2025 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析

王晴 向纯怡 王海平 贾莉 许映龙

国家气象中心，北京 100081

提 要：利用 1949—2025 年中国气象局台风最佳路径资料、2025 年中央气象台台风路径和强度实时业务资料、星载合成孔径雷达资料、欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料、业务模式预报资料等，对 2025 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：2025 年台风生成个数较气候平均偏多 2.9 个，生成源地偏西、偏北，整体强度偏弱，累积气旋能量偏低，秋季台风活跃，南海季风偏强阶段台风多群发；台风登陆个数偏多 3.8 个，登陆地段集中在华南。中央气象台台风 24 h 和 48 h 时效主观路径、强度预报整体优于日本和美国。业务预报中的重要难点问题包括：弱引导气流环境下模式间分歧大，台风生成初期长时效路径预报存在极端大误差；秋季南海西行台风的环境因子复杂，近岸内核精细结构的演变影响强度，精准登陆预报服务仍存在挑战，应加强眼墙等台风内核精细结构的演变特征监测分析，及时进行短时临近预报订正等。

关键词：台风，活动特征，预报难点，长时效路径预报，内核结构

Analysis of the Characteristics and Forecast Challenges of Typhoons over the Western North Pacific in 2025

WANG Qian XIANG Chunyi WANG Haiping JIA Li XU Yinglong

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Utilizing the best track data of typhoons from China Meteorological Administration (CMA) in 1949−2025, observation data of typhoon tracks and intensities from National Meteorological Center (NMC/CMA) in 2025, ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), and sea surface wind speeds retrieved by spaceborne synthetic aperture radar as well as model forecasts, we analyze the main characteristics of typhoon activities over the western North Pacific and South China Sea in 2025. The results indicate that the number of typhoons generated in 2025 was 2.9 above the climatological normal with the typhoon genesis locations being more westward and northward. Relatively, the overall typhoon intensities were weak and accumulated cyclone energy was low. Autumn typhoons were active, and clustered typhoons occurred during the period of strong South China Sea monsoon. Landfall typhoons were 3.8 above average, mainly concentrated in South China. The 24 h and 48 h subjective track and intensity forecasts from the NMC/CMA were generally superior to the forecasts made by agencies of Japan and the United States. The key challenges in the typhoon forecasting operations include that the large model discrepancies under weak steering flows lead to significant errors in long-range typhoon track forecasts in the early typhoon stage, and the complex environmental conditions

气象出版社待刊

and rapid inner-core structure evolution near the coast bring difficulties to accurately make landfall forecasts of westward-moving typhoons over the South China Sea in autumn. It is therefore necessary to strengthen the monitoring and analysis of the evolutionary characteristics of eyewall structures of typhoons and make timely corrections to the short-time and nowcasting forecasts.
Key words: typhoon, activity characteristic, forecast challenge, long-range typhoon track forecast, inner-core structure

2026 年 7 月 27 日收稿；2026 年 11 月 X 日收修定稿
广东省基础与应用基础研究基金项目（2024B1515520002）、中国气象局复盘总结专项（FPZJ2026-157）和国家气象中心青年基金项目（Q202505）共同资助
第一作者：王晴，主要从事台风预报研究，qianwang@cma.gov.cn
通讯作者：向纯怡，主要从事台风预报研究，xiangcy@cma.gov.cn

引 言

台风（西北太平洋上强度达到热带风暴级及以上的热带气旋）是影响我国的灾害性天气之一，其活动严重影响海上航运及其他经济活动。平均每年有 7 个台风登陆我国，为沿海及部分内陆地区带来强风、暴雨、风暴潮等灾害，并造成人员伤亡和巨额经济损失（端义宏等，2012；2014）。近年来秋季台风快速增强多发、群发特征明显、易与冷空气叠加致灾（王海平等，2025；王晴等，2026），导致我国东南沿海台风致灾风险显著升高。多台风同期活跃、相互影响，导致路径和强度预报不确定性增大，给应急响应、人员转移、防汛调度带来压力。台风预报准确性与台风防灾减灾工作紧密关联（Zhang et al，2009），国家气象中心（中央气象台）致力于台风监测预报预警水平的提高，发挥国家级业务单位在台风预报预警服务体系中的指导和协调作用，随着我国气象监测系统的不断完善、台风数值预报水平的不断发展以及人工智能天气模型的研发应用，中央气象台的台风业务预报取得了长足进步（Duan et al，2019；Lei，2020；Qian et al，2024），为防范台风灾害提供了强有力的防灾指导和科学决策依据。虽然年均 24 h 预报时效的台风路径预报误差呈减小趋势（王海平等，2025），但仍存在路径预报和强度预报误差大的台风（李泽椿等，2020），尤其在 72、96、120 h 预报时效的路径预报中，极端大误差仍旧存在（王晴等，2022）。长时效路径预报的极端大误差使台风预报服务陷入被动，也暴露出预报员对相关误差成因的认识不足，亟待深入探究。

在台风路径预报精准可靠的前提下，台风强度和结构预报的准确性便成为影响灾害风险评估的决定性因素。影响热带气旋强度变化的物理机制具有多时间和空间尺度特征，涵盖大尺度环境气流、台风自身环流和台风结构本身（Duan et al，2019）。其中，眼墙是台风环流中强风与暴雨最为集中的关键区域，其结构特征直接决定台风强度，因此对眼墙精细结构演变的监测预报具有重要业务应用价值。例如 1909 号台风“利奇马”（张康波等，2019）和 2305 号台风“杜苏芮”（Wang et al，2024；2025）均在登陆前呈现双眼墙结构，其对应的 24 h 强度预报误差均超过 10 m • s^{-1}。此外，眼墙的尺度影响强风暴雨的范围，台风眼直

《气象》待刊

径大意味着十级、十二级风圈的范围显著扩展，风灾破坏范围广且更持久。例如，2018 年台风“潭美”以强台风等级登陆日本，登陆前其眼区直径超过 100 km（Zhang et al，2023），登陆点附近强风范围广；2025 年台风“麦德姆”登陆我国雷州半岛，台风眼直径达 90~110 km，其十二级风圈影响湛江近 11 h（王晴等，2026）。在实时的业务预报中应重视对台风眼墙精细结构演变的分析。

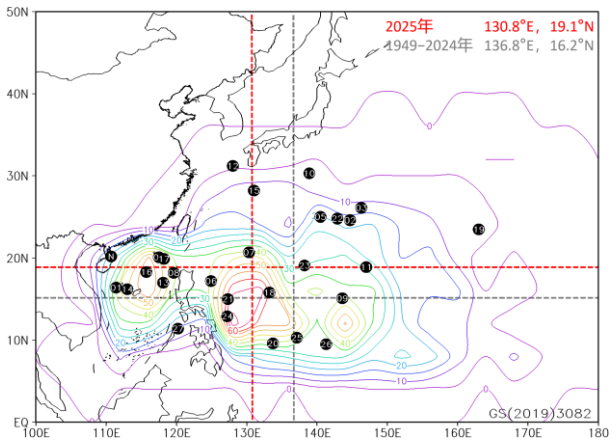
本文对 2025 年西北太平洋和南海台风活动特征进行统计分析，总结业务预报难题并进行初步科学分析，以持续推进台风预报水平的提高。文中提到的多年平均采用的是 1949—2024 年平均，提到的气候平均采用的是 1991—2020 年平均。使用的资料包括中国气象局台风最佳路径数据集（Ying et al，2014）、中央气象台发布的台风路径强度预报资料（http://typhoon.nmc.cn/web.html）、日本气象厅和美国联合台风警报中心的台风预报报文资料、风云气象卫星资料、沿海雷达组合反射率资料和全国地面气象自动站观测资料，用于统计分析及误差评估；欧洲中期天气预报中心（ECMWF）大气再分析资料 ERA5（Hersbach et al，2020）及 ECMWF 确定性模式预报产品，用于天气环流分析；应急管理部国家减灾中心的 2025 年全国自然灾害数据，用于分析登陆及影响台风的灾情损失；南海季风强度指数源自国家气候中心。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. 2025 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 生成源地偏西偏北

2025 年西北太平洋和南海台风生成源地的平均位置（19.1 ℃N、130.8 ℃E）较多年平均位置（16.2 ℃N、136.8 ℃E）明显偏西（约 6.0°），偏北约 2.9°（图 1）。8 个台风在南海生成，较多年平均偏多 3.5 个，其中 6 个登陆我国，2 个在海南岛南部近海掠过（“剑鱼” “蓝湖”）。没有从中太平洋移入西北太平洋的台风。



注：等值线为每 4 °×4 °空间范围内台风生成个数，红（灰）色虚线分别为 2025 年（多年）台风生成源地的平均位置，黑色

《气象》待刊

圆点为 2025 年台风生成位置(数字为台风编号，其中 N 表示南海热带风暴 Nameless）

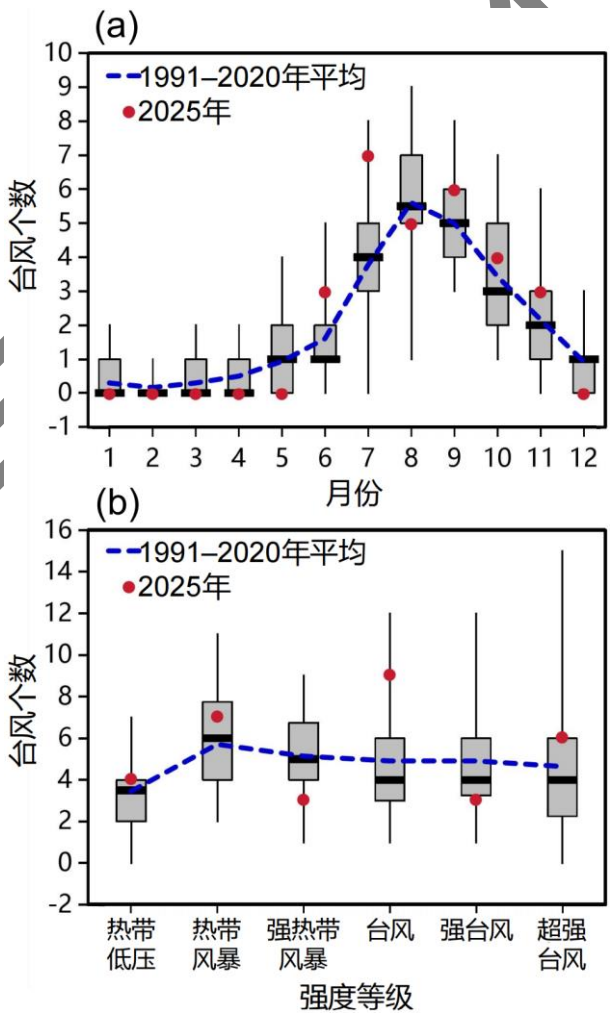
图 1 西北太平洋和南海台风 1949—2024 年台风生成源地密度分布（等值线，单位：个 • π^{-1} • R^{-2}, R=250 km）与 2025 年生成位置

Fig.1 Density distribution (contour, unit: each: π^{-1} • R^{-2}, R=250 km) of typhoon formation sources in 1949-2024 and typhoon genesis locations in 2025 over the western North Pacific and South China Sea

1.1.2 生成个数偏多

2025 年，西北太平洋和南海共有 28 个台风生成，较多年（1949—2024 年，下同）平均（26.7 个）偏多 1.3 个，较气候（1991—2020 年，下同）平均值（25.1 个）偏多 2.9 个。

台风生成频数在时间上呈现前期少、后期集中、阶段性活跃的特点（图 2a）。1—5 月无台风生成，较气候平均偏少 2.4 个。首个台风“蝴蝶”于 6 月 11 日生成，明显偏晚于多年平均首台生成日期，6 月有 3 个台风生成（包含中国气象局台风最佳路径数据集收录的南海热带风暴 Nameless），较气候平均偏多 1.37 个；7 月集中生成 7 个台风，较气候平均偏多 3.20 个；8 月生成 5 个台风，较气候平均略偏少 0.63 个；夏季（6—8 月）生成台风数较气候平均（11.1 个）偏多 3.9 个。秋季（9—11 月）共有 13 个台风生成，较气候平均（10.7 个）偏多 2.3 个，且季内各月生成数均较气候平均偏多。



注：箱线图箱须上、下端分别为最大、最小值，箱体上、中、下横线分别表示第 75%、50%、25%分位数。

图 2 西北太平洋和南海 2025 年和气候平均（1991—2020 年）的（a）逐月和（b）不同强度等级台风生成个数

Fig.2 Typhoon numbers in (a) each month and (b) different intensity categories over the western North Pacific and South China Sea in 2025 and the climatological normal from 1991 to 2020

1.2 台风活动特征

1.2.1 强度特征及快速增强事件

2025 年共有 6 个超强台风生成，较气候平均偏多 1.4 个；共有 3 个强台风，较气候平均偏少 1.9 个（图 2b）。超强台风和强台风的个数占比为 32.1%，较气候平均比例（37.7%）偏低。全年 28 个台风的生命史极值强度（lifetime maximum intensity,LMI）平均为 36.0 m • s^{-1}（12 级），较气候平均值（37.3 m • s^{-1}，13 级）偏弱 1.3 m • s^{-1}。夏季台风强度整体偏弱，秋季台风强度略偏强。15 个生成在夏季的台风 LMI 平均为 30.5 m • s^{-1}，较气候平均（35.5 m • s^{-1}）明显偏弱，40%为热带风暴级，仅有“剑鱼”达到超强台风级；13 个生成在秋季的台风 LMI 平均为 42.4 m • s^{-1}，较气候平均（39.6 m • s^{-1}）偏强 2.8 m • s^{-1}，85%以上达到台风级及以上强度，5 个达超强台风级。

业务中将台风在发展过程中 24 h 内强度增加超过 15 m • s^{-1} 的过程称为快速增强（rapid intensification，RI）过程。2025 年的 28 个台风中共有 6 个经历 RI，分别为“丹娜丝”“剑鱼”“桦加沙”“浣熊”“夏浪”“凤凰”（表 1）。其中，“剑鱼”24 h 内强度增幅最大，达 27 m • s^{-1}，其 RI 过程发生于南海北部，36 h 内由热带风暴级加强至超强台风级；“丹娜丝”在南海东北部海域经历 RI，反映出这两个南海“土台风”在生成后爆发性发展的特点。“桦加沙”的 RI 过程发生在菲律宾以东洋面，持续时长最长，由 9 月 19 日 14:00 至 9 月 22 日 02:00，达 60 h。此外，远海台风“浣熊”经历 2 次 RI 过程。从发生时间来看，秋季 RI 事件多于夏季。

表 1 2025 年西北太平洋和南海出现的台风快速增强事件

Table 1 Rapid intensification typhoon events over the western North Pacific and the South China Sea in 2025

台风编号	台风名称	快速增强时段（BT）	最大 24 h 强度增幅/（m •s^{-1}）	RI 持续时长/h
2504	丹娜丝	7 月 5 日 20:00 至 7 月 6 日 20:00	17	24
2513	剑鱼	8 月 23 日 14:00 至 8 月 25 日 02:00	27	36
2518	桦加沙	9 月 19 日 14:00 至 9 月 22 日 02:00	26	60
2519	浣熊	9 月 19 日 14:00 至 9 月 21 日 14:00	25	48
		9 月 27 日 08:00 至 9 月 28 日 14:00	20	30
2522	夏浪	10 月 6 日 20:00 至 10 月 8 日 02:00	19	30
2526	凤凰	11 月 8 日 02:00 至 11 月 9 日 02:00	17	24

1.2.2 累积气旋能量和生命史

2025 年台风累积气旋能量（accumulated cyclone energy,ACE）为 191.7×10^4 kn^2，较气候平均 ACE（234.3×10^4 kn^2）偏低约 18.2%（图 3a）；自 8 月开始，台风累积活动时长较气候平均持平或略偏长，全年台风

气象出版社待刊

累计活动时长为 3834 h，较气候平均略偏长 4.6%（图 3b）。可见，虽然 2025 年的台风个数、累计活动时长多于气候平均值，但由于台风整体强度偏弱、超强台风及强台风占比低，使得台风 ACE 明显偏弱。

西北太平洋和南海台风有 75%发生在季风槽内，南海—西北太平洋季风槽及低层西风增强有利于热带扰动发展和台风生成，并可能伴随多个台风同时或相继活动（高建芸等，2011）。加之 2025 年台风生成源地偏西，台风活动与南海夏季风活动密切相关。国家气候中心以南海区域 850 hPa 纬向风等指标监测南海夏季风活动，分析 2025 年 5—11 月南海夏季风强度指数（郑彬等，2016）与台风生成频数的逐日演变（图 4）可见，部分南海夏季风偏强阶段多个台风同时或相继活动时段具有较好对应关系，台风群发特征明显，例如 7 月第 1 候“木恩” “丹娜丝”、7 月第 5 候“范斯高”“竹节草”“罗莎”。秋季南海夏季风偏强的 9 月第 4 候再次出现“米娜”“桦加沙”“浣熊”3 个台风接连生成，直至 9 月下旬仍存在“桦加沙”“浣熊”“博罗依”三台共存的局面。

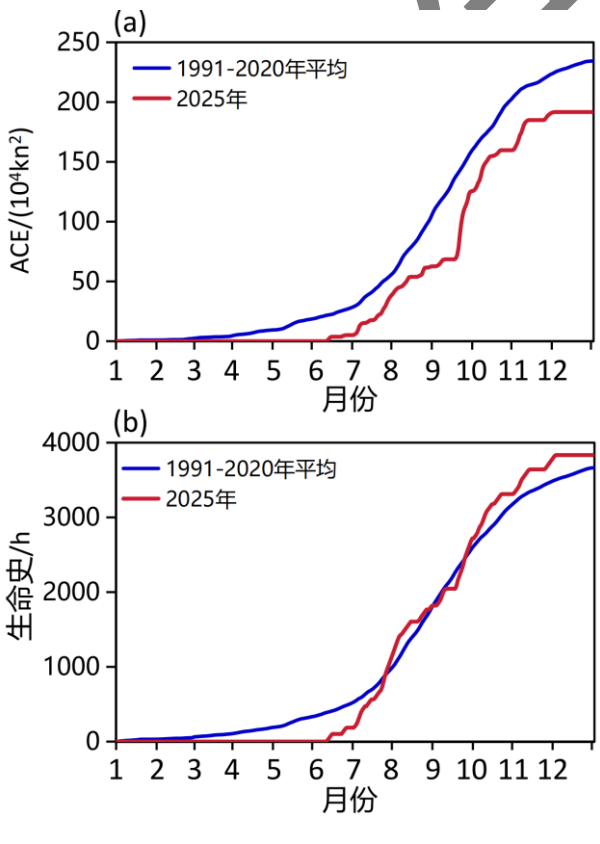


图 3 西北太平洋和南海 2025 年和气候平均（1991—2020 年）的台风（a）ACE，（b）累积生命史时长的逐月分布

Fig. 3 Monthly variations of (a) accumulated cyclone energy (ACE) and (b) accumulated life duration of typhoons over the western North Pacific and South China Sea in 2025 and the climatological normal from 1991 to 2020

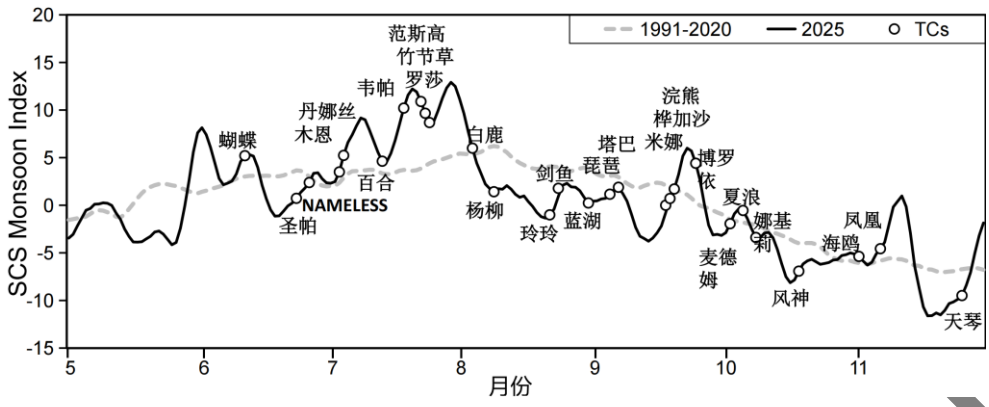


图 4 2025 年和气候平均（1991—2020 年）的南海季风强度指数与台风活动时间

Fig.4 South China Sea (SCS) monsoon index and typhoon activity time (dot) in 2025 and the climatological normal from 1991 to 2020 (curve)

1.3 台风登陆特征

2025 年共有 11 个台风登陆我国（图 5，登陆时中心附近最大风速达到或超过 18 $m \cdot s^{-1}$），另有 3 个台风（“剑鱼”“蓝湖”“博罗依”）在我国南海北部活动，也在华南造成风雨影响。

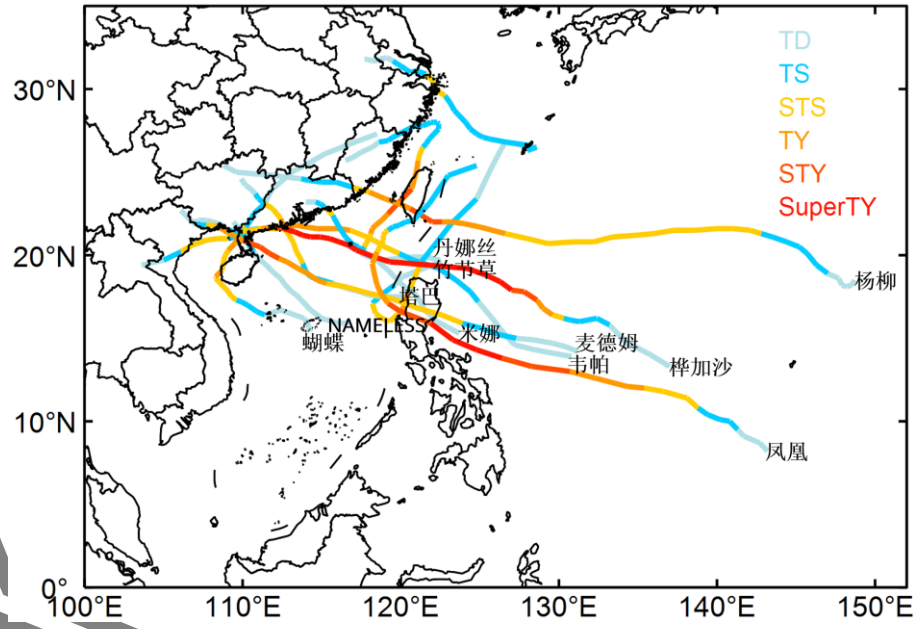


图 5 2025 年登陆我国的台风路径

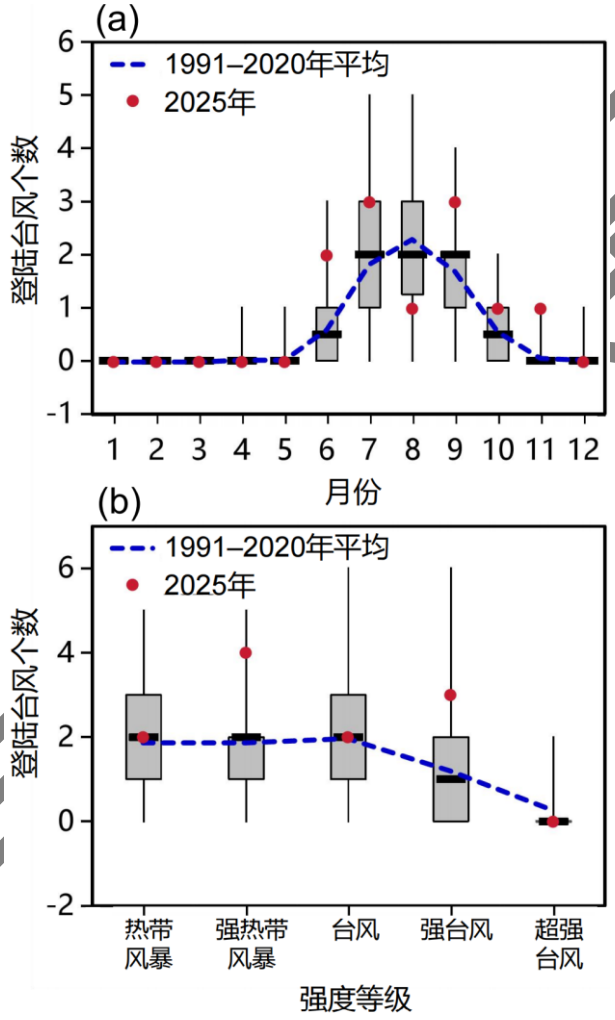
Fig.5 Tracks of typhoons making landfall in China in 2025

1.3.1 登陆台风偏多

2025 年我国全年台风登陆数（11 个）较气候平均（7.2 个）偏多 3.8 个。其中，6 月、7 月分别登陆 2 个、3 个，较气候平均分别偏多 1.4 个、1.2 个（图 6a）；8 月登陆 1 个，此外台风“剑鱼”“蓝湖”在南海北部活动并为我国带来风雨影响（表 2）；秋季（9—11 月）台风登陆 5 个，较气候平均偏多 2.7 个，反

映出秋季登陆台风活跃的特征。

以台风初次登陆的强度统计，热带风暴级、台风级的登陆台风个数与气候平均持平，强热带风暴级、强台风级个数较气候平均值偏多（图 6b）。登陆台风中共有 3 个以强台风级登陆，其中“丹娜丝”“杨柳”登陆台湾岛，“麦德姆”登陆广东雷州时其中心附近最大风速达 42 m • s^{-1}（14 级），是 2025 年登陆中国大陆的最强台风；2 个以台风级登陆（“塔巴”“桦加沙”）。总体来说，登陆强度达到台风级及以上的占比（45.5%）与气候平均（47.9%）基本持平。



注：箱线图箱须上、下端分别为最大、最小值，箱体上、中、下横线分别表示第 75%、50%、25%分位数。

图 6 我国 2025 年和气候平均（1991—2020 年）的（a）逐月和（b）不同强度等级台风登陆个数

Fig.6 Landfall typhoon numbers in (a) each month and (b) different intensity categories in China in 2025 and the climatological normal from 1991 to 2020

1.3.2 登陆地段集中

由登陆地点的分布来看，2025 年的 11 个登陆台风共在我国东南沿海登陆 19 次，包括广东 7 次、广西 3 次、浙江 3 次、台湾 3 次、海南 1 次、福建 1 次、上海 1 次，台风的登陆地段集中在华南（图 5，表 2）。

秋季有 4 个台风（“塔巴”“米娜”“桦加沙” “麦德姆”）接连登陆广东，导致风雨影响的叠加效应。

1.3.3 风雨影响及灾害

2025 年夏秋季台风为我国东南沿海及部分内陆地区带来强风暴雨，由于秋季台风活跃时段、地段集中，华南频受台风影响，台风暴雨呈现时空集中、影响叠加的特点。“桦加沙”登陆前的近海移动造成华南沿海持续性大风，11 个国家级气象观测站最大阵风突破 9 月历史极值，广东江门、阳江、深圳、珠海等地沿海个别岛礁出现 17 级及以上阵风，广东沿海局地 10 级以上阵风影响时间超过 20 h；“麦德姆”登陆影响期间，华南沿海个别岛礁出现 15～17 级阵风，广东 3 个国家级气象观测站最大阵风突破历史极值，广东徐闻、广西涠洲岛、海南海口琼山等 7 个国家级气象观测站日降雨量突破 10 月极值（王晴等，2026）。全年台风灾害共造成 12 个省（自治区）1107.01 万人次受灾；除台湾地区外造成 10 人死亡，紧急转移安置和需紧急生活救助 157.99 万人次；700 余间房屋倒塌，2.01 万间不同程度损坏；农作物受灾面积为 254.2 千公顷，其中绝收 23.4 千公顷，直接经济损失达 405.86 亿元（表 2）。

表2　2025年登陆和影响我国台风一览表

Table 2　List of landfall and impact typhoons in China in 2025

编号	名称	登陆地点	登陆时刻（BT）	登陆强度		灾害损失		
				风速 /m s^{-1}	气压 /hPa	受灾人口 /万人	死亡人口/人	紧急避险转移人口/万人
2501	蝴蝶（Wutip）	海南东方	6月13日22:30	30	980	61.11	7	17.7
		广东雷州	6月14日12:30	30	980			
	Nameless	广东徐闻	6月26日10:00	20	995	/	/	/
2504	丹娜丝（Danas）	台湾嘉义	7月6日23:40	42	955	29.71	/	13.07
		浙江温州洞头	7月8日21:25	23	990			
		浙江瑞安	7月8日23:45	20	992			
2506	韦帕（Wipha）	广东阳江海陵岛	7月20日21:45	25	980	80.9	/	54.86
2508	竹节草（Co-May）	浙江舟山朱家尖岛	7月30日04:30	28	975	45.73	/	40.35
		上海奉贤	7月30日16:40	23	978			
2511	杨柳（Podul）	台湾台东	8月13日13:00	42	955	29.58	2	12.03
		福建漳浦	8月14日00:30	25	990			
2513	剑鱼（Kajiki）	/	/	/	/	20.84	1	7.08
2514	蓝湖（Nongfa）	/	/	/	/	0.13	/	0.13
2516	塔巴（Tapah）	广东台山	9月8日08:50	33	978	29.82	/	21.95
2517	米娜（Mitag）	广东汕尾	9月19日14:15	25	990	13.25	/	10.8
		广东阳江海陵岛	9月24日16:40	40	950			
2518	桦加沙（Ragasa）	广西北海	9月25日04:30	20	990	387.75	/	118.5
		广西钦州	9月25日09:00	18	998			
2520	博罗依（Bualoi）	/	/	/	/	49.52	/	7.19
2521	麦德姆（Matmo）	广东雷州	10月5日15:15	42	965	358.63	/	46.98
		广西防城港	10月6日01:10	28	982			

《气象》待刊

2525	海鸥（Kalmaegi）	/	/	/	/	0.02	/	0.02
2526	凤凰（Fung-Wong）	台湾屏东	11月12日19:40	20	995	0.02	/	0.02

注：登陆信息来源于台风最佳路径数据集，灾情损失数据源自应急管理部国家减灾中心。

2. 2025 年台风业务预报误差分析

2.1 路径预报误差

台风路径预报误差的计算参照中国气象局颁布的《台风业务和服务规定》中台风分析和预报质量评定方法，路径预报误差在台风移动方向上的投影为移速误差（along-track error，ATE），在垂直于移动方向上的投影为移向误差（cross-track error，CTE），分别表征预报误差是由对移动速度还是移动方向的误判所致。经计算，2025 年中央气象台全年台风的 24、48、72、96、120 h 各时效主观路径预报误差分别为 57、93、154、277、461 km（图 7a），与过去 5 年（2020—2024 年）各时效的平均误差相比（69、119、171、236、328 km），24、48、72 h 预报误差分别减小 17.4%、21.8%和 9.9%，均达到历史最好水平（24 h 首次突破 60 km，48 h 首次突破 100 km），但 96 h、120 h 预报误差分别增加了 17.4%、40.5%。该误差数据由中央气象台业务定位定强及预报数据计算而得。

从移速误差和移向误差的分布来看（图 8），2025 年存在超过 1000 km 的 96 h 预报误差样本，以及超过 1500 km 的 120 h 的预报误差样本，多来自于对移速的误判。较长预报时效的大误差多来自远海转向台风“罗莎”“娜基莉”“夏浪”，其中极端大误差个例“夏浪”120 h 预报时效的样本仅占 3.6%，却造成误差占比高达 17%。

中央气象台路径预报整体上优于日本气象厅（24~120 h 路径误差分别为 68、106、175、294、479 km），72~120 h 预报时效上逊于美国联合台风警报中心（24~120 h 路径误差分别为 69、103、151、243、353 km）。值得一提的是，各台风业务预报中心的 96 h、120 h 预报时效的主观综合路径预报误差在过去 5 年中均出现了明显的增大（王海平等，2025），台风长时效路径预报的大误差值得引起重视（王晴等，2022）。

《气象》待刊

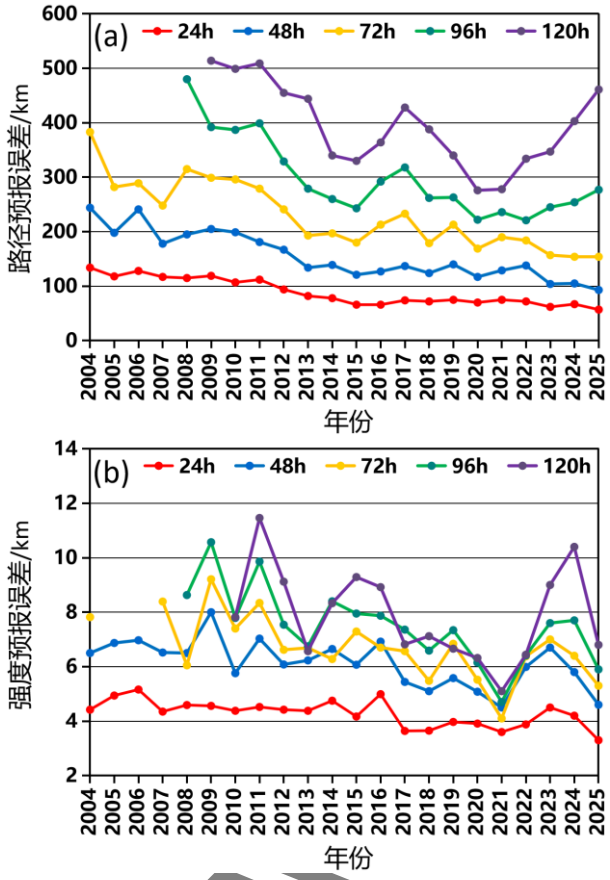
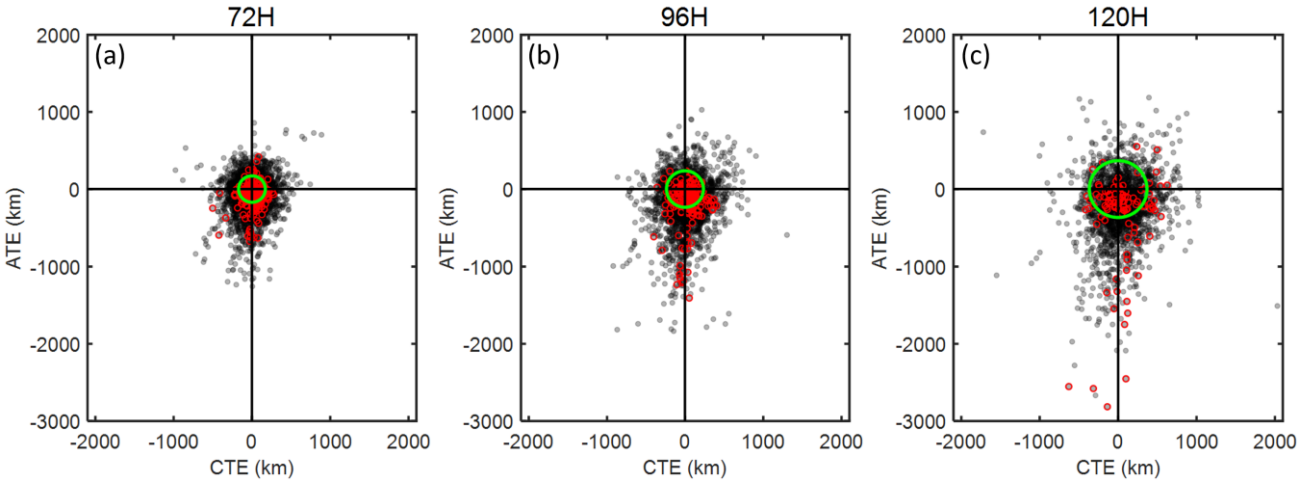


图 7 2004—2025 年中央气象台逐年台风（a）平均路径和（b）平均强度预报误差

Fig.7 Annual forecast errors of (a) mean track and (b) mean intensity of typhoons by NMC/CMA during 2004–2025



注：灰色圆点为 2011—2025 年，红色圆圈为 2025 年，绿色圆圈示意过去 5 年（2020—2024 年）平均误差值

图 8　2011—2025 年中央气象台台风（a）72 h，（b）96 h，（c）120 h 时效路径预报误差 ATE 和 CTE 散点图

Fig.8　Scatter plots of ATE and CTE for typhoon track forecast errors under (a) 72 h, (b) 96 h and (c) 120 h lead times by NMC/CMA during 2004–2025

2.2 强度预报误差

2025 年中央气象台全年台风的 24、48、72、96、120 h 各时效主观强度预报误差分别为 3.3、4.6、5.3、5.9、6.8 m 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 m s^{-1}）

相比，强度预报误差分别减小了 17.5%、17.9%、10.2%、9.2%和 9.3%，24 h 强度预报误差达历史最低值。与同类主观预报相比，中央气象台强度预报优于美国联合台风警报中心（24~120 h 强度误差分别为 3.9、5.6、6.1、6.9、7.7 m s^{-1}），72~120 h 逊于日本气象厅（24~120 h 强度误差分别为 3.6、4.6、5.0、5.4、6.3 m s^{-1}）。

3. 2025 年台风预报难点分析

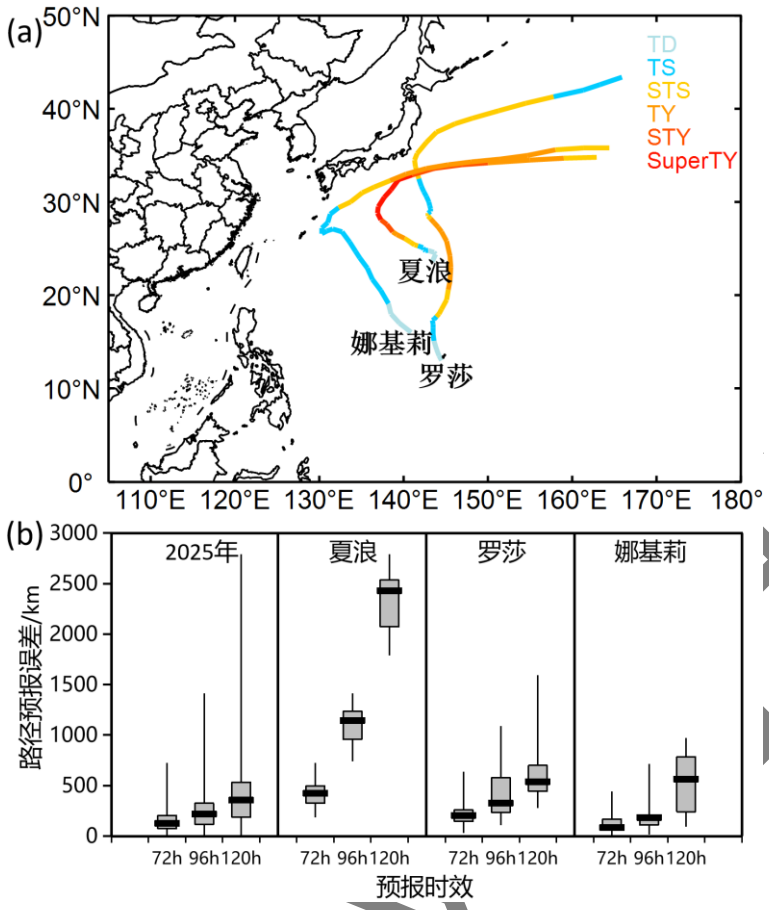
2025 年台风路径预报在 96 h、120 h 长时效上仍面临较大挑战，误差居高不下，其中极端大误差个例“夏浪”的 120 h 路径预报误差占比高达 17%，凸显了长时效路径预报对少数复杂个例的敏感性。登陆台风偏多、多个台风在华南近海活动，也对近海强度变化、强风落区及登陆后风雨持续时间的预报提出了更高要求。“桦加沙”以超强台风级穿过巴士海峡进入南海，临近登陆前在粤西沿岸经历眼墙替换并快速减弱，增加了登陆强度的预报难度；“麦德姆”登陆雷州半岛过程中维持大眼结构、强风落区宽广，对强风影响范围的精细预报构成挑战。此外，“蝴蝶”“丹娜丝”登陆后的残余涡旋造成持续强降水，增加了登陆后风雨影响的预报难度。下文选取典型个例，深入分析相关预报难点及误差成因。

3.1 台风 3~5 d 路径预报极端大误差

Peng et al（2017）基于 2005—2014 年的台风预报资料统计了多家机构的台风路径预报误差，指出中央气象台的 72、96、120 h 路径预报平均误差分别为 301、441、557 km，其中，大误差的值及样本比例大于美国联合台风警报中心的预报（此处比较基于 2010—2014 年数据）。这体现出台风 3～5 d 长时效路径预报有进一步改进空间，同时也表明预报员对大误差成因的认识仍不充分，相关机制有待深入研究。针对 2012—2021 年台风路径误差统计，72、96 和 120 h 预报时效中超过 60%的样本预报误差（分别为 61.7%、62.2%、61.0%）小于中位数，其贡献的误差约占总误差的 1/3（分别为 35.2%、34.9%、34.0%）；极端大误差样本虽然样本数占比少（分别仅为 4.3%、5.6%、5.2%），但其贡献的误差占比高（分别为 15.0%、18.6%、17.0%）。虽然大误差的样本数仅为小误差样本数的约 1/12，但其误差占到后者的 1/2。这也反映出在实际台风业务预报中，为数不多的预报大误差需要用近 6 倍的“好”预报来“弥补”，才能将平均预报误差控制在一定范围内（王晴等，2022）。

2025 年台风 3~5 d 路径预报极端大误差来自远海转向台风“夏浪”“娜基莉”“罗莎”（图 9a），三者共同造成的 72、96、120 h 预报时效的误差占比分别高达 40%、51%、63%。其中以 “夏浪”的误差最为极端，是全年 72~120 h 误差最大值，其样本几乎全部落入全年 3~5 d 路径预报极端大误差区间（图 9b）。

《气象》待刊



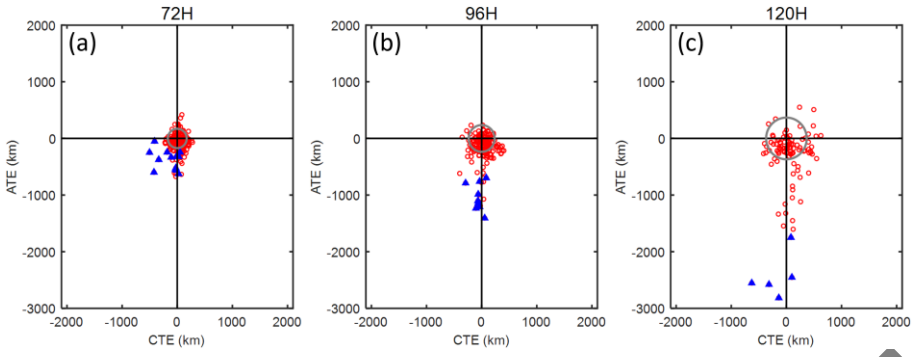
注：箱线图箱须上、下端分别为最大、最小值，箱体上、中、下横线分别表示第 75%、50%、25%分位数。

图 9 2025 年台风 （a）“夏浪”“罗莎”“娜基莉”路径，（b）全体和 3 个台风 72~120 h 路径预报误差

Fig.9 (a) Tracks of typhoons Halong, Krosa and Nakri, and (b) boxplot of 72–120 h track forecast errors for all typhoons and the three typhoons Halong, Krosa and Nakri in 2025

3.1.1 台风“夏浪”3~5d 路径预报误差

2025 年台风“夏浪”于 10 月 5 日凌晨在西北太平洋洋面生成，向西北方向移动，6 日下午开始经历快速加强，7 日夜间加强为超强台风级，并逐渐转向东北方向移动。其 72、96 和 120 h ATE 与 CTE 显示（图 10），72 h 表现为预报偏左（CTE < 0 km）、偏慢（ATE < 0 km）；96 h 移速预报显著偏慢（ATE < −600 km），误差远高于平均误差；120 h 预报时效出现极端大误差（高达 2500 km，图 10c），体现在“夏浪”长时效路径预报中存在系统性偏误，预报挑战性极强。上述 120 h 路径预报误差对应的起报时刻为 2025 年 10 月 5 日 02—14 时，此时为“夏浪”生成后的初始阶段，气旋强度弱（18 m s^{-1}）。



注：红色圆圈为 2025 年，蓝色三角为台风“夏浪”误差，灰色圆圈示意过去 5 年（2020—2024 年）平均误差。

图 10　2025 年台风（a）72 h，（b）96 h，（c）120 h 时效路径预报误差 ATE 和 CTE 散点图

Fig.10　Scatter plots of ATE and CTE for Typhoon Halong track forecast errors under (a) 72 h, (b) 96 h and (c) 120 h lead times

3.1.2“夏浪”结构和路径预报偏差分析

业务预报中，预报员主要参考数值模式及 AI 模型 2025 年 10 月 4 日 20 时起报的资料开展预报。EC 模式的 96 h、120 h 路径预报误差分别高达 1322 km、2682 km，与 CMA-GFS、风清预报效果相当；NCEP、AIFS 的预报误差较小（图略）。

对比 ECMWF 的 500 hPa 高度场与 850 hPa 风速的预报场和 ERA5 的分析场，ECMWF 预报 10 月 7 日夜间“夏浪”的环流尺度较大，强度偏弱，底层中心附近最大风速仅为 13 级，中心最低气压为 965 hPa，定位较实况偏西南，其北侧带状副热带高压（以下简称副高）维持（图 11a）；ERA5 分析实际“夏浪”快速发展为个头小、强度强的台风，北侧带状高压断裂，台风在副高中北上（图 11b）；实际 10 月 7 日 20 时“夏浪”增强为超强台风，底层中心附近最大风速高达 16 级，中心最低气压 940 hPa。ECMWF 预报“夏浪”8 日至 9 日夜间将发展为环流较大的台风，在均压场中缓慢移动（图 11c，11e），ERA5 分析实际“夏浪”维持核心紧凑的小尺度结构，快速移动至副高北侧并在副高北缘引导气流的作用下快速东移（图 11d，11f），移速高达 37 km h^{-1}。由上可见，数值模式对台风结构和强度的预报会影响路径预报。此外，“夏浪”活动期间，ECMWF 预报其东南侧约 1200 km 处有热带扰动发展，该距离为“藤原效应”的临界距离，两个低涡系统逆时针互旋，致使“夏浪”移速偏慢（图 11a，11c，11e）。

台风在均压场、鞍形场等环流形势下，引导气流弱，便可能导致极端大误差，例如 2016 年台风“米雷”、2018 年台风“万宜”、2021 年台风“南川”（王晴等，2022）和 2024 年台风“珊珊”（王晴等，2024），该类台风多活跃于 10—11 月，此时副高呈带状分布，台风处于两高之间或副高之中，即位于鞍形场或均压场内，中纬度系统相互作用弱，台风引导气流弱、方向多变。受限于模式对边界层通量、积云对流等物理过程的参数化方案的适用性，模式对弱引导气流的细微变化捕捉能力有限，时间越长、误差累积越明显，此时台风内核结构对移动路径的影响权重提升。针对该类型的台风，一方面需分析各模式和 AI 模型长时效预报特性、确定集成方案，在业务环境下进行集成并导出参考路径提供实时参考；另一方面应继续总结大

《气象》待刊

误差形成的关键天气型，捕捉预报订正的信号。

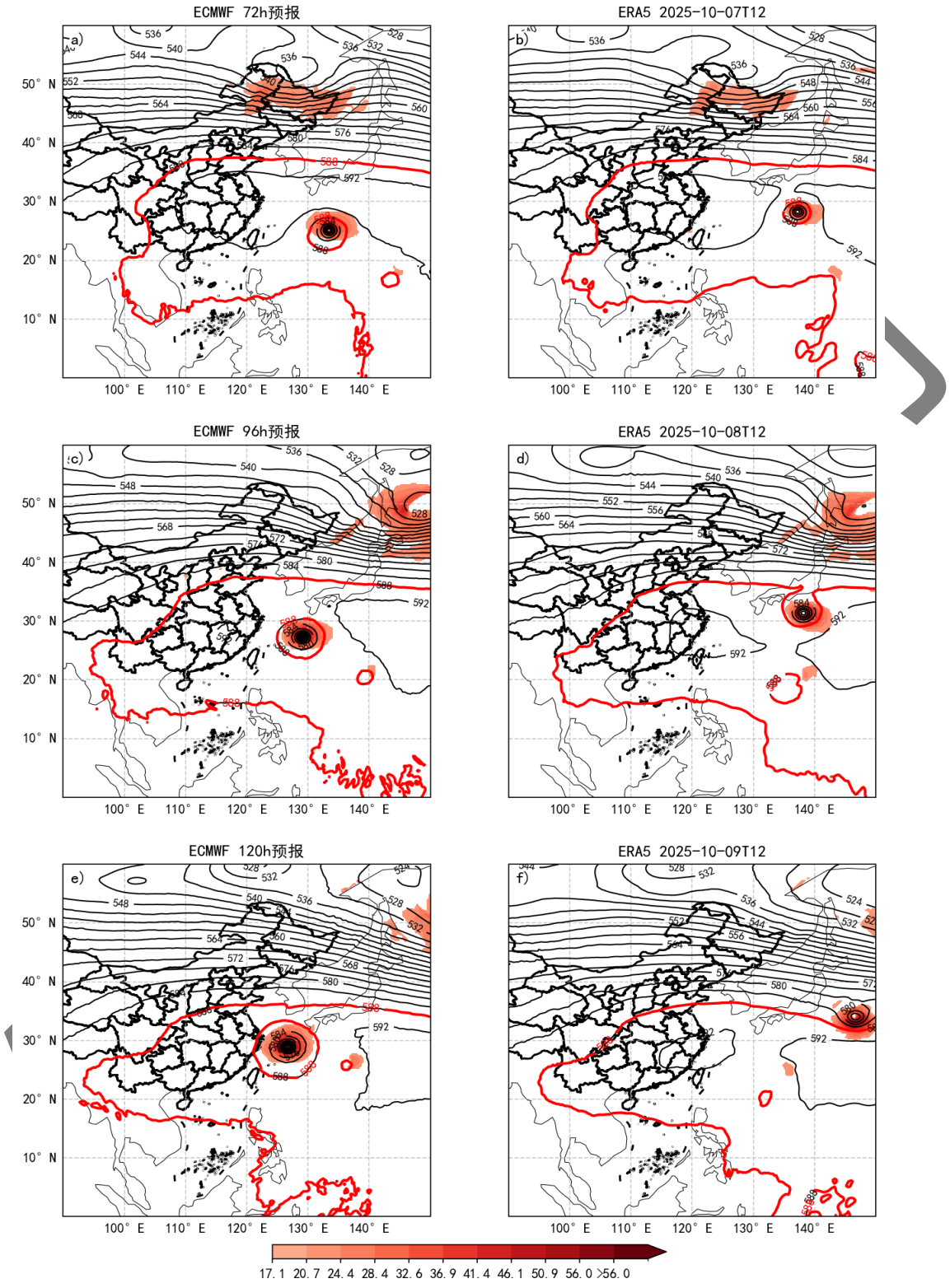


图 11　2025 年 10 月 4 日 20 时起报 ECMWF 确定性模式（a）72 h，（c）96 h，（e）120 h 预报时效预报场与同时刻 ERA5 再分析资料（b）7 日 20 时，（d）8 日 20 时，（f）9 日 20 时 500 hPa 高度场（等值线，单位：dagpm）、850 hPa 水平风速（填色：8 级以上）

Fig.11　ECMWF deterministic forecasts initialized at 20:00 BT 4 with (a) 72 h, (c) 96 h and (e) 120 h lead times, and ERA5 reanalysis data of 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and 850 hPa horizontal wind speed (colored: wind force ﹥ Scale

8) at (b) 20:00 BT 7, (d) 20:00 BT 8 and (f) 20:00 BT 9 October 2025

3.2 “桦加沙”“麦德姆”内核精细结构演变及分析

在目前的台风业务预报中，环境因子及下垫面的作用可以由数值模式或 AI 大模型刻画，但台风精细结构的演变难以被捕捉。这使得包括眼墙、螺旋雨带在内的台风精细结构的研究成为推进台风预报进展的一个重要方面。随着经济社会快速发展，特别是城镇化导致沿海地区人口密度增加，登陆台风灾害的易发区域更加脆弱、防护难度更大（Qian et al，2022），亟需提升台风精细结构监测预报能力（端义宏，2015；Duan et al，2019；Lei，2020；Wang et al，2023），而近海台风的精细结构演变分析与预报订正是提升预警精度的关键。

西北太平洋强台风发展过程中，大约有 80%的台风在主眼墙外侧产生闭合的外眼墙，形成台风双眼墙（Terwey and Montgomery，2008；程小平等，2021）。与单眼墙台风相比，控制双眼墙台风强度变化的动力和热力过程更为复杂，外眼墙形成阶段台风最大风速半径显著外扩，主眼墙逐渐瓦解崩溃，台风强度受到抑制甚至减弱；伴随着外眼墙向内收缩替换主眼墙并组织发展，会使得台风强度再次得到加强（Sitkowski et al，2011）。眼墙替换过程引发的强度波动幅度大且迅速，极难精准预报（Molinari et al，2019）。此外，眼墙的尺度影响强风暴雨的范围和分布，台风眼直径大意味着七级、十级风圈的范围显著扩展，风灾破坏范围广且更持久。

3.2.1 台风“桦加沙”“麦德姆”过程

2025 年 9 月下旬至 10 月上旬，第 18 号台风“桦加沙”和第 21 号台风“麦德姆”先后在菲律宾以东洋面生成，之后均稳定地沿西偏北路径移入我国南海，并在广东西部沿海登陆（图 5），给华南近海及沿海省份带来了严重的风雨灾害。中央气象台对“桦加沙”“麦德姆”分别发布了台风橙色预警和红色预警，路径和强度预报误差较小，防台措施充分，未发生人员伤亡事故。但由于台风风雨影响极端，且存在先后影响的叠加效应，仍造成了较为严重的经济损失和社会影响（表 2）。台风“桦加沙”登陆后叠加天文大潮，风暴潮增水导致广东珠海、江门、阳江等地出现海水倒灌，给农田、渔业、海洋牧场设施等造成重大影响。台风“麦德姆”期间广东湛江电力中断，海水倒灌。

3.2.2 “桦加沙”登陆前精细结构与环境场

2025 年台风“桦加沙”登陆前在南海北部维持双眼墙结构，其北侧外眼墙于 9 月 23 日 23 时开始影响广东南部沿海（图 12a,12b），随着台风西偏北移动靠近粤西沿海，至 24 日 05 时外眼墙收缩、Moat 区变窄（图 12c,12d）。24 日 05:18 星载合成孔径雷达反演洋面风场显示，“桦加沙”眼区被内眼墙包裹，对应风速超过 16 级（图 13a），内眼墙呈波数为 1 的不对称，最大风速区（黑色等值线）集中在西北象限，内眼墙外侧嵌套着外眼墙，该外眼墙最大风速区（黑色等值线）集中在东北象限，呈现出明显的内核区不对称

《气象》待刊

性。在这之后的 12 h “桦加沙”内眼墙逐渐崩溃，至 16:40 登陆时刻内眼墙完全消失（图 12c,12d），外眼墙在收缩的过程中北侧受到粤西地形的摩擦，导致结构崩溃，台风强度大幅减弱。24 日 18:34 星载合成孔径雷达反演洋面风场揭示登陆后台风环流显著减弱，此时，主体大风区已大幅收缩，12 级以上的大风区（≥ 32.7 m • s^{-1}）仅在粤西沿岸有小范围残余（图 13b）。

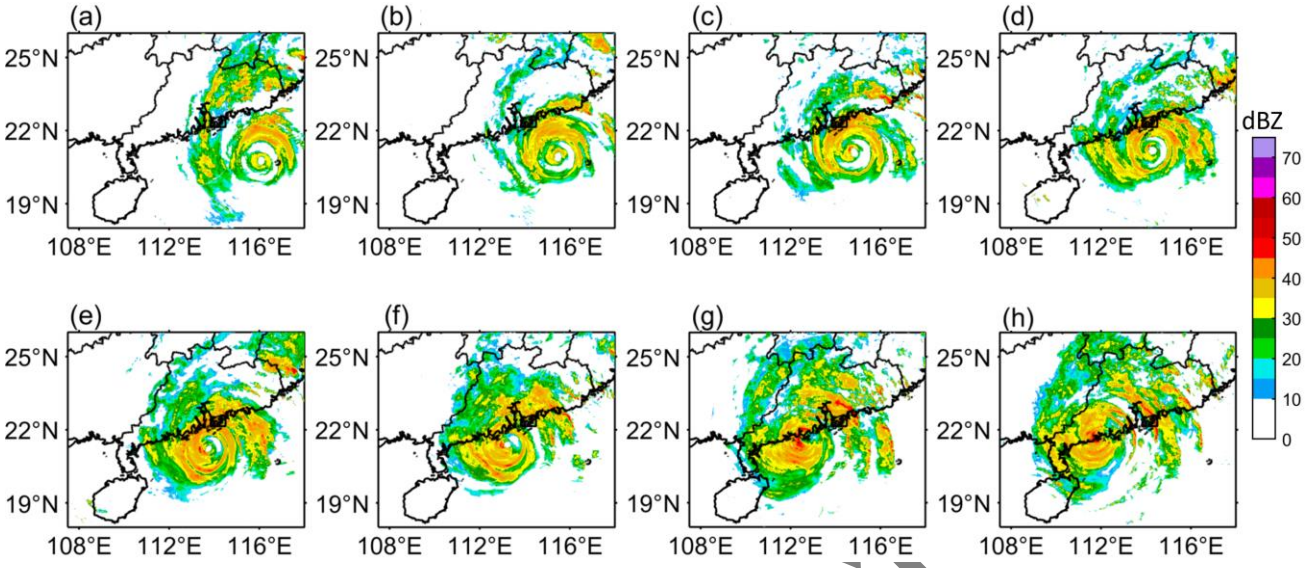
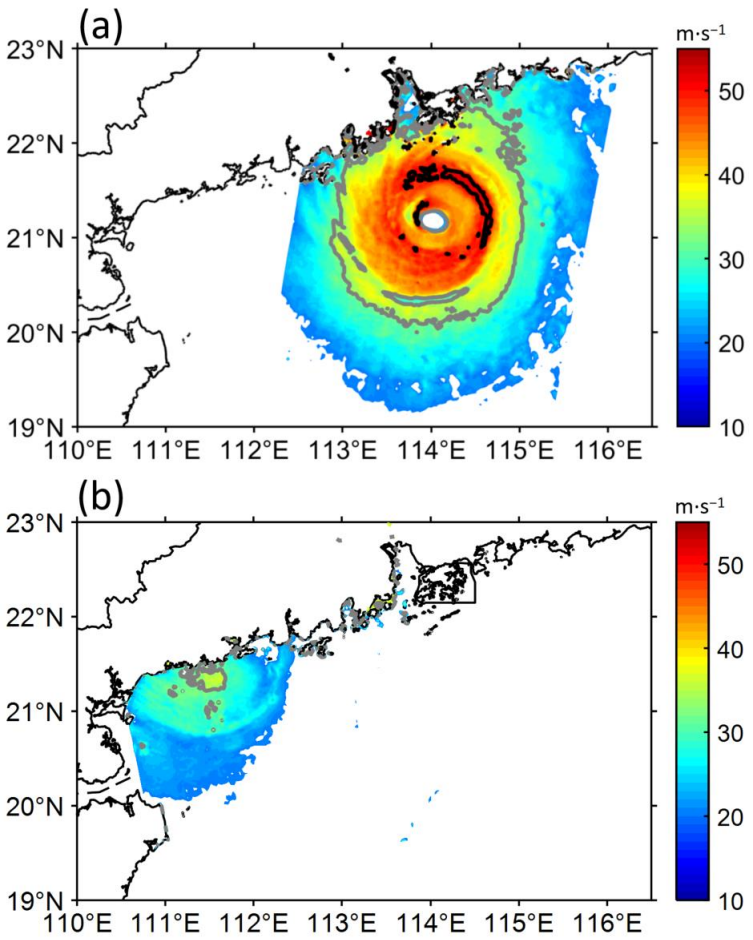


图 12　2025 年 9 月（a）23 日 20 时至 24 日 17 时雷达组合反射率因子

Fig.12 Radar composite reflectivity factors from 20:00 BT 23 to 17:00 BT 24 September 2025

《气象》



注：黑色、灰色等值线分别为 51.0 m • s^{-1}、32.7 m • s^{-1} 风速。

图 13　2025 年 9 月 24 日（a）05:18 和（b）18:34 星载合成孔径雷达反演洋面风速

Fig.13 Sea surface wind speeds retrieved by spaceborne synthetic aperture radar at (a) 05:18 BT and (b) 18:34 BT 24 September 2025

台风内核精细结构的演变对登陆前短时临近预报时效内的台风强度预报至关重要，环境场影响台风结构变化，进而直接反映在台风的强度演变中。在 9 月 24 日“桦加沙”移向华南近海的过程中（图 14a），中低层干冷空气已先期侵入华南西部，24 日 08—20 时低层假相当位温与风场分析显示（图 14），925 hPa 干冷空气自北向南延伸至粤西沿海，并从台风西北侧卷入台风低层中心附近，加速了内眼墙的崩溃，风眼快速填塞。ECMWF 确定性模式预报干冷空气强度较实况明显偏弱，导致该模式对“桦加沙”近岸快速减弱预估不足，进而高估“桦加沙”登陆强度（图略）。

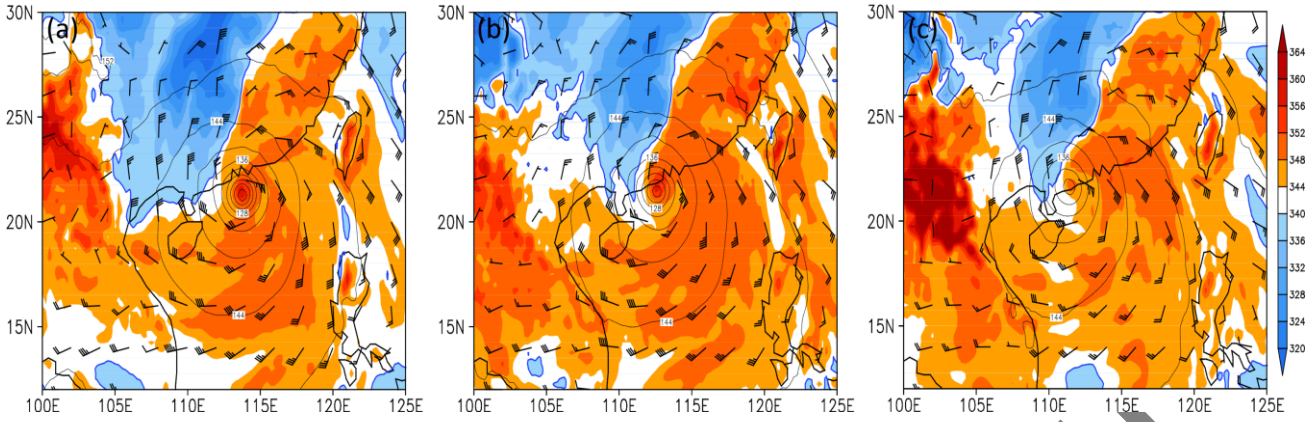


图 14　2025 年 9 月 24 日（a）08 时、（a）14 时和（b）20 时 ERA5 再分析资料 925 hPa 假相当位温（填色）、风场（风羽）和 850 hPa 高度场（等值线，单位：dagpm）

Fig.14 ERA5 reanalysis data of 925 hPa pseudo-equivalent potential temperature (colored), wind field (barb) and 850 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT and (c) 20:00 BT 24 September 2025

台风靠近华南沿海时陆地地形摩擦削弱了环流的强度，与台风内核双眼墙结构的演变相结合，干冷空气的侵入加速风眼填塞与内眼墙崩溃，导致“桦加沙”登陆前强度快速减弱。中央气象台在“桦加沙”登陆前两天（9 月 22 日 18 时）发布的橙色预警中提到，其将在广东近海由超强台风级（55 m • s^{-1}）减弱至登陆时的强台风级或超强台风级（45~52 m • s^{-1}），预报较实际登陆强度（40 m • s^{-1}）偏强。在登陆前一天（923 日 18 时）的预警中进一步调低登陆强度为台风级或强台风级（38~48 m • s^{-1}），强度预报范围包含了实际的登陆强度。虽然这两次的预警都较好地预报了“桦加沙”的近海减弱，并随着预报时效临近有效订正了登陆强度，但仍需注意台风双眼墙结构演变导致的内眼墙崩溃后的强度快速减弱。

3.2.3 “麦德姆”登陆前精细结构演变

相比之下，台风“麦德姆”呈单眼墙结构，眼区较大，眼墙直径达 90~110 km，在 10 月 5 日 02—08 时移向海南岛东北部近海的过程中眼墙进一步收缩（图 15a~15c）。期间星载合成孔径雷达反演洋面风场显示眼壁附近 12 级大风范围宽广（图 16a）。在“麦德姆”登陆过程中，广东西部、广西南部、海南北部等地受到宽广眼墙过境影响（图 15d~15f）出现 8~14 级阵风，个别岛礁阵风高达 15~17 级，且大风长时间维持。“麦德姆”穿过雷州半岛后，北部湾东北部海面、广西南部沿海、广东西南部沿海仍受 12 级大风影响（图 16b），此时可看出眼墙呈收缩趋势（图 15g~h）。在眼墙收缩的过程中，“麦德姆”在北部湾海面维持台风级，邻近登陆时减弱为强热带风暴等级。

10 月 4 日白天至 5 日白天“麦德姆”登陆前强度近海增强，在此过程中台风南侧与南海西南季风相连，输送持续的水汽和潜热通量使台风结构收缩、强度增强（图略）。中央气象台在“麦德姆”登陆前两日（10 月 3 日 18 时）的预警中预报登陆强度为台风级或强台风级（40~45 m s^{-1}），与实际登陆强度（42 m s^{-1}，强台风级）相符。在登陆前一日（10 月 4 日 18 时）的红色预警中预计登陆强度为强台风级（42~48m s^{-1}），强度预报范围包含了实际的登陆强度。两次预警都较好地估计了“麦德姆”的近海加强过程。

气象公报

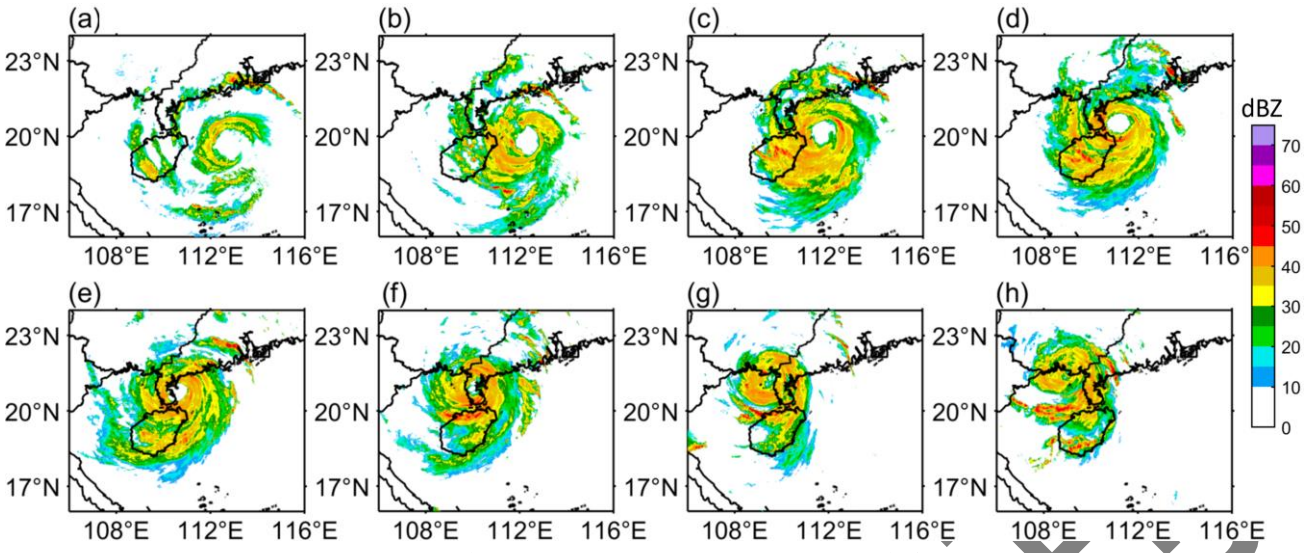
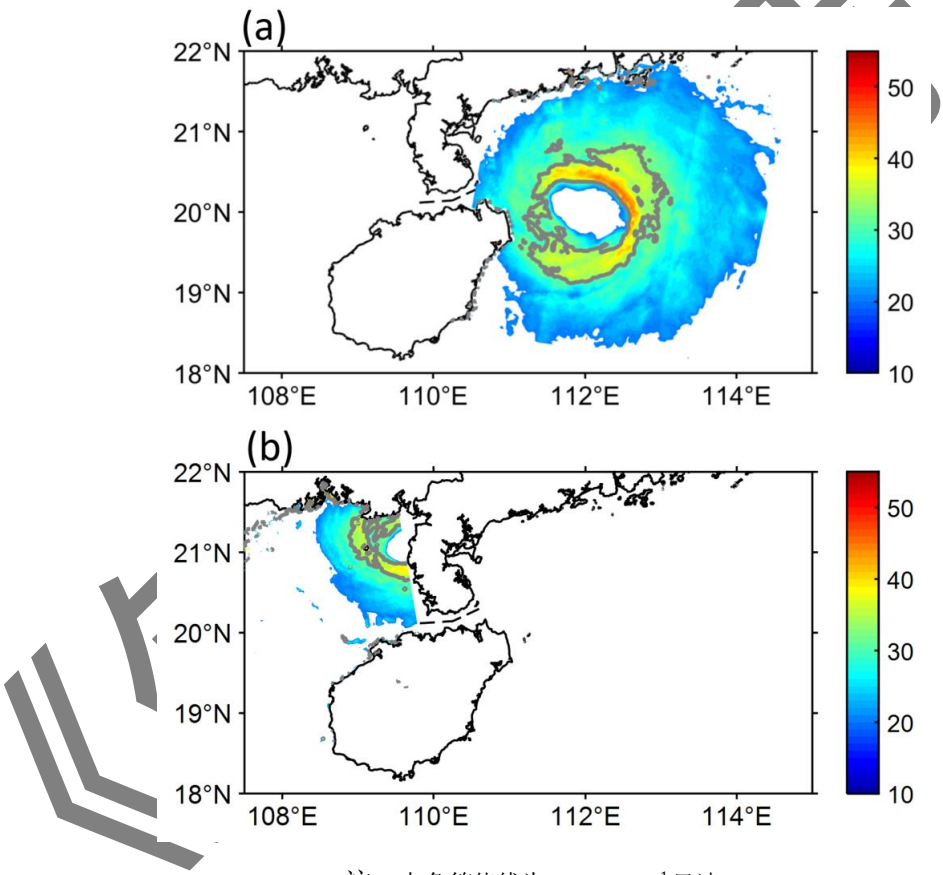


图 15　2025 年 10 月 5 日（a）02—23 时雷达组合反射率因子

Fig.15 Radar composite reflectivity factors from 02:00 BT to 23:00 BT 5 October 2025



注：灰色等值线为 32.7 m • s^{-1} 风速。

图 16　2025 年 10 月 5 日（a）05:25 和（b）18:57 星载合成孔径雷达反演洋面风速

Fig.16 Sea surface wind speeds retrieved by spaceborne synthetic aperture radar at (a) 05:25 BT and (b) 18:57 BT 5 October 2025

由于“桦加沙”登陆前处于眼墙替换过程中，内眼崩溃导致外眼墙环绕“空心”的眼区，“麦德姆”的椭圆形大眼也是“空心”的表现。张煜敏等（2025）统计显示，在登陆广东的“空心”台风容易集中出现在夏末至秋季。业务预报中借助观测资料对台风内核精细结构的演变进行及时分析，有利于结合环境因子把握台风登陆前短时临近时效内强度的演变，对于改进并提高登陆台风的预报准确率、提供精细化强风

预报及预警服务具有实际应用价值。

4. 结论与讨论

对 2025 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）2025 年西北太平洋和南海共生成 28 个台风，较气候平均偏多 2.9 个。生成源地明显偏西约 6.0°，偏北约 2.9°。8 个台风在南海生成，较多年平均偏多 3.5 个。夏季台风强度整体偏弱，秋季台风强度略偏强。全年整体活跃程度明显偏弱，南海夏季风偏强阶段台风多群发。共有 11 个台风登陆我国，登陆个数偏多 3.8 个，登陆地段集中于华南地区，登陆广东次数最多。

（2）预报误差分析表明，2025 年中央气象台 24 h、48 h 时效台风预报水平高。24 h 主观路径预报平均误差仅为 57 km，优于日本（68 km）和美国（69 km）。24 h 台风强度预报误差是 3.3 m s^{-1}，优于日本（3.6 m s^{-1}）和美国（3.9 m s^{-1}）。96 h、120 h 长时效路径预报有提升空间。

（3）台风生成初期长时效路径预报仍是业务预报的主要挑战。弱引导气流环境下易出现 96 h、120 h 的极端预报误差，模式对台风结构与强度的模拟偏差直接影响路径预报。ECMWF 预报台风“夏浪” 强度偏弱、尺度偏大，在副高中缓慢移动，对移速预报偏慢，未能准确刻画其快速增强、尺度偏小、快速北移东进的特征。10—11 月副高多呈带状分布，台风处于均压场时引导气流微弱且多变，中纬度系统作用弱，路径预报不确定性剧增。模式难以捕捉弱引导气流细微变化，时效越长误差累积越显著；同时模式对台风尺度刻画有误，台风自身内核结构对路径影响显著增强。业务上需通过分析模式预报特征优化路径预报集成方案，总结关键误差天气型以实现有效订正。

（4）台风内核精细结构演变的预报是业务强度、结构预报的难点。“桦加沙”与“麦德姆”均为秋季南海西行台风，路径稳定，先后影响华南。南下冷空气与西南季风的相对影响使得秋季台风的环境场复杂，台风内核精细结构呈现出不同的演变特征。“桦加沙”受到华南沿海陆地摩擦及干冷空气侵入的作用，未在登陆前完成双眼墙替换过程，双眼墙结构演变过程中干冷空气加速了内眼墙崩溃和风眼填塞，是其登陆前强度快速减弱的直接原因。“麦德姆”虽然呈现大眼结构，但在登陆前眼墙半径收缩，近海加强。借助沿海雷达组网、星载合成孔径雷达等多源资料进行台风内核精细结构监测，可帮助捕捉眼墙等内核关键结构的演变特征，为短时临近时效预报订正提供核心依据，弥补数值模式预报的不足。

《气象》待刊

参考文献

程小平, 费建芳, 李湘成, 等, 2021. 台风双眼墙形成及眼墙替换过程的研究进展[J]. 地球物理学报, 64(6): 1857-1868. Cheng X P, Fei J F, Li X C, et al, 2021. The research progress in secondary eyewall formation and eyewall replacement cycle of typhoon[J]. Chin J Geophys, 64(6): 1857-1868 (in Chinese).

端义宏, 陈联寿, 许映龙, 等, 2012. 我国台风监测预报预警体系的现状及建议[J]. 中国工程科学, 14(9): 4-9. Duan Y H, Chen L S, Xu Y L, et al, 2012. The status and suggestions of the improvement in the typhoon observation, forecasting and warning systems in China[J]. Eng Sci, 14(9): 4-9 (in Chinese).

端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 等, 2014. 台风登陆前后异常变化的研究进展[J]. 气象学报, 72(5): 969-986. Duan Y H, Chen L S, Liang J Y, et al, 2014. Research progress in the unusual variations of typhoons before and after landfalling[J]. Acta Meteor Sin, 72(5): 969-986 (in Chinese).

端义宏, 2015. 登陆台风精细结构的观测、预报与影响评估[J]. 地球科学进展, 30(8): 847-854. Duan Y H, 2015. Monitoring and forecasting of finescale structure and impact assessment of landfalling typhoons[J]. Adv Earth Sci, 30(8): 847-854 (in Chinese).

高建芸, 余锦华, 张秀芝, 等, 2011. 南海-西北太平洋季风槽强度变化的特征及其与热带气旋活动的关系[J]. 热带气象学报, 27(1): 63-73. Gao J Y, Yu J H, Zhang X Z, et al, 2011. On relationship between variation of the monsoon trough intensity in the South China Sea-Western North Pacific and tropical cyclone activities[J]. J Trop Meteor, 27(1): 63-73 (in Chinese).

李泽椿, 张玲, 钱奇峰, 等, 2020. 中央气象台台风预报业务的发展及思考[J]. 大气科学学报, 43(1): 10-19. Li Z C, Zhang L, Qian Q F, et al, 2020. The development and consideration of typhoon forecast operation of National Meteorological Center[J]. Trans Atmos Sci, 43(1): 10-19 (in Chinese).

王海平, 吕心艳, 王晴, 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).

王晴, 向纯怡, 贾莉, 等. 2026. 2025 年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. 海洋气象学报, 46(1):149−164. Wang Q, Xiang C Y, Jia L, et al, 2026. Overview of typhoon activities over western North Pacific and the South China Sea in 2025[J]. J Mar Meteor, 46(1):149−164 (in Chinese).

王晴, 许映龙, 董林, 等, 2022. 2012—2021 年中央气象台台风 3～5 d 路径预报误差分析[J]. 海洋预报, 39(6): 25-33. Wang Q, Xu Y L, Dong L, et al, 2022. Analysis of typhoon track forecast errors for 3~5 days by Central Meteorological Observatory from 2012 to 2021[J]. Mar Forecasts, 39(6): 25-33 (in Chinese).

王晴, 张增海, 董林, 等, 2024. 2024 年夏季海洋天气评述[J]. 海洋气象学报, 44(4): 112-124. Wang Q, Zhang Z H, Dong L, et al, 2024. Summer 2024 marine weather review[J]. J Mar Meteor, 44(4): 112−124 (in Chinese).

张康波, 冯明轩, 雷德义, 2019.台风“利奇马”防御工作回顾[J].中国防汛抗旱, 2019, 29(11):1−3, 8. Zhang K B, Feng M X, Lei D Y. 2019. Review of the defense work of Typhoon Lekima No.201909[J].China Flood & Drought Management, 29(11): 1-3, 8(in Chinese).

张煜敏, 程正泉, 蔡景就, 等, 2025. 登陆广东空心台风客观识别及基本特征[J]. 热带气象学报, 41(5): 670-680. Zhang Y M, Cheng Z Q, Cai J J, et al, 2025. Objective identification and basic characteristics of landfalling hollow typhoon in Guangdong[J]. J Trop Meteor, 41(5): 670-680 (in Chinese).

郑彬, 李春晖, 林爱兰, 等, 2016. 南海夏季风活动指标的定义及应用[J]. 热带气象学报, 32(4): 433-443. Zheng B, Li C H, Lin A L, et al, 2016. Definition and application of indices for the South China Sea summer monsoon activities[J]. J Trop Meteor, 32(4): 433-443 (in Chinese).

Duan Y H, Wan Q L, Huang J, et al, 2019. Landfalling tropical cyclone research project (LTCRP) in China[J]. Bull Amer Meteor Soc, 100(12): ES447-ES472.

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Q J R Meteor Soc, 146(730):

1999-2049.

Lei X T, 2020. Overview of the development history of China's typhoon research and operational work in the past century[J]. Sci China Earth Sci, 63(3): 362-383.

Molinari J, Zhang J A, Rogers R F, et al, 2019. Repeated eyewall replacement cycles in Hurricane Frances (2004)[J]. Mon Wea Rev, 147(6): 2009-2022.

Peng X D, Fei J F, Huang X G, et al, 2017. Evaluation and error analysis of official forecasts of tropical cyclones during 2005-14 over the western north Pacific. Part I: storm tracks[J]. Wea Forecasting, 32(2): 689-712.

Qian C H, Li Y, Xu Y L, et al, 2024. Tropical cyclone monitoring and analysis techniques: a review[J]. J Meteor Res, 38(2): 351-367.

Qian Y, Chakraborty T C, Li J F, et al, 2022. Urbanization impact on regional climate and extreme weather: current understanding, uncertainties, and future research directions[J]. Adv Atmos Sci, 39(6): 819-860.

Sitkowski M, Kossin J P, Rozoff C M, 2011. Intensity and structure changes during hurricane eyewall replacement cycles[J]. Mon Wea Rev, 139(12): 3829-3847.

Terwey W D, Montgomery M T, 2008. Secondary eyewall formation in two idealized, full-physics modeled hurricanes[J]. J Geophys Res: Atmos, 113(D12): D12112.

Wang Q, Zhao D J, Duan Y H, et al, 2023. Super Typhoon Hinnamnor (2022) with a record-breaking lifespan over the western North Pacific[J]. Adv Atmos Sci, 40(9): 1558-1566.

Wang Q, Zhao D J, Duan Y H, et al, 2024. Observational fine-scale evolutionary characteristics of concentric eyewall Typhoon Doksuri (2023)[J]. Atmos Res, 310: 107630, doi: 10.1016/j.atmosres.2024.107630.

Wang Q, Zhao D J, Wang H, et al, 2025. Observed eccentric eyewall structure in Super Typhoon Doksuri (2023) and its potential impact on intensity change[J]. Environ Res Lett, 20(5): 054021, doi: 10.1088/1748-9326/adc826.

Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. J Atmos Oceanic Technol, 31(2): 287-301.

Zhang C, Zou X L, Tan Z M, 2023. Eye and eyewall radii and track of typhoon Trami (2018) derived from Advanced Himawari Imager (AHI) brightness temperature observations[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 61: 4104311.

Zhang Q, Wu L G, Liu Q F, 2009. Tropical cyclone damages in China 1983-2006[J]. Bull Am Meteor Soc, 90(4): 489-495.

《气象》待刊