

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).

2023 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析^{*}

聂高臻 许映龙 王海平

国家气象中心,北京 100081

提 要: 利用 1949—2023 年中国气象局台风最佳路径资料、2023 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 逐 6 h 再分析资料等,对 2023 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:2023 年的台风生成频数和登陆频数均偏少,台风极值强度和登陆强度均偏强,台风生成源地偏东,南海台风偏少,夏季台风登陆数偏少,台风登陆地段集中,台风深入内陆,影响范围广,灾害影响重。2023 年中央气象台 24 h 台风路径预报平均误差创历史新低;1~4 d 内中央气象台路径预报误差高于日本气象厅和美国联合台风预警中心;1~5 d 时效的台风强度预报误差有所增加,预报优于日本气象厅,差于美国联合台风预警中心。台风杜苏芮和海葵分别给华北和华南带来了大范围极端降水,台风残涡的长时间维持、良好的水汽供应均有可能是形成极端降水的重要原因。对台风卡努的分析表明,热带大尺度天气系统的演变、双台风效应都能造成台风路径的转折。

关键词: 台风,活动特征,预报难点,残涡,路径转折,极端降水

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.122701

Analysis of the Characteristics and Forecast Difficulties of Typhoon Activities in the Western North Pacific in 2023

NIE Gaozhen XU Yinglong WANG Haiping

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Using the best track data of China Meteorological Administration (CMA) from 1949 to 2023, real-time operational forecast data of typhoon track and intensity in 2023 from National Meteorological Centre (NMC) of CMA, and the ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), we analyze the main characteristics of typhoon activities in the Western North Pacific in 2023. The results show that in 2023, the numbers of generated typhoons and the landfall typhoons were both at a relatively low level, but the extreme intensity of typhoons and landfall intensities were stronger. The generation source areas of typhoons shifted eastward, with fewer typhoons born in the South China Sea and fewer typhoons making landfall in summer. The landfall localities of typhoons were more concentrated, and the landfall typhoons travelled further inland, causing widespread and severe damages. Although the 24 h typhoon track forecast errors by NMC in 2023 reached a historic low point, the track forecast errors within 1—4 d were higher than those of the Japan Meteorological Agency (JMA) and the U. S. Joint Typhoon Warning Center (JTWC). The intensity forecast errors for typhoons within 1—5 d lead time increased compared to last five years' levels, but still better than JMA and worse than JTWC. The large challenges

^{*} 国家重点研发计划(2023YFC3107902)、风云卫星应用先行计划(FY-APP-ZX-2023.01)共同资助

2024 年 4 月 15 日收稿; 2025 年 1 月 20 日收修定稿

第一作者:聂高臻,主要从事热带气旋预报和研究. E-mail:niegaozhen@cma.gov.cn

通讯作者:许映龙,主要从事热带气旋预报和研究. E-mail:xuyl@cma.gov.cn

in typhoon forecasting in 2023 lay in the inland penetration and prolonged duration of Typhoon Doksuri which brought extreme precipitation in North China, and the remnant vortex of Typhoon Haikui triggering extreme precipitation in South China. Analysis of Typhoon Khanun indicates that, the evolution of large-scale tropical weather systems and the dual-typhoon effect may lead to the two sharp turns of the typhoon's track.

Key words: typhoon, activity characteristic, forecast difficulty, remnant vortex, twist and turn in typhoon track, extreme precipitation

引言

台风作为影响我国的极端天气事件之一,时常对我国的社会经济以及人民生活安全构成重大威胁(梁必骥等,1995)。台风可以带来极端降水,从而引发严重的洪涝灾害。有研究表明,极端台风降水事件与恩索有一定关系(Wang et al,2020),而气候变化的背景有可能会加剧台风引发的降水灾害(Nayak and Takemi,2020)。随着经济的发展,台风灾害损失也呈现加重的趋势(许映龙等,2010;钱传海等,2012;陈联寿等,2012;高歌等,2019)。2023 年台风杜苏芮为我国带来极端降水和灾害;此外 2023 年出现了多个路径停滞、打转的台风,这些都给台风的预报和灾害防御提出了挑战。为了有效提升台风预报的准确性,减少和缓解台风带来的损失,有必要深入分析每年的台风活动特征及预报过程中遇到的困难和挑战。针对年度台风预报难点做深入分析,系统梳理预报思路,对于积累预报经验、提高预报技术水平具有重要意义(高拴柱等,2018;董林等,2019;吕心艳等,2021;周冠博等,2021;向纯怡等,2022)。

使用中国气象局提供的 1949—2023 年台风最佳路径资料,中央气象台、日本气象厅和美国联合台风预警中心提供的官方实时业务资料,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)模式预报产品,通过对 2023 年西北太平洋和南海台风活动的综合分析,旨在总结台风路径和强度预报的误差,重点讨论业务预报中遇到的难点问题,为未来改进台风预报技术和提高预报准确性提供参考。

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 2023 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

2023 年,西北太平洋和南海共有 17 个台风(热

带风暴级及以上级别)生成(图 1),较多年平均(1949—2022 年,下同;26.9 个)偏少 9.9 个(图 1),较气候平均(1991—2020 年,下同;25.1 个)偏少 8.1 个。2023 年是 1949 年以来台风生成第三少年份,仅次于 1998 年和 2010 年(均生成 14 个)。

2023 全年除春季外,其他三季台风生成数均偏少,其中秋季(9—11 月)偏少最为显著。秋季共生成 4 个(图 2),较气候平均(10.7 个)偏少 6.7 个;夏季(6—8 月)生成 10 个,较气候平均(11 个)偏少 1 个。

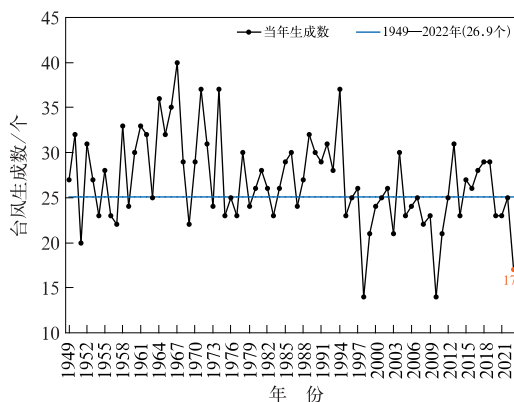


图 1 1949—2023 年西北太平洋和南海逐年台风生成个数

Fig. 1 Annual numbers of typhoons generated in the Western North Pacific and the South China Sea in 1949–2023

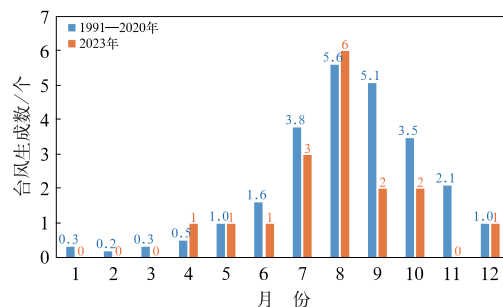


图 2 1991—2020 年平均逐月与 2023 年逐月台风生成个数

Fig. 2 Monthly averaged numbers of typhoons generated in 1991–2020 and in 2023

1.1.2 生成源地特征

全年17个台风的平均生成位置(15.0°N、140.5°E)较多年平均(16.1°N、136.3°E)偏南1.1°,偏东约4.2°(图3a)。其中仅有2个(台风泰利、三巴)在南海生成(图3b),较多年平均(4.5个)偏少2.5个。另外,台风多拉由中太平洋移入西北太平洋,在计算源地时取其移入西北太平洋东界的位置(即180°E)作为其源地位置。历史上15个台风(如2018年“赫克托”、2015年“哈洛拉”“基洛”等)的源地位置采用相同处理方式。考虑180°E的设定会令平均生成经度向东移动,尤其是在台风总数较少的情况下会造成更大的偏移,为排除此影响,剔除“多拉”的生成情况,即在不计算“多拉”时,16个台风的平均生成经度为138.0°E,仍然比多年平均偏东1.7°。

1.2 台风活动特征

1.2.1 强度特征

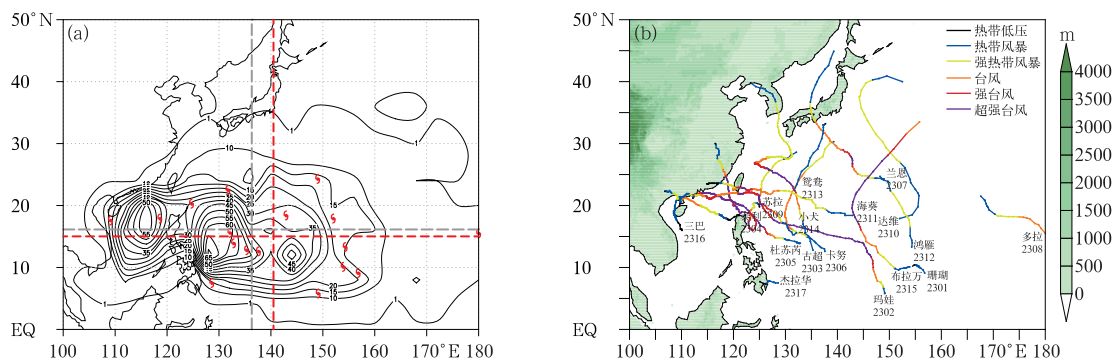
2023年西北太平洋和南海共生成8个超强台风,占比为47.1%。相比每年4.6个的气候平均值(占当年总台风数的18.3%),2023年不仅超强台风生成个数明显偏多,占比更是气候平均的1.5倍。2023年另有5个台风最大强度达到台风级,与气候平均个数(4.9个)相持平。全年达到(含超过)台风级的台风个数为13个,比气候平均(14.6个)略偏少,然而所占比例(76.5%)高于气候平均(58.2%)。

全年台风的平均生命史最大强度为 $44.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (14级),较多年平均值 $40.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (13级)偏强 $4.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,较气候平均值 $37.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (13级)偏强 $7.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

Hendricks et al(2010)研究指出,大多数超强台风都会经历快速增强,而在没有经历快速增强的台风中仅有很小一部分可发展到超强台风级别(Lee et al,2016)。台风快速增强有多种不同的定义方式(Kaplan and DeMaria,2003)。当前较为广泛接受的标准是24 h台风最大风速增加达到 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 即可被认定为快速增强(Bhatia et al,2018; Kieper and Jiang,2012)。按照此标准,2023年有7个台风在其生命史中经历过快速增强(表1),且均为超强台风,占全年超强台风总数的87.5%;24 h强度增幅最大的台风是布拉万,增幅达到了 $33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;快速增强维持总时长最长的是“苏拉”,先后两次快速增强的累计时长长达72 h;从发生位置来看,2023年的快速增强均发生在24 h台风警戒区以外的西北太平洋;从发生月份来看,快速增强发生在5月、7—10月。

1.2.2 生命史和活跃程度

2023年台风累计活动时长为2591 h,由于台风生成个数偏少,累计活动时长较多年平均(4007.5 h)显著缩短了约35%(图4a)。然而因为2023年超强台风偏多、强度偏强,所以一定程度上弥补了个数偏



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2023年台风生成位置,红色和灰色虚线相交位置分别为2023年和1949—2022年平均的生成位置;图b中填色为海拔,下同。

图3 西北太平洋和南海(a)1949—2022年台风生成源地密度分布(等值线)和(b)2023年台风生成路径

Fig. 3 (a) Density distribution (contour) of typhoon generation areas in 1949–2022 and (b) tracks of typhoons generated in 2023 in the Western North Pacific and the South China Sea

表 1 2023 年西北太平洋和南海出现的台风快速增强事件

Table 1 Rapid intensification events of typhoons in the Western North Pacific and the South China Sea in 2023

编号	名称	最大 24 h 强度增幅/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	时段	持续时长/h
2302	玛娃	22	5 月 22 日 08:00 至 23 日 20:00	36
2305	杜苏芮	20	7 月 22 日 20:00 至 25 日 08:00	60
2306	卡努	17	7 月 29 日 14:00 至 30 日 20:00	30
		15	7 月 30 日 14:00 至 31 日 14:00	24
2307	兰恩	20	8 月 10 日 02:00 至 11 日 20:00	42
2309	苏拉	22	8 月 25 日 14:00 至 27 日 08:00	42
		17	8 月 29 日 02:00 至 30 日 08:00	30
2314	小犬	15	9 月 30 日 20:00 至 10 月 1 日 20:00	24
		22	10 月 1 日 08:00 至 3 日 02:00	42
2315	布拉万	33	10 月 10 日 08:00 至 12 日 08:00	48

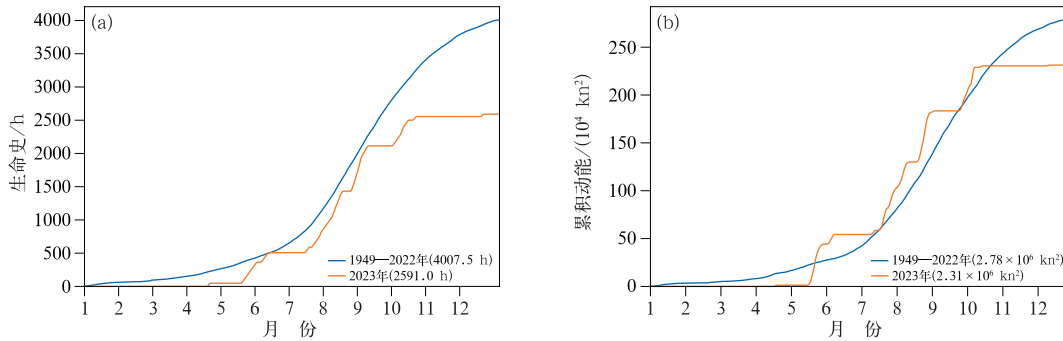


图 4 1949—2022 年与 2023 年台风(a)累计活跃时长和(b)累积动能

Fig. 4 (a) Accumulated active duration of typhoons, (b) accumulated cyclone kinetic energy of typhoons in 1949—2022 and in 2023

少对台风释放能量的不利影响。2023 年台风累积动能(ACE)为 $2.31 \times 10^6 \text{ kn}^2$, 仅比多年平均 ACE ($2.78 \times 10^6 \text{ kn}^2$) 偏低约 17% (图 4b)。

1.2.3 路径复杂

2023 年热带太平洋海温由“三峰”拉尼娜向厄尔尼诺状态转换(Nullis, 2023), 在此气候背景下, 西北太平洋夏秋季赤道高压活跃, 副热带高压(以下简称副高)形态和位置多变, 台风路径引导因素复杂, 出现多个打转或者转折台风。例如, “卡努”在行进过程中多次停滞转向, 走出了复杂的“之”字形路径; “苏拉”在菲律宾以东洋面南折、打转后趋向广东, 并在珠江口附近转向基本平行于海岸线走向移动。此外, “三巴”为历史罕有在海南岛西岸(乐东和东方)登陆的台风, 其重新进入北部湾后, 在粤桂交界处近海停滞, 之后路径南折, 又登陆雷州半岛西岸, 其路径之复杂为历史罕见(图 3b)。

1.2.4 极端降水多发

“杜苏芮”不仅在登陆前后为福建和浙江带来暴

雨, 而且在北上过程中其残余低涡环流(以下简称残涡)给华北、黄淮等地带来历史罕见的极端强降水。福建和浙江部分地区受台风本体影响出现 400~861 mm 的过程降水, 台湾屏东局地降水量超过 1400 mm。残涡北上后, 北京西部山区、河北中西部、河南北部的局部地区都出现了较大范围的 400 mm 以上的过程降水, 此外华北 250 mm 以上降水量的范围远大于台风本体在浙江和福建的降水范围。在“杜苏芮”的影响下, 福建、北京、河北、山西共有 25 个国家级气象观测站(以下简称站)日降水量破历史极值, 河北临城县过程降水量达 1003.4 mm。

“海葵”在 8 月底至 9 月上中旬影响华南地区, 且残涡在华南长时间维持。受其影响, 9 月 3—13 日, 福建东部、广东南部、广西东部和南部、海南、湖南南部、江西南部及澳门、台湾等地累计降水量为 100~300 mm, 福建东部、广东中西部、广西南部、香港及台湾东部等地部分地区为 400~902 mm, 台湾花莲局地超过 1100 mm。其中, 7—8 日粤港澳大湾区

区出现强降水,深圳市平均降水量超过 200 mm,罗湖、盐田局地超过 500 mm,香港部分地区超过 600 mm,澳门接近 200 mm;福建、广东、广西、江西等地有 17 个站降水量突破 9 月历史极值,有 6 个站突破历史极值;广东深圳 2、3、6、12、24、48、72 h 累计降水量均打破 1952 年有气象记录以来相应历史极值;香港天文台最大小时降水量(158.1 mm)为 1884 年有记录以来香港最高纪录,赤柱 24 h 降水量(842 mm)打破了香港纪录。

1.3 登陆特征

2023 年共有 6 个台风登陆我国(登陆时中心附近最大风速达到或超过 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;图 5,表 2)。

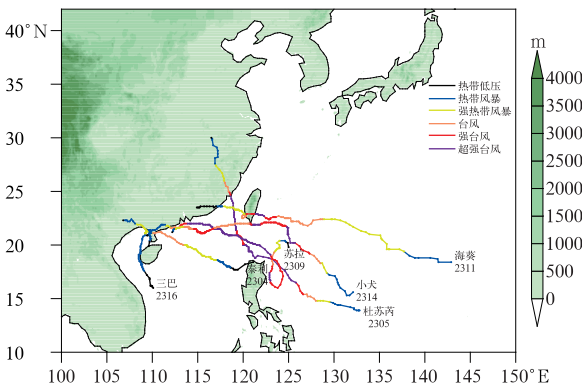


图 5 2023 年登陆我国的台风路径
Fig. 5 Tracks of typhoons making landfall in China in 2023

表 2 2023 年登陆我国的台风
Table 2 Typhoons making landfall in China in 2023

编号	名称	登陆时间/BT	登陆地点	登陆强度		灾害损失			直接影响省份
				风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	等级	受灾人口/ 万人	紧急转移/ 万人	因灾死亡/ 人	
2304	泰利	7 月 17 日 22:20	广东湛江	38	台风	91.7	24.7	0	广东、广西、海南
		7 月 18 日 05:45	广西北海	25	强热带风暴				
2305	杜苏芮	7 月 28 日 09:55	福建晋江	50	热带风暴	295	75.6	0	浙江、安徽、福建、江西、广东
2309	苏拉	9 月 2 日 03:30	广东珠海	45	强台风	224	143	2	福建、广东、广西、海南
		9 月 2 日 13:50	广东阳江	28	强热带风暴				
2311	海葵	9 月 3 日 15:30	台湾台东	50	强台风	193	43.8	6	福建、江西、广东
		9 月 5 日 05:20	福建东山	20	热带风暴				
2314	小犬	9 月 5 日 06:45	广东饶平	18	热带风暴	7.6	8.2	0	广东、海南
		10 月 5 日 08:20	台湾屏东	48	强台风				
2316	三巴	10 月 19 日 09:00	海南东方	20	热带风暴	151	9.4	1	广东、广西、海南
		10 月 20 日 09:45	广东遂溪	20	热带风暴				
		10 月 20 日 19:40	海南临高	13	热带低压				

1.3.1 登陆台风偏少偏强

2023 年全年登陆台风个数较多年平均(7.0 个)偏少 1.0 个,较气候平均(7.2 个)偏少 1.2 个。夏季登陆台风较气候平均偏少 2.7 个(图 6);其中 8 月无台风登陆,为 1949 年以来第 7 个无台风登陆的 8 月(之前为 1949 年、1950 年、1977 年、1983 年、2010 年和 2014 年)。秋季登陆台风较气候平均偏多 1.7 个。2023 年 6 个登陆台风的平均登陆强度(统计每个台风第一次登陆强度,下同)为 $38.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (13 级),较多年平均值 $32.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (11 级)偏强 $5.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,较气候平均值 $32.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (11 级)偏强 $5.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.3.2 登陆地段集中

从登陆地段来看,2023 年 6 个登陆台风先后共

计 11 次(不含热带低压)登陆我国沿海,登陆地点均

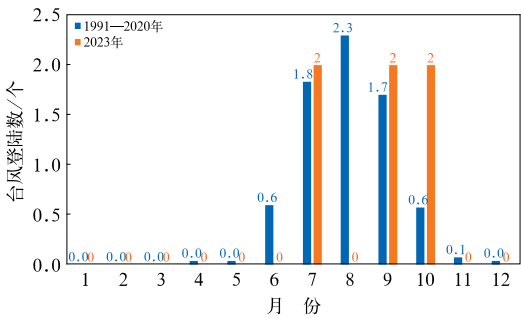


图 6 1991—2020 年平均逐月与 2023 年逐月登陆我国台风个数

Fig. 6 Monthly averaged numbers of typhoons making landfall in China in 1991—2020 and in 2023

位于华南地区,包括广东 5 次、台湾 2 次、福建 2 次、海南 1 次、广西 1 次(图 5)。

1.3.3 风雨影响及灾害

在 2023 年登陆我国的台风中,有多个给我国带来强风雨影响。其中,“杜苏芮”深入内陆,风雨严重影响东南沿海省份和华北地区;“苏拉”和“海葵”相继影响华南,给福建和广东带来强风、暴雨和地质灾害。

“杜苏芮”及其残涡影响范围广,先后影响了 13 个省份。其环流在登陆后维持了约 73 h,远超我国登陆台风平均滞留陆地时间(20 h)。受其影响,福建、浙江、北京、河北等地出现严重城市内涝和山洪灾害,多地旅游、交通、电力行业以及农业生产受到影响。“海葵”于 9 月 3—5 日先后 3 次在台湾、福建、广东登陆,且残余云系长时间在东南沿海维持。其环流和残涡于 3—7 日影响福建 5 d,4—11 日影响广东 8 d,8—13 日影响广西 6 d。由于“苏拉”和“海葵”在华南降水影响区域高度重合,时间基本前后衔接,导致福建、广东等地 26 条河流发生超警,多地出现城乡内涝,广西玉林多地发生山体滑坡,造成人员伤亡和大量经济损失。

在台风直接影响下,2023 年 8 个省份共计 966.6 万人受灾,236 万人紧急避险转移,76.8 万人次紧急转移安置,5100 余间房屋倒塌,3.4 万间不同程度损坏,农作物受灾面积 34.55 万 hm^2 ,其中绝收面积 2.84 万 hm^2 。总体数据表明,2023 年台风灾害造成的损失低于近 5 年均值。

2 2023 年台风预报误差分析

2.1 路径预报误差

以中国气象局 2023 年台风最佳路径为准,对 2023 年台风预报路径预报误差进行检验,结果表明,2023 年中央气象台对西北太平洋及南海生成的 17 个台风的 24、48、72、96、120 h 时效主观路径预报误差分别为 64.2、115.4、175.0、269.0、362.1 km(图 7a;陈国民等,2024),与过去 5 年(2018—2022 年)各时效的平均误差(73、129、186、240、323 km)相比,24、48、72 h 误差分别减小了 12.1%、10.5% 和 5.9%;96、120 h 误差均增加了 12.1%。其中,中央气象台 24 h 路径预报平均误差创历史新低(陈国民等,2024)。中央气象台预报除 120 h 时效上略好于日本气象厅,其他时效均差于日本气象厅(24~120 h 误差分别为 60.1、108.3、165.7、255.0、364.6 km)和美国联合台风预警中心(24~120 h 误差分别为 63.7、108.0、164.0、236.7、328.5 km)(陈国民等,2024)。

2.2 强度预报误差

2023 年中央气象台 24、48、72、96、120 h 时效强度预报误差分别为 5.3、7.3、7.3、7.7、9.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7b),与过去 5 年(2018—2022 年)各时效的平均误差(3.8、5.2、5.7、6.2、6.3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)相比,24~120 h

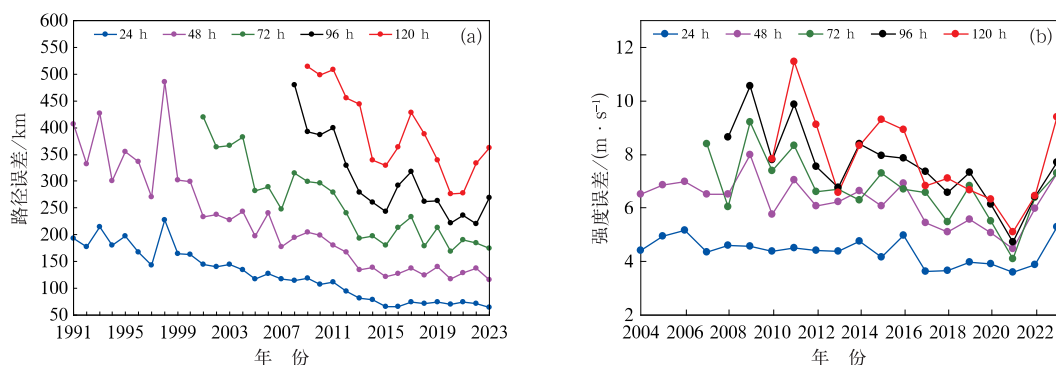


图 7 中央气象台逐年台风预报误差

(a)1991—2023 年平均路径预报误差,(b)2004—2023 年平均强度预报误差

Fig. 7 Annual average typhoon (a) track forecast errors in 1991—2023 and (b) intensity forecast errors in 2004—2023 by National Meteorological Centre

的强度预报误差分别上升了1.5、2.1、1.6、1.5、3.1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与同类主观预报相比,中央气象台强度预报优于日本气象厅(24~120 h强度误差分别为5.5、7.5、7.9、9.2、10.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),差于美国联合台风预警中心(24~120 h强度误差分别为4.4、5.7、6.2、7.0、7.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(陈国民等,2024)。

3 2023年台风预报难点分析

2023年台风活动具有台风陆上维持时间长、极端降水多发、台风路径转折等特点。这些特点也为台风业务预报带来了挑战。

3.1 台风杜苏芮残涡北上、维持和降水

7月29日至8月1日,“杜苏芮”残涡在京津冀地区引发暴雨,4 d过程累计降水量比常年同期偏多651.5%,超过京津冀地区夏季降水常年值的一半(支蓉等,2024),这种极端降水事件在华北地区的气候背景下并不罕见,但其强度和持续时间都创下新的纪录(杨舒楠等,2023;张江涛等,2023;符娇兰等,2023;张芳华等,2023)。在业务预报中,要准确预报这种降水的极端性对于预报员来讲是非常困难的。

“杜苏芮”残涡对华北极端降水的贡献与其环流长时间维持有关。自7月28日台风登陆,至31日11:00残涡消散,环流维持约73 h。在台风深入内陆的情况下维持如此长的时间相当少见,业务预报难度很大。有利于残涡维持的成因包括但不限于:充沛的水汽供应、良好的高空出流条件和相对平整的下垫面。

从台风登陆前两天的海上阶段开始,直到登陆后残涡汇入西风带消散为止,“杜苏芮”持续受到其东侧块状副高影响向偏北方向移动。以7月29日08:00为例,此时“杜苏芮”减弱后的低压环流位于500 hPa副高西侧,与副高之间的强梯度形成了强偏南风气流(图8a),引导台风向偏北方向快速移动。28日10:00登陆后,由于浙闽丘陵的下垫面摩擦作用,台风强度迅速减弱。29日08:00减弱为热带低压,之后很快停编。自停编后至30日08:00,其残涡在北上过程中途经长江中下游平原及开阔的华北平原,几乎没有受到地形阻碍(图8b),因此才能观

测到长时间保持的完整风场环流(图略)。

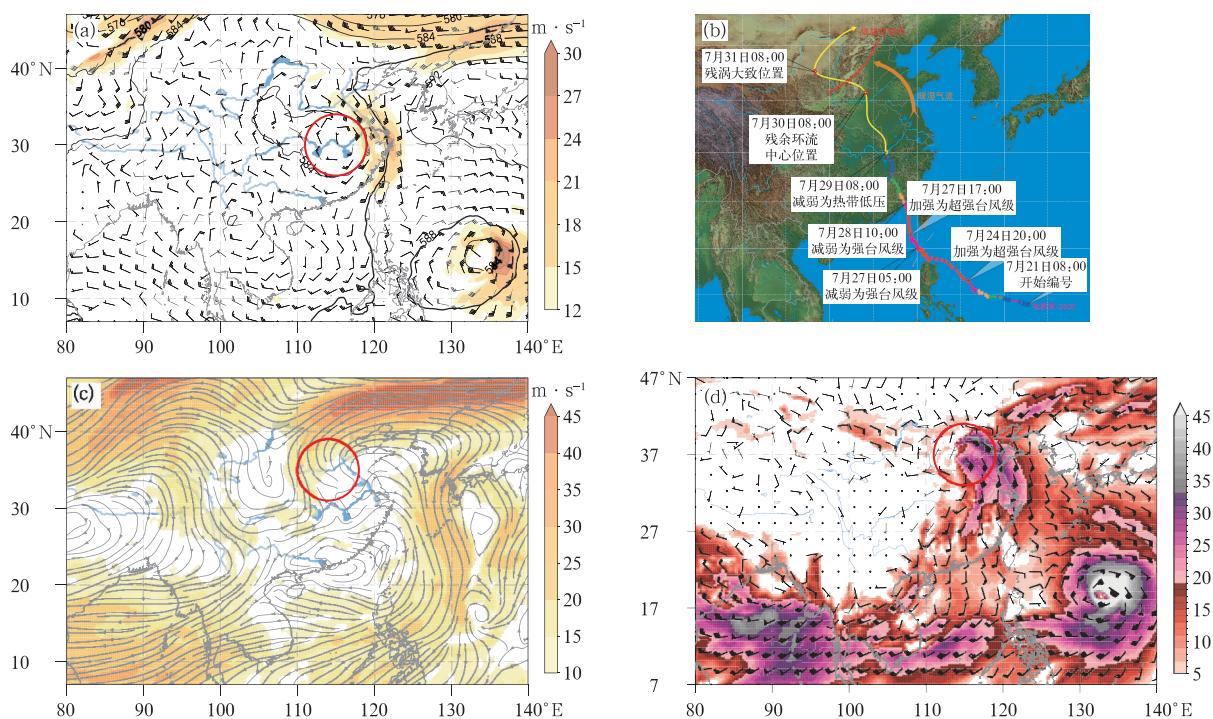
从动力条件来看,29日20:00,在200 hPa上我国北方地区有一支强劲的高空急流,急流入口区右侧恰好位于华中地区北部至华北地区一带,即涵盖了台风残涡中心附近的区域(图8c),其伴随的强辐散有助于残涡的维持。高空急流形成后维持至31日凌晨逐渐减弱消失,且在此期间整体位置变化不大,与残涡的维持有良好的时空相关性。

水汽通量的大小与登陆台风在陆地上的维持时长和降水量有重要关系(陈联寿和许映龙,2017)。30日华北平原低空盛行偏南风,为残涡带来充沛的水汽供应(图8d),导致降水落区的南边界和东边界均为水汽净流入。这一方面为华北降水提供了必要的水汽条件,另一方面也通过释放潜热为残涡的维持发挥重要作用(Jiang et al, 2019; Schumacher and Rasmussen, 2020)。

“杜苏芮”给华北带来的极端降水与低层大气的地形强迫抬升、充沛的水汽输送以及中纬度高空系统有直接关系。其残涡进入华北后逐渐减弱,形态对称性越来越差。当残涡移至燕山—太行山脉附近时,由于地形对低层大气的阻挡和强迫抬升,30日在河北至山西一带低层逐渐转变为一条东北—西南走向的暖式切变线(图8b),东南来向的暖湿气流在切变线附近发生辐合,同时高空急流轴入口在此处上空叠加,进一步为对流发展提供了有利条件。综合以上地形、水汽、高空强迫等有有利因素,最终在燕山—太行山地形迎风坡产生极端降水。

3.2 台风海葵极端降水

“海葵”于8月28日08:00在西北太平洋洋面生成,之后向西到西偏北方向移动,在接近台湾岛时,强度发生快速加强,9月3日10:00加强为超强台风级,15:30以强台风级在台湾台东沿海登陆($50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 940 hPa),向西穿过台湾岛进入台湾海峡,在台湾岛西南部近海经历短暂回旋之后继续转向西移,于5日05:20和06:45先后登陆福建东山($20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 995 hPa)和广东饶平沿海($18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 995 hPa),6日05:00减弱为热带低压,17:00中央气象台对其停止编号。停编后,“海葵”残涡维持并继续向西南方向缓慢移动,中心先后穿过珠江三角洲和粤西,持续影响广东、广西、江西、湖南等地(图9);



注:红色圆圈标识台风残涡所在位置。

图 8 2023 年 7 月 (a) 29 日 08:00 的 500 hPa 风场(风羽和填色)和位势高度场(等值线,单位: dagpm), (b) 21 日 08:00 至 31 日 11:00 台风杜苏芮及其残涡移动示意图, (c) 29 日 20:00 的 200 hPa 流线和风速(填色), (d) 30 日 08:00 的 925 hPa 风场(风羽)和水汽通量(填色,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 (a) The 500 hPa wind (barb and colored) and geopotential height (contour, unit: dagpm) at 08:00 BT 29, (b) illustration of the movement of Typhoon Doksuri and its remnant vortex from 08:00 BT 21 to 11:00 BT 31, (c) 200 hPa streamline and wind speed (colored) at 20:00 BT 29 and (d) 925 hPa wind (barb) and water vapor flux (colored, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 08:00 BT 30 July 2023

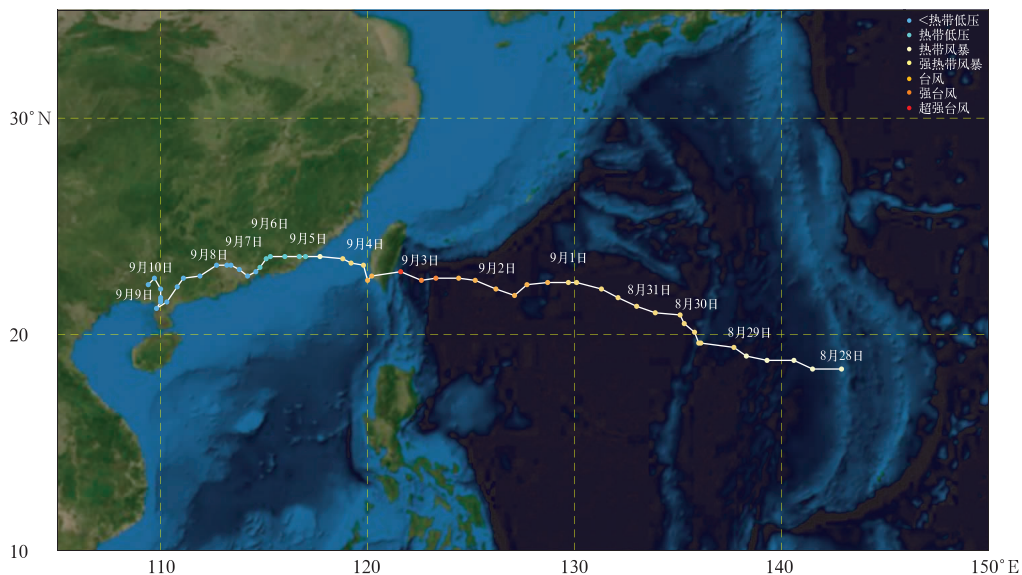


图 9 2023 年台风海葵及其残涡路径

Fig. 9 Track of Typhoon Haikui and its remnant vortex in 2023

其残涡在广东沿海一带维持时长达5 d。

“海葵”降水过程复杂,按照时间顺序可以分为四个阶段:第一阶段,9月4—5日,降水主要出现在福建和广东东部,降水落区分布与地形一致性高,期间由于台风外围与冷空气结合造成福州出现极端降水。第二阶段,6日,台风登陆后在福建和广东引起的降水;这一阶段降水相对深入内陆,强度相比第一阶段较弱。第三阶段,7—9日,随着残涡沿广东海岸线向西偏南方向移动,在季风的配合下,降水重新增强,大湾区出现极端降水;这一阶段是降水最强、落区范围最大的阶段。第四阶段,10—11日,降水再次减弱。

“海葵”登陆后处于两个高压之间,缺乏明确的引导气流致使其移动缓慢。由图10可见,相比于6日20:00,8日08:00残涡南侧的西南季风显著增强北上,这是第三阶段降水重新增强的重要原因。西南季风为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。在有持续季风供应充足水汽的条件下,降水释放的潜热会持续加热大气,又进一步有助于残涡的维持。

尽管“海葵”残涡长时间维持、移动缓慢且有西南季风提供的充沛水汽,均为其形成极端降水的重要成因,但这些条件并不能充分解释降水的极端性。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。

3.3 台风卡努路径两次停滞和转折

“卡努”于7月28日在西北太平洋上生成,生成

后向西北方向移动,期间经历了快速加强过程,由强热带风暴级加强为超强台风级。此后,“卡努”移动路径发生了两次大角度的转向过程:第一次是8月3日夜间至4日上午,在距浙江沿海约290 km的东海南部停滞,然后由西北方向转向东偏北方向缓慢移动;第二次是6日夜间至8日早晨,在日本九州岛以南洋面停滞,然后由偏东方向转向北偏西方向移动(图3b)。

从预报的角度来看,“卡努”路径的两次转折都属于“剧烈调整”(图11):自7月26日20:00至30日08:00,各家主观预报和ECMWF确定性模式稳定地预报“卡努”将在浙江中北部沿海登陆;然而,30日12:00开始,主、客观预报先后调整为其将在东海近海转向偏东方向,而后趋向日本南部近海。在“卡努”完成第一次转向之后,8月4日主、客观预报基本准确地预报出了第二次转向的时间和方向。在这两次停滞和转向过程中,数值模式对于形势场和台风路径的预报都存在迅速的大幅调整,分析调整的成因并评估其可信程度,在预报工作中是一个必须面对的挑战。在数值模式中,ECMWF确定性模式的调整最为突然,调整前后的模式预报差异更为明显,因此使用该模式预报的环流形势场对台风转向的成因作进一步分析。

对于第一次(8月3—4日)转向,模式在7月30日前后起报的台风路径预报结论存在剧烈调整。一般来说台风路径预报的颠覆性调整有两个可能的原因:第一,环流形势预报在该时段产生了突变式的调整;第二,相似的环流形势下,由于引导气流不明确,导致台风路径走向不同方向并在之后将差异快速放

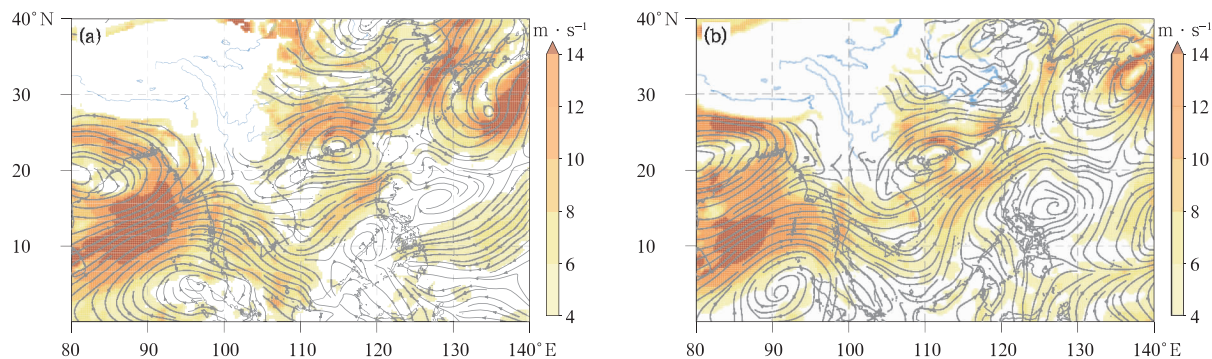


图10 2023年9月(a)6日20:00,(b)8日08:00的850 hPa流线和风速(填色)

Fig. 10 The 850 hPa streamline and wind speed (colored) at

(a) 20:00 BT 6 and (b) 08:00 BT 8 September 2023

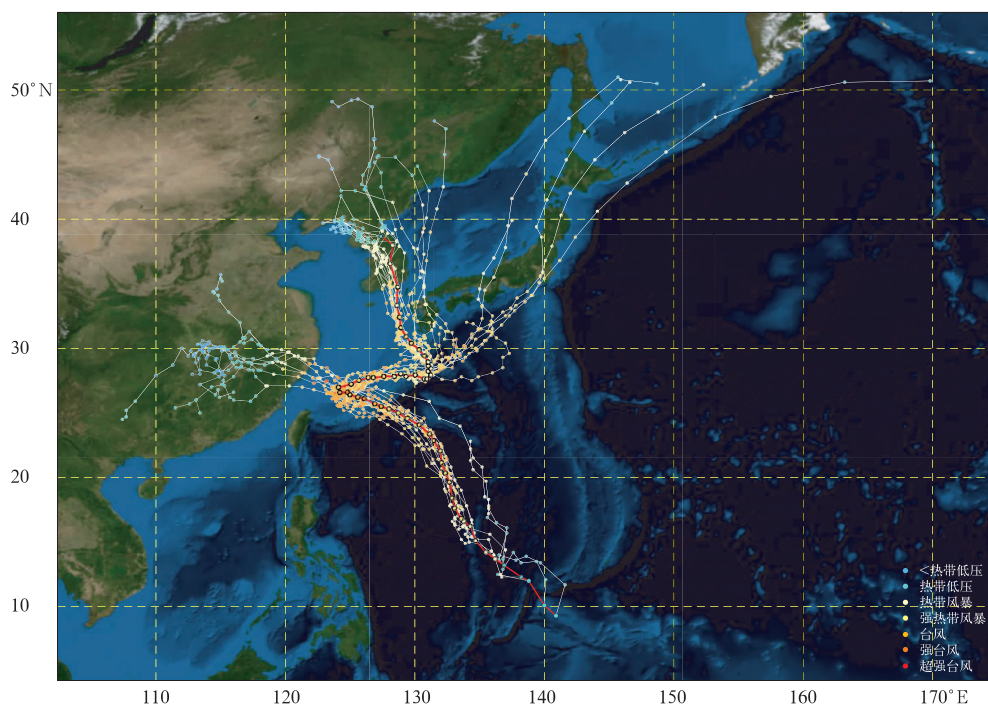


图 11 2023 年 7 月 26 日 20:00 至 8 月 11 日 14:00 ECMWF 模式台风卡努路径预报

Fig. 11 The track forecasts of Typhoon Khannun by ECMWF model from 20:00 BT 26 July to 14:00 BT 11 August 2023

大。对比 7 月 30 日和 31 日 08:00 起报的 8 月 2—4 日 588 dagpm 线位置, 可以看到, 首先两次起报的 588 dagpm 线形态和位置在 8 月 2—4 日不存在根本性的跃变(图 12), 因而可以排除环流形势突变造成预报剧烈调整的可能; 其次, 分析两次起报预报的 8 月 4 日 588 dagpm 线形态差异, 7 月 31 日起报调

整后北侧高压坝打通, 限制了台风进一步向北移动的分量, 但是北侧高压坝的存在也会让台风倾向于更快地向西移动直至登陆浙江, 因此存在其他因素制约了北侧高压坝将台风向西引导的倾向。

由 8 月 4—5 日 850 hPa 流场(图 13)可见, 赤道高压显著向北涌进, 在台风东侧与副高合并, 在此形

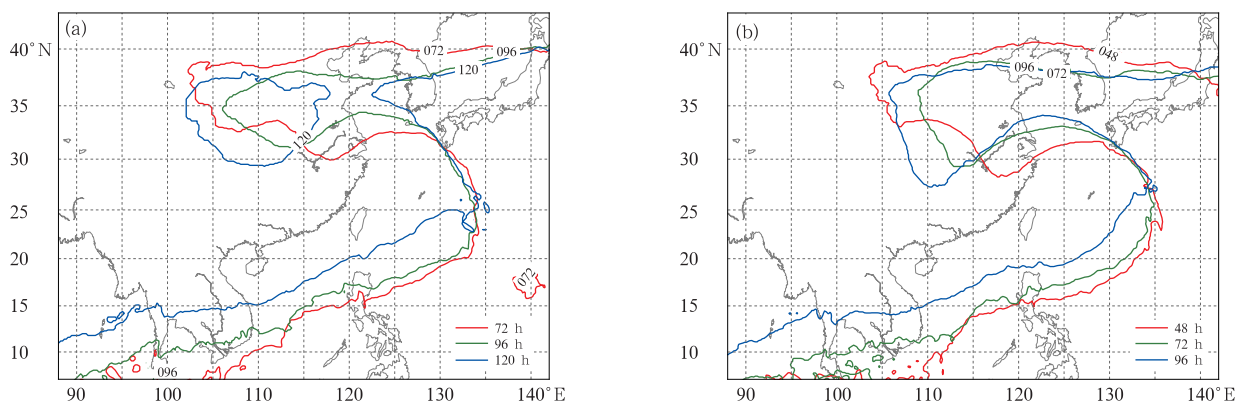


图 12 ECMWF 模式 2023 年 7 月(a)30 日和(b)31 日 08:00 起报的不同时效 588 dagpm 线

Fig. 12 Forecast of 588 dagpm lines at different lead-times by ECMWF model initiated at (a) 08:00 BT 30 and (b) 08:00 BT 31 July 2023

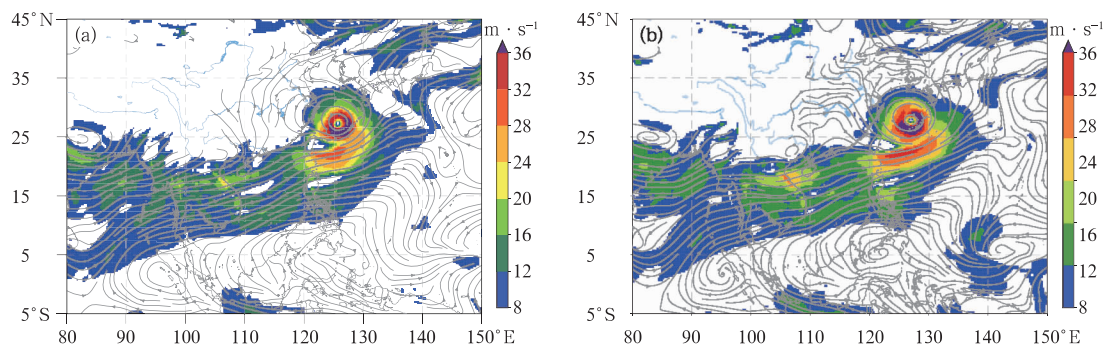


图13 2023年8月(a)4日20:00,(b)5日08:00

850 hPa 流线和风速(填色)

Fig. 13 The 850 hPa streamline and wind speed (colored) at

(a) 20:00 BT 4 and (b) 08:00 BT 5 August 2023

势下台风南侧气压梯度增大,在850 hPa上台风主要受其南侧偏西气流引导;台风南侧低空急流区流线密度进一步增大,且风速进一步加大,850 hPa台风南侧引导气流逐渐主导了台风向东偏北转向的移动趋势。这次转向的影响因素提示预报员,预报中应时刻关注赤道附近天气系统的演变。

当“卡努”完成第一次路径转折后,500 hPa环流形势发生较大变化,体现在8月5日以后,台风北侧高压坝迅速消退,副高减弱东退。5—7日,在500 hPa上台风处于典型的鞍型场中(图略),同时其南侧赤道高压衰减南退,因此“卡努”虽然仍处于南侧偏西风的引导下,但由于偏西风引导气流减弱,故其向东移动缓慢。另外,在其东侧和东南方向1500~2000 km处热带低压和热带扰动活跃,这些热带低

压系统也可能在一定程度上使得“卡努”产生了互旋效应,对其在向东移动时的轻微南落和停滞产生贡献。

8月8日08:00,“兰恩”在距离“卡努”东偏南约1900 km处生成,生成后其在副高引导下向偏西方向移动。任素玲等(2007)研究表明,台风可以通过能量频散引起正压罗斯贝波向中高纬度的传播,因此西行台风可在其西北方向激发出位势高度的正变高,从而使副高加强西伸。由图14可见,伴随着“兰恩”(位于145°~150°E附近)的加强和向西移动,其北侧副高也加强西伸。此时恰巧“卡努”位于副高西侧,“卡努”与副高之间的气压梯度增加,台风东侧风速显著增大,因而副高逐渐成为“卡努”转向北上并逐渐加速移动的主导因素。

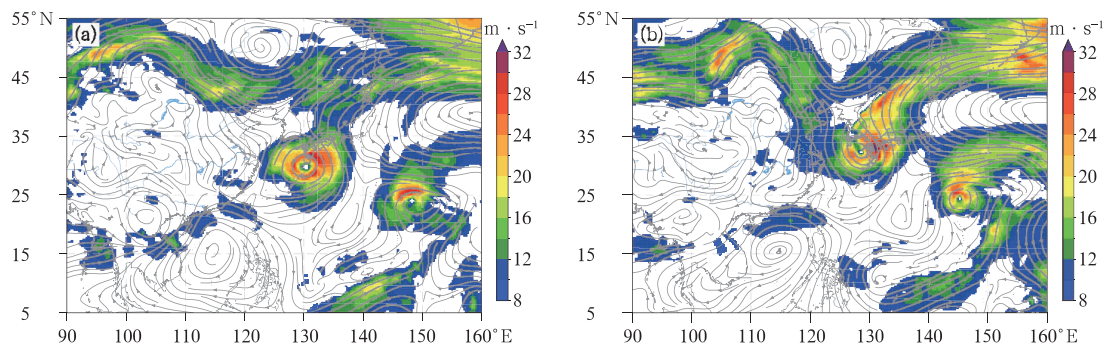


图14 2023年8月(a)8日和(b)9日20:00

500 hPa 流线和风速(填色)

Fig. 14 The 500 hPa streamline and wind speed (colored) at

(a) 20:00 BT 8 and (b) 20:00 BT 9 August 2023

4 结论与讨论

对 2023 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)2023 年生成 17 个台风,是 1949 年以来生成台风第三少年份,相应的当年台风生命史累计时长严重偏短,而由于台风强度强,台风累积能量仅略偏低。2023 年台风源地整体偏东、略偏南,南海台风偏少。全年共有超强台风 8 个,在全年台风总数中的占比是气候平均的 1.5 倍。8 个超强台风中有 7 个经历过快速增强。共有 6 个台风登陆我国,登陆个数略偏少、登陆强度偏强,登陆地段集中位于华南地区。2023 年 8 月无台风登陆,历史少见。2023 年台风残涡陆上维持时间长、极端降水多发、台风路径多转折。预报误差分析表明,2023 年 24~72 h 中央气象台主观路径预报达到历史最好水平;台风强度预报误差有所增长,但预报效果优于日本、差于美国。

(2)台风杜苏芮登陆后,残涡在陆地深入北上并长时间维持,主要原因是其路径穿过华北平原,基本未受山地丘陵的影响;整个华北平原有湿润的偏南风为其维持提供充沛的水汽;残涡上方有高空急流提供动力强迫,帮助其维持;当残涡继续北上遇到地形阻拦后,地形的强迫上升叠加高空急流的抽吸和偏南风的水汽输送,于是在燕山—太行山脉迎风坡产生极端降水。

(3)台风海葵残涡长时间在广东近海维持、移动缓慢,且有西南季风提供充沛的水汽,产生的降水释放潜热又进一步帮助其残涡维持。而对于极端降水事件,普遍性的条件难以充分解释其成因。预报极端降水事件是业务中的难点。

(4)关于台风卡努生命史中的两次转向,第一次主要是由于台风北侧形成高压坝阻挡了台风向北运动,同时赤道高压北进,在其南侧形成偏西风引导,导致台风向东转向;第二次是由于副高发展西伸,“卡努”位于副高西侧,受副高引导转向偏北方向移动。而第二次转向过程中副高的发展西伸可能与其南侧西行的台风兰恩的发展有关。

本文针对 2023 年台风活动特点进行了总结,其中台风数量偏少、台风在陆上或陆地附近的维持及其带来的降水都具有显著的年度特异性。对台风杜苏芮、海葵和卡努环流维持的天气学成因进行了初

步分析,然而这一现象的气候学成因仍有待进一步研究。此外,对于 2023 年台风生成数量显著偏少的现象开展深入的气候学成因分析,可有助于提升年度台风气候预测水平。

参考文献

- 陈国民,白莉娜,杨梦琪,等,2024. 2023 年西北太平洋热带气旋预报精度评定及定位定强审定[R]. 泉州:第十届全国台风及海洋气象专家工作组第二次会议. Chen G M, Bai L N, Yang M Q, et al, 2024. Verification on typhoons forecasts over the Western North Pacific and the South China Sea in 2023[R]. Quanzhou: The 2nd Meeting of the Tenth National Expert Working Group on Typhoon and Marine Meteorology(in Chinese).
- 陈联寿,端义宏,宋丽莉,等,2012. 台风预报及其灾害[M]. 北京:气象出版社. Chen L S, Duan Y H, Song L L, et al, 2012. Typhoon Forecast and Related Disasters[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 陈联寿,许映龙,2017. 中国台风特大暴雨综述[J]. 气象与环境科学, 40(1):3-10. Chen L S, Xu Y L, 2017. Review of typhoon very heavy rainfall in China[J]. Meteor Environ Sci, 40(1):3-10(in Chinese).
- 董林,高拴柱,许映龙,等,2019. 2017 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 45(9):1322-1334. Dong L, Gao S Z, Xu Y L, et al, 2019. Analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs on Western North Pacific in 2017[J]. Meteor Mon, 45(9):1322-1334(in Chinese).
- 符娇兰,权婉晴,麦子,等,2023. “23·7”华北特大暴雨过程雨强精细化特征及动力和热力条件初探[J]. 气象, 49(12):1435-1450. Fu J L, Quan W Q, Mai Z, et al, 2023. Preliminary study on the refined characteristics of rainfall intensity and dynamic and thermodynamic conditions in the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 49(12):1435-1450(in Chinese).
- 高歌,黄大鹏,赵珊珊,2019. 基于信息扩散方法的中国台风灾害年月尺度风险评估[J]. 气象, 45(11):1600-1610. Gao G, Huang D P, Zhao S S, 2019. Annual and monthly risk assessment of typhoon disasters in China based on the information diffusion method[J]. Meteor Mon, 45(11):1600-1610(in Chinese).
- 高拴柱,董林,许映龙,等,2018. 2016 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 44(2):284-293. Gao S Z, Dong L, Xu Y L, et al, 2018. Analysis of the characteristics and forecast difficulties of typhoons in Western North Pacific in 2016[J]. Meteor Mon, 44(2):284-293(in Chinese).
- 梁必骥,梁经萍,温之平,1995. 中国台风灾害及其影响的研究[J]. 自然灾害学报, 4(1):84-91. Liang B Q, Liang J P, Wen Z P, 1995. Study of typhoon disasters and its affects in China[J]. J Nat Dis, 4(1):84-91(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).
- 钱传海,端义宏,麻素红,等,2012.我国台风业务现状及其关键技术[J].气象科技进展,2(5):36-43. Qian C H, Duan Y H, Ma S H, et al, 2012. The current status and future development of China operational typhoon forecasting and its key technologies[J]. Adv Meteor Sci Technol, 2(5):36-43(in Chinese).
- 任素玲,刘屹岷,吴国雄,2007.西太平洋副热带高压和台风相互作用的数值试验研究[J].气象学报,65(3):329-340. Ren S L, Liu Y M, Wu G X, 2007. Interactions between typhoon and subtropical anticyclone over Western Pacific revealed by numerical experiments[J]. Acta Meteor Sin, 65(3):329-340(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).
- 许映龙,张玲,高拴柱,2010.我国台风预报业务的现状及思考[J].气象,36(7):43-49. Xu Y L, Zhang L, Gao S Z, 2010. The advances and discussions on China operational typhoon forecasting[J]. Meteor Mon, 36(7):43-49(in Chinese).
- 杨舒楠,张芳华,胡艺,等,2023.“23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J].暴雨灾害,42(5):508-520. Yang S N, Zhang F H, Hu Y, et al, 2023. Analysis on the characteristics and causes of the “23·7” torrential rainfall event in North China[J]. Torr Rain Dis, 42(5):508-520(in Chinese).
- 张芳华,杨舒楠,胡艺,等,2023.“23·7”华北特大暴雨过程的水汽特征[J].气象,49(12):1421-1434. Zhang F H, Yang S N, Hu Y, et al, 2023. Water vapor characteristics of the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 49(12):1421-1434(in Chinese).
- 张江涛,何丽华,李江波,等,2023.河北“23.7”极端暴雨过程特征及成因初探[J].大气科学学报,46(6):884-903. Zhang J T, He L H, Li J B, et al, 2023. Preliminary study on the characteristics and causes of the “23.7” extreme rainstorm in Hebei[J]. Trans Atmos Sci, 46(6):884-903(in Chinese).
- 支蓉,高辉,孙冷,2024.2023年夏季我国气候异常特征及成因分析[J].气象,50(1):115-125. Zhi R, Gao H, Sun L, 2024. Characteristics and possible causes of climate anomalies over China in summer 2023[J]. Meteor Mon, 50(1):115-125(in Chinese).
- 周冠博,董林,王海平,等,2021.2020年西北太平洋和南海台风活动概述[J].海洋气象学报,41(1):1-10. Zhou G B, Dong L, Wang H P, et al, 2021. Overview of typhoon activities over Western North Pacific and the South China Sea in 2020. J Marine Meteor, 41(1):1-10(in Chinese).
- Bhatia K, Vecchi G, Murakami H, et al, 2018. Projected response of tropical cyclone intensity and intensification in a global climate model[J]. J Climate, 31(20):8281-8303.
- Hendricks E A, Peng M S, Fu B, et al, 2010. Quantifying environmental control on tropical cyclone intensity change[J]. Mon Wea Rev, 138(8):3243-3271.
- Jiang Y Q, Wang Y, Chen C H, et al, 2019. A numerical study of mesoscale vortex formation in the midlatitudes: the role of moist processes[J]. Adv Atmos Sci, 36(1):65-78.
- Kaplan J, DeMaria M, 2003. Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic Basin[J]. Wea Forecasting, 18(6):1093-1108.
- Kieper M E, Jiang H Y, 2012. Predicting tropical cyclone rapid intensification using the 37 GHz ring pattern identified from passive microwave measurements [J]. Geophys Res Lett, 39(13): L13804.
- Lee C Y, Tippett M K, Sobel A H, et al, 2016. Rapid intensification and the bimodal distribution of tropical cyclone intensity[J]. Nat Commun, 7(1):10625.
- Nayak S, Takemi T, 2020. Typhoon-induced precipitation characterization over northern Japan: a case study for typhoons in 2016 [J]. Prog Earth Planet Sci, 7(1):39.
- Nullis C, (2023-05-03) [2023-05-04]. WMO update: prepare for El Niño [EB/OL]. <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-update-prepare-el-nino>.
- Schumacher R S, Rasmussen K L, 2020. The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems[J]. Nat Rev Earth Environ, 1(6):300-314.
- Wang L C, Yang Z N, Gu X H, et al, 2020. Linkages between tropical cyclones and extreme precipitation over China and the role of ENSO[J]. Int J Dis Risk Sci, 11(4):538-553.

(本文责编:何晓欢)