[J]. arXiv:2304.02948.
- Knutson T R, Tuleya R E, 2004. Impact of CO₂-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization[J]. J Climate, 17(18): 3477-3495.
- Wu L G, Wang B, 2004. Assessing impacts of global warming on tropical cyclone tracks[J]. J Climate, 17(8): 1686-1698.

(本文责编:何晓欢)