

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).

## 2019 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析<sup>\*</sup>

王海平<sup>1</sup> 董 林<sup>1</sup> 许映龙<sup>1,2</sup> 聂高臻<sup>1</sup>

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国科学院大学, 北京 100049

**提 要:** 2019 年在西北太平洋及南海共生成台风 29 个, 比多年同期平均偏多 2 个, 其中 6 个台风登陆我国, 比多年平均偏少 1 个; 台风整体强度偏弱, 但全年最强台风夏浪极值强度达到  $68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (17 级以上); 登陆台风整体强度偏弱, 但“利奇马”登陆强度强 ( $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 超强台风级)、影响重; 秋季台风生成数较常年明显偏多, 尤其是 11 月生成台风数达到 6 个。2019 年中央气象台台风路径预报平均误差与近 5 年 (2014—2018 年) 的平均误差相比, 在 24~72 h 的预报误差有所增大, 而 96~120 h 的预报误差则明显减小, 尤其是 120 h 的预报准确率创新高。与日、美官方预报相比, 中国在 24 h 和 96~120 h 的预报水平处于领先地位, 在 48~72 h 的预报误差比日本略高, 但低于美国, 与 EC 确定性模式相当。

**关键词:** 台风活动特征, 模式分歧, 多台风, 预报难点

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.08.008

## Analysis on the Characteristics of Typhoon Activity and Forecasting Difficulties in Western North Pacific in 2019

WANG Haiping<sup>1</sup> DONG Lin<sup>1</sup> XU Yinglong<sup>1,2</sup> NIE Gaozhen<sup>1</sup>

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract:** A total of 29 typhoons were generated over western North Pacific and South China Sea in 2019, 2 more than the multi-year average of 27 in the same period, of which 6 typhoons landed in China, 1 less than the normal average of 7 in the same period. The overall strength of the landfall typhoon was weak relatively, but the landfall intensity of “Lekima” was strong ( $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), reaching the scale of super typhoon. Autumn typhoons were obviously more, especially, there were 6 typhoons in November, the most typhoons in November since 1949. Compared with the average error of the past 5 years (2014—2018), the typhoon track forecast error by the National Meteorological Centre in 2019, was increased in the 24—72 h forecast, while the forecast error of 96—120 h was greatly reduced. Compared with JMA (Japan Meteorological Agency) and the JTWC (Joint Typhoon Warning Center), CMA is in the leading position in the prediction level of 24 h and 96—120 h, the prediction error of 48—72 h is equivalent to the EC deterministic model, slightly higher than that of JMA, but lower than that of the JTWC.

**Key words:** characteristics of TC, model difference, multiple typhoons, forecast difficulty

<sup>\*</sup> 中国气象局气象预报业务关键技术发展专项[YBGJXM(2018)06]、中国气象局数值预报(GRAPES)发展专项共同资助

2020 年 9 月 17 日收稿; 2021 年 6 月 28 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和研究. E-mail: wanghp@cma.gov.cn

通讯作者: 董林, 主要从事台风预报和研究. E-mail: donglin@cma.gov.cn

## 引言

台风是我国重要的气象灾害之一,为提高台风预报水平,最大限度降低人民的生命和财产损失,及时总结台风预报过程中出现的问题,积累预报经验是极为必要的。中央气象台通过多年的连续分析研究发现,近年来西北太平洋和南海的台风总体呈现如下特征:生成数和登陆数与多年平均值相比基本持平或略偏多;从生成的季节来看,在2016年,1—6月的淡季空台风和夏末及秋季台风集中生成的现象与该年赤道中东太平洋海温由厄尔尼诺向拉尼娜转换有关,2017年与2018年则集中在盛夏季节生成;2016年台风登陆强度偏强,但2017年与2018年台风的登陆强度整体都偏弱。从过去三年对于台风预报难点问题的总结与分析来看,针对台风强度预报问题,尤其是快速增强台风的强度预报问题仍是业务预报中的重要难点之一,如1601号台风尼伯特、1713号台风天鸽、1808号台风玛莉亚和1826号台风玉兔等都出现过24 h强度预报误差达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的情况。另外,多台风之间的相互作用仍给台风的路径和强度预报带来极大的挑战,如2017年的台风纳沙与海棠出现了近距离的相互作用,登陆后环流合并等复杂特征,使得主客观预报均出现了较大的路径预报误差(董林等,2019;高拴柱等,2018;柳龙生等,2019a;2019b;聂高臻等,2018;王海平等,2017;王慧等,2020;王海平和董林,2020)。

本文用于统计本年度及历史台风活动特征所使用的资料为1949—2019年中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)台风最佳路径资料;用于台风预报误差对比所使用的官方主观分析和预报资料有中央气象台、日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)和美国联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)三家的实时业务资料;用于分析台风预报难点所使用的模式预报资料主要来自国家气象中心区域中尺度台风数值预报系统(GRAPES\_TYM)、台风路径集合预报订正方法(typhoon track ensemble correction, TYTEC)、欧洲中期预报中心(European Center for Medium Weather Forecasting, ECMWF, 以下简称EC)和美国环境预报中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)的台风数值预报产

品,海温分析资料使用的是NCEP RTG\_SST(real time global, RTG)。通过对2019年西北太平洋和南海台风活动的主要特征进行总结,分析2019年度台风路径和强度预报误差,并重点提出和讨论了2019年在业务预报中出现的难点问题。

## 1 2019年台风活动特征

2019年西北太平洋及南海共有29个台风生成(图1a),比多年(1949—2018年)平均值(27.0个)多2.0个。有6个台风在我国沿海登陆(图1b),较多年平均值(7.0个)偏少1.0个。

### 1.1 台风生成特征

2019年度西北太平洋及南海生成了29个台风,其生成源地偏北偏西(图2a)(平均生成位置为 $17.3^{\circ}\text{N}$ 、 $133.0^{\circ}\text{E}$ ,历史平均生成位置为 $16.1^{\circ}\text{N}$ 、 $136.5^{\circ}\text{E}$ ),其中 $120^{\circ}\text{E}$ 以西有6个台风生成,占总数的20.7%,大于平均值(17.2%), $150^{\circ}\text{E}$ 以东有7个台风生成,占总数的24.1%,大于平均值(20.2%), $120^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 有16个台风生成,占总数的55.2%,小于平均值(62.6%),因此南海及远海海域的台风活动相对活跃。

从台风的生成时间来看(图2b),春季(3—5月)无台风生成,而多年平均值为2.1个;夏季(6—8月)有10个台风生成,较多年平均值(11.6个)偏少1.6个;秋季(9—11月)有16个台风生成,较多年平均值(11.4个)偏多4.6个;冬季(12月至次年2月)有3个台风生成,较多年平均值(1.9个)偏多1.1个。因此2019年春、夏季台风生成数偏少,台风盛期不活跃。其主要原因是2019年上半年,热带东太平洋海温持续偏暖,出现显著的厄尔尼诺现象(Wang and Chan, 2002; 殷明等, 2016)。5月起,此海域海温偏暖状态逐渐减弱,7月,厄尔尼诺事件基本结束。秋、冬季由于南海中部—菲律宾以东海域维持季风槽,南半球冷空气活动频繁,越赤道气流加强,南海中部—菲律宾以东海域西风异常等(杜新观和余锦华, 2020; 韩翔等, 2018; 涂石飞等, 2019; 王慧等, 2006; 张丽杰和朱慧云, 2018),导致台风明显偏多,11月生成台风6个,使2019年成为1949年以来与1991年并列11月生成台风最多的年份(图2)(王海平和董林, 2020)。

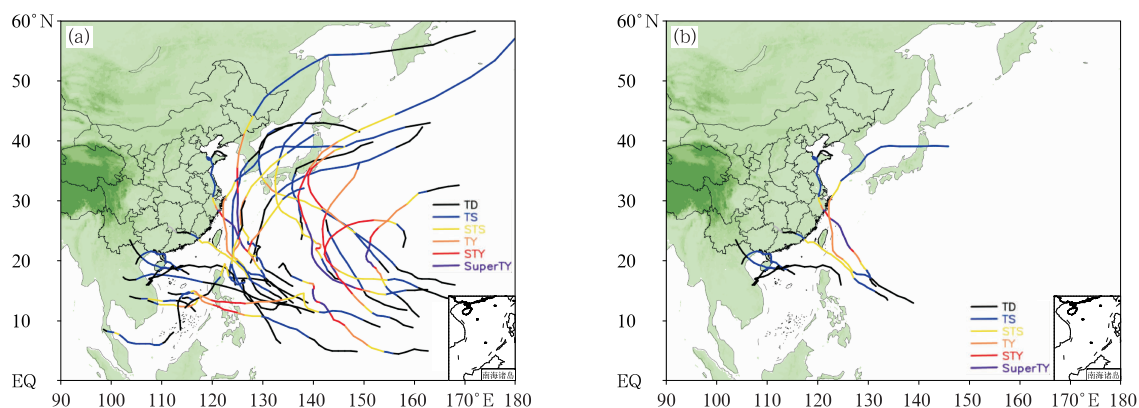


图 1 2019 年西北太平洋和南海生成(a)与登陆中国(b)的台风路径

Fig. 1 Tracks of TCs which generated over western North Pacific and South China Sea (a) and those making landfall in China (b) in 2019

## 1.2 台风活动特征

### 1.2.1 全年整体活动特征

台风生命史是指台风从生成到消亡的时间,不包含台风生成前的热带扰动和热带低压阶段,但包含了台风减弱后的热带低压阶段。年度台风生命史由该年所有台风生命史累加而得,在一定程度上表征了该年台风的活跃程度(董林等,2019;钱苏伟等,2019)。

从年度台风生命史时间序列图(图 3a)可以看出,2019 年度台风总生命史为 4 107 h,比 1949—2018 年度年平均台风生命史 4 036 h 长 71 h,平均单个台风的生命史长度为 142 h(5.9 d),与多年平

均的 149 h 基本持平。2019 年生命史最长的台风是 1909 号利奇马,为 264 h(11 d)。从图 3b 中可以看到,1949—2019 年生命史最长的台风是 1972 年的第 6 号台风,生命史长达 540 h(22.5 d),其次是 1986 年的第 15 号台风,生命史达 504 h(21 d)。

反映当年台风活动总体强度的台风年度累积动能(ACE)(Bell et al,2000;Waple et al,2002)的序列图显示(图 3a),累积动能的变化趋势与台风年度生命史的长度变化趋势基本一致,说明全年台风活动时样本(采用最佳路径逐 6 h 样本)的平均强度年际变化不大。2019 年台风累积动能(ACE)为  $124.46 \times 10^4 \text{ kn}^2$ ,比 1949—2018 年年平均( $274 \times 10^4 \text{ kn}^2$ )明显偏低。由此可见,2019 年虽然年度台风生命史

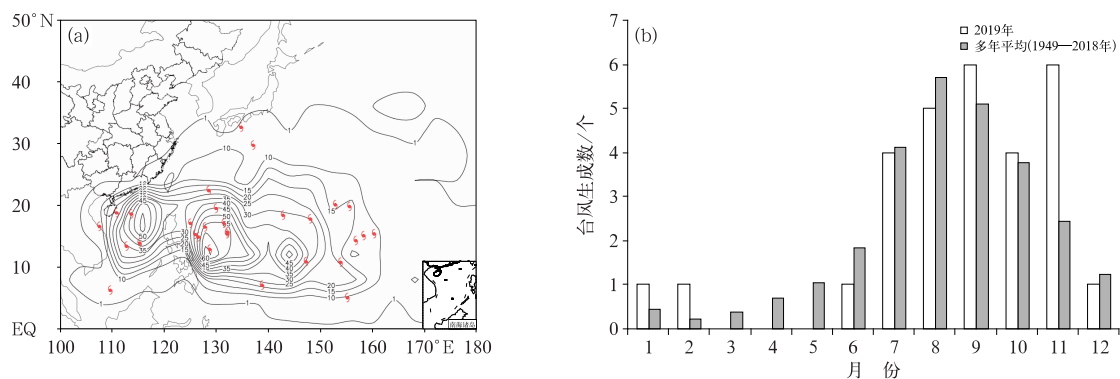


图 2 2019 年台风生成源地(●)与 1949—2018 年台风生成源地密度分布

[等值线,单位:个 $\cdot\pi^{-1}\cdot(250 \text{ km})^{-2}$ ](a)和 2019 年逐月台风生成数与多年逐月平均数(b)

Fig. 2 TCs' generating location in 2019 (●) and origin distribution density in 1949—2018 [isoline, unit: number $\cdot\pi^{-1}\cdot(250 \text{ km})^{-2}$ ] (a), and comparison of the monthly TC formation frequencies between 2019 and the average of 1949—2018 (b)

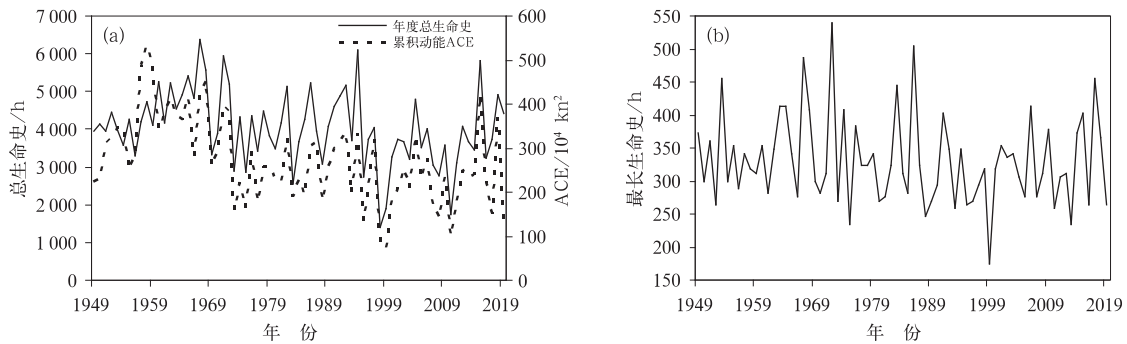


图 3 1949—2019 年的台风总生命史和累积动能(a)与年度台风最长生命史(b)

Fig. 3 TCs' total lifetime and accumulated cyclone energy (a), and annual lifetime (b) over western North Pacific and South China Sea in 1949—2019

比多年平均长,但累积动能低于多年平均,也就是说,这一年虽然台风活动时间较长,但整体活动强度较弱。

### 1.2.2 台风极端活动特征

台风的极值强度反映了当年台风极端活动特征。2019 年度台风的极值强度为  $68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (1923 号台风夏浪, 17 级以上), 较多年平均极值强度 ( $72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 17 级以上) 低  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。年平均极值强度为  $37.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (13 级), 较多年平均值 ( $40.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 13 级) 低  $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由表 1 可见, 极值强度较弱的热带风暴级和强热带风暴级 ( $17.2 \sim 32.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,

8~11 级) 的台风占比为 41.4%, 共有 12 个, 较多年平均值 (10.5 个) 多 1.5 个 (多 13.2%); 极值强度较强的台风级和强台风级 ( $32.7 \sim 50.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 12~15 级) 的台风共有 11 个, 较多年平均值 (10.4 个) 多 0.6 个 (多 5.8%); 极值强度  $\geq 51.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (16 级及以上) 的超强台风有 6 个, 与多年平均值持平, 全年占比为 20.7%, 较多年平均值 (22.1%) 低 1.4%。因此, 2019 年度台风的最大极值强度和单个台风极值强度的平均值都略偏弱, 且超强台风数占全年所有台风数的比例较常年也偏少。

表 1 2019 年台风极值强度分布与多年 (1949—2018 年) 情况对比

Table 1 Comparison of TCs' extreme intensity distribution in 2019 and in 1949—2018

台风极值强度等级 (中心风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	热带风暴 (TS) (17.2~24.4)	强热带风暴 (STS) (24.5~32.6)	台风 (TY) (32.7~41.4)	强台风 (STY) (41.5~50.9)	超强台风 (SuperTY) ( $\geq 51.0$ )	合计
1949—2018 年总个数/个	297	443	405	325	418	1888
多年平均数/个	4.2	6.3	5.8	4.6	6.0	27.0
2019 年个数/个	8	4	5	6	6	29
2019 年占比/%	27.6	13.8	17.2	20.7	20.7	100.0
多年平均占比/%	15.7	23.5	21.4	17.2	22.1	100.0

### 1.2.3 多台风同时活动特征

2019 年多台风共存 (在 6 h 间隔的路径数据中, 至少有一个时间点在西北太平洋和南海同时有两个或以上的台风活动, 且各台风的中心附近最大风速值均  $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 出现了 8 次 (表 2), 较多年平均频次 (9.2 次) 少 1.2 次。在 8 次“多台”共存中有 1 次“3 台”、7 次“2 台”, 未出现“4 台”及以上共存的现象, 其中秋季 6 次。秋末 (10 月中旬至 11 月中旬), 双台风活动频繁。一般来说, 季风槽和热带对流层上部槽内涡旋持续活跃是造成多台共存的主要形势, 易造成台风群发 (Dong and Neumann,

1983)。但 2019 年台风同时存在时的相对距离大多较远 (在 1800 km 以上), 即使距离较近的也是一个生成时另一个已经快要消散。如: 1913 号台风玲玲生成时, 1914 号台风剑鱼已经减弱消散; 1926 号台风海鸥和 1927 号台风凤凰的最近距离虽然达到 690 km, 但在“凤凰”生成时, “海鸥”也即将减弱消散; 相距相对较近且强度都较强的“利奇马”和“罗莎”, 距离也在 1400 km 以上。

根据 Ren et al (2020) 提出的西北太平洋双台风定义标准, 即如果两个同时共存的台风相互距离在 1800 km 以下, 且维持 12 h 以上, 则算作一对双台



风,如果在此基础上,这一对双台风还发生了逆时针的互旋,则算作一次典型的双台风过程。据此标准,2019 年共出现双台风 3 对,并未出现互相旋转的双台风,即典型双台风过程。

因此,2019 年的多台风共存现象不算活跃,且

大多数共存台风并不是同时存在于季风槽或是热带对流层上部槽内涡旋中,而是存在于不同的天气系统中,因此也并未发生直接的双台风或多台风相互作用。

表 2 2019 年西北太平洋和南海多台风活动情况

序号	台风名称	共存时间/BT	最近距离/km
1	韦帕、范斯高	8 月 2 日 08 时至 4 日 02 时	4 000
2	范斯高、利奇马、罗莎	8 月 4 日 02 时至 14 日 20 时	1 400
3	玲玲、剑鱼	9 月 2 日 08 时至 7 日 14 时	1 700
4	玲玲、法茜	9 月 5 日 08 时至 11 日 08 时	1 900
5	浣熊、博罗依	10 月 19 日 14 时至 22 日 08 时	2 300
6	夏浪、娜基莉	11 月 5 日 20 时至 10 日 08 时	3 900
7	风神、海鸥	11 月 16 日 02 时至 18 日 14 时	2 000
8	海鸥、凤凰	11 月 20 日 08 时至 22 日 02 时	690

1.3 台风登陆特征

2019 年共有 6 个台风 11 次登陆中国沿海地区(表 3),其中海南 3 次,浙江、山东各 2 次,广东、广西、台湾、福建各 1 次,无台风直接登陆广东,仅为二次登陆。登陆中国的台风个数较多年平均值(7.0 个)偏少 1.0 个,登陆比例为 20.7%,低于多年平均(25.9%)。登陆频次较多年平均(8.9 次)偏多 2.1 次(图 4)。另有 15 个未登陆我国,但仍对我国海域或沿海带来影响的台风。从登陆地点的分布来看,2019 年登陆海南、浙江、广西和山东的台风较常年偏多,登陆广东、台湾、福建的台风较常年偏少(李英等,2004)。深入内陆西行台风少,加剧了 2019 年长江中下游伏秋旱的发展。

登陆时间集中在 7—10 月,有 3 个台风在 8 月登陆我国,较多年同期平均值(1.87 个)明显偏多,

另外,7 月、9 月和 10 月各有 1 个台风登陆,其中 10 月较常年偏多,而 7 月和 9 月较常年偏少。登陆我国最早的是第 4 号台风木恩,于 7 月 3 日 00:45 在海南省万宁市沿海登陆,最晚的是第 18 号台风米娜,于 10 月 1 日 20:30 在浙江舟山沿海登陆。

6 个登陆台风整体强度偏弱,平均第一次登陆强度为  $28.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,比多年平均值( $32.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )弱  $4.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。平均登陆强度(含多次登陆)为  $26.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,较多年平均值( $31.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )弱  $5.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;虽然台风登陆强度整体偏弱,但个别极强,如 1909 号台风利奇马,于 8 月 10 日 01:45 在浙江省温岭市沿海登陆,登陆时近中心最大风速为 16 级( $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),中心最低气压为 930 hPa,为 2019 年登陆我国的最强台风和 1949 年以来登陆浙江的第三强台风。

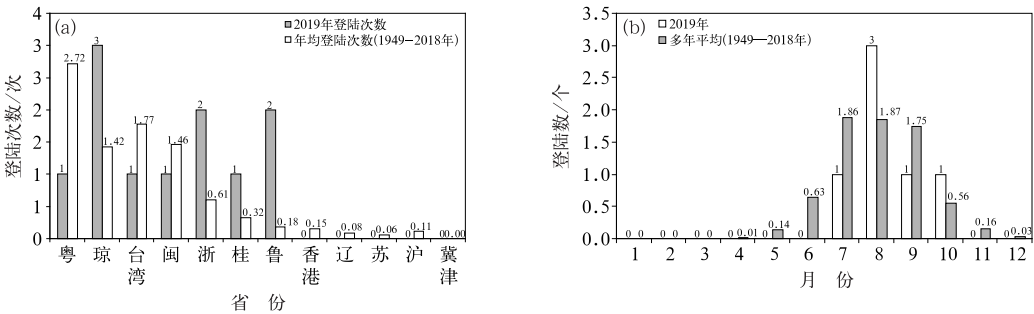


图 4 1949—2018 年平均与 2019 年登陆台风数在中国各省(自治区、直辖市)分布(a), 1949—2018 年平均与 2019 年逐月登陆中国台风数(b)

Fig. 4 Comparison of the provincial distribution of TCs making landfall in China in 1949—2018 average and in 2019 (a) and the number of landfall typhoons in China each month in 2019 and in 1949—2018 average (b)

表 3 2019 年登陆我国的台风一览表

Table 3 List of the typhoons making landfall in China in 2019

台风编号	台风名称	极值强度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	登陆地点	登陆时间/BT	风级	登陆强度风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	气压/hPa
1904	木恩(Mun)	18	海南万宁	7月3日 00:45	8	18	992
			海南文昌	8月1日 02:15	9	23	982
1907	韦帕(Wipha)	23	广东湛江	8月1日 17:40	9	23	982
			广西防城港	8月2日 21:20	9	23	982
1909	利奇马(Lekima)	62	浙江温岭	8月10日 01:45	16	52	930
			山东青岛	8月11日 20:50	9	23	980
			山东潍坊	8月12日 11:00	9	23	984
1911	白鹿(Bailu)	30	台湾屏东	8月24日 13:00	11	30	980
			福建东山	8月25日 07:25	9	23	990
1914	剑鱼(Kajiki)	18	海南万宁	9月2日 10:40	8	18	995
1918	米娜(Mitag)	40	浙江舟山	10月1日 20:30	12	33	975
平均登陆强度,平均第一次登陆强度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )							26.2, 28.5

## 2 预报误差分析

### 2.1 路径预报误差

2019 年中央气象台全部台风 24~120 h 台风路径预报平均误差分别为 75、136、208、260 和 340 km。24~72 h 平均误差分别较 2018 年的 72、124、179 km 增加了 3 km(4%)、12 km(9.7%)和 29 km(16.2%)，96~120 h 较 2018 年的 262、388 km 分别减小了 2 km(0.8%)和 48 km(12.4%)。而近 5 年(2014—2018 年)的 24~120 h 平均误差分别为 71、130、200、275 和 370 km，与其相比，本年度在 24~72 h 的预报误差有所增大，而 96~120 h 的预报误差则明显减小，尤其是 120 h 的预报准确率创新高(图 5a)。另外，登陆台风 24~120 h 平均误差分别为 69、110、161、227 和 305 km，相比非登陆台风，登陆台风路径预报准确率有明显优势。

与日本气象厅和美国联合台风警报中心的同样本官方主观综合预报相比，中国 24 h 和 96~120 h 的预报水平处于领先地位，在 48~72 h 的预报误差比日本略高，但低于美国(图 5b)。与数值预报相比(图略)，TYTEC 方法的预报误差仍然是最低的(71 km)，因此该方法对业务预报仍有非常好的指导作用；另外，近两年 EC、NCEP 确定性和集合平均误差在增大；中央气象台 24 h 台风路径预报准确率比 EC 确定性模式提高了 21.1%；近两年 GRAPES\_TYM 取得很大进步，2019 年台风路径预报准确率与 EC 确定性模式相当。

2019 年台风路径预报误差较大的样本主要集中在 1905 号台风丹娜丝、1912 号台风杨柳、1920 号

台风浣熊，且各预报中心对这三个台风的路径预报误差也都是最大的。台风丹娜丝的路径预报误差主要来自方向性误差，前期预报登陆福建。“丹娜丝”靠近吕宋岛时，吕宋岛西部海域地形诱生低压生成，而业务预报时考虑会发生中心替换，南海低压发展北上登陆，实际上这种情况并未发生。实时业务中，受服务意识影响，不得不考虑丹娜丝登陆闽粤这种最坏的可能性。对于台风杨柳的预报移速偏慢(预报：25~30  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，实际移速：35~45  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )。对于台风玲玲的预报路径与实况路径基本一致，但预报移速较实况偏慢约 6 h，造成较大路径预报误差。

### 2.2 强度预报误差

台风强度预报 24~120 h 各时效误差分别为 4.0、5.6、6.8、7.3 和 6.7  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；24~96 h 较 2018 年的 3.6、5.1、5.5、6.6  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  分别增大了 0.4、0.5、1.3、0.7  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，120 h 较 2018 年的 7.1  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  减小了 0.4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，并且也是近 5 年来误差最小的(图 6a)。从中、日、美三家的对比来看，24~96 h 时效日本最佳，中国居中，120 h 中国最佳(图 6b)。

## 3 预报难点分析

### 3.1 模式预报分歧大时的合理性分析

业务预报中经常会出现不同模式的预报结果存在较大分歧的情况，此时预报员会面临较大的分析困难。1905 号台风丹娜丝就是一个典型的、模式对其预报分歧非常大的个例。

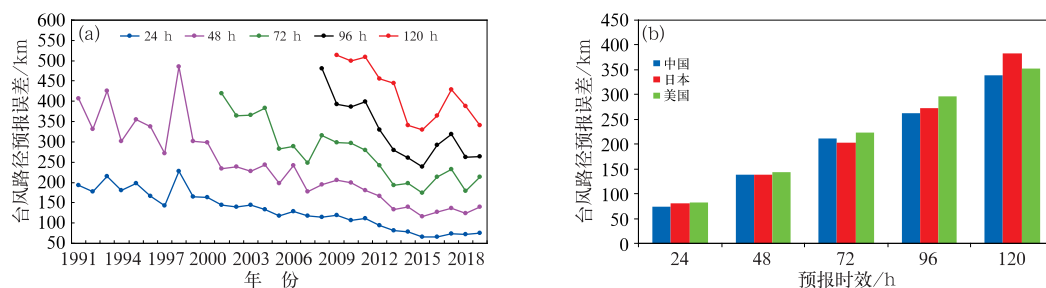


图 5 1991—2019 年中央气象台官方预报台风路径预报误差(a),

2019 年中、日、美官方台风路径预报误差(b)

Fig. 5 TC track errors in CMA official forecasts from 1991 to 2019 (a), and comparison of TC track errors in CMA, JMA and JTWC official forecasts in 2019 (b)

在台风丹娜丝发展初期,在低层涡旋的上空(200 hPa)为一致的偏东风急流,因此存在较强的垂直切变,加之还存在地形的影响,因而在菲律宾吕宋岛以西海域产生了诱生低压,且发展旺盛。“丹娜丝”中心裸露在吕宋岛东侧,对流云系松散,卫星可见光通道云图难以分辨螺旋结构的中心所在,并且海上观测资料少,因此难以确定台风中心位置(图 7a)。岛屿的诱生作用使得对台风路径的预报问题更为复杂。一般情况下,诱生低压经常表现为两种情况,一是两个中心各自发展,二是诱生低压中心将替换原台风中心而发展成为新的台风,看起来台风发生了跳跃,如 1959 年的第 6 号台风 Nora 在活动初期与“丹娜丝”非常相似,在吕宋岛西侧的诱生低压受弱冷空气的激发,取代原台风中心而发展为台风,向西北方向移动并登陆广东中部沿海,而吕宋岛东侧原来的台风环流则减弱消散(陈联寿和丁一汇,1979)。

若“丹娜丝”的发展情况与“Nora”相似,那么位

于吕宋岛西侧的诱生低压中心将取代东侧的涡旋中心,进而在南海继续发展,有可能在我国华南沿海登陆;也有可能两个涡旋将各自独立发展,则位于吕宋岛东侧的“丹娜丝”将可能移向偏北方向,登陆可能性小。在这样复杂的条件背景下,对“丹娜丝”的实况分析和未来移动情况的判断都存在困难。

主流模式的确定性和集合预报对“丹娜丝”这一阶段的初始位置描述和预报也各不相同。路径预报都极不稳定,且预报分歧大,集合预报发散度大。有些模式预报将出现两个涡旋,但不确定哪个将发展加强。EC 的确定性预报和多数的集合成员、NCEP 和 UKMO 的少数集合成员预报了诱生低压将替代原台风涡旋发展加强,其余预报了吕宋岛东侧的台风涡旋将独立发展。随后的实况监测显示,诱生低压短暂增强为南海热带低压后,逐渐减弱并入季风槽,而吕宋岛东侧的台风丹娜丝中心则在向北偏东移动后,一路北上,从东海转向朝鲜,穿过朝鲜半岛后在日本海北部减弱消失。中央气象台的综合预报

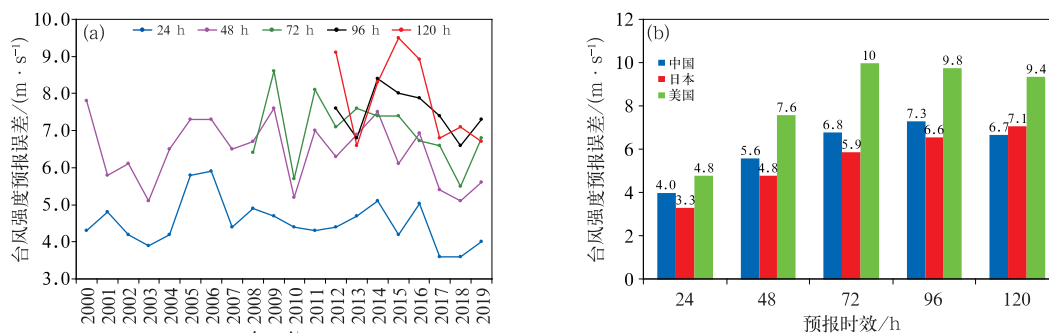


图 6 同图 5, 但为台风强度

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for TC intensity

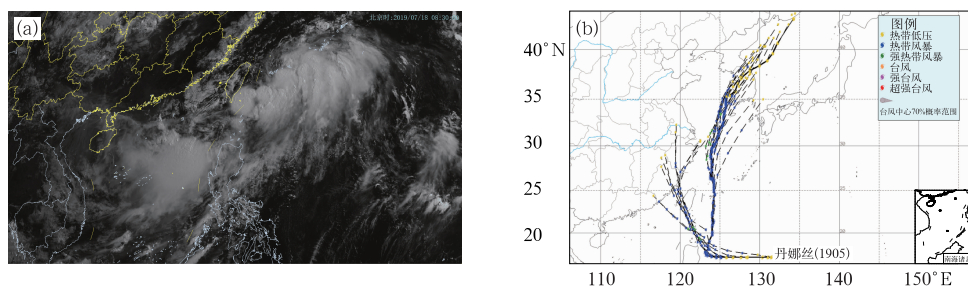


图 7 台风丹娜丝 2019 年 7 月 18 日 08:30 FY-4A 可见光通道卫星云图(a),  
中央气象台各时次主观路径预报(b)

Fig. 7 FY-4A visible cloud image at 08:30 BT 18 July 2019 (a) and subjective TCs' track forecast by CMA (b) for Typhoon Danas

在初期一直考虑诱生低压的影响,预报“丹娜丝”将会向西北方向移动可能登陆我国华南沿海地区,后期才做出调整,因此出现了较大的路径预报误差(图 7b)。

那么当各个模式预报分歧较大时,发挥集合或集成预报的作用,采取多模式集成的方法是否能够提高台风路径预报的准确率呢?在对 1109 号台风梅花的预报总结中得到的经验是:当模式的预报分歧较大,也就是路径预报不确定性较大时,所有预报成员的平均路径具有较高的参考价值(许映龙等, 2011)。在此次对“丹娜丝”的路径预报中,由于预报员更加侧重参考了 EC 的确定性预报,加上过分考虑了诱生低压发展的可能性,以及考虑到决策服务的需求,预报“丹娜丝”将在 7 月 19 日前后靠近或登陆华南沿海,实况则是在 19 日进入我国东海,预报偏西偏南,导致路径预报产生了较大的偏差,且调整也偏晚,最后出现较大的平均误差。假如当时更多考虑 EC、NCEP、UKMO、GRAPES 等多家模式,特别是从最后的检验结果来看,GRAPES\_TYM 的预报误差相比 EC、NCEP 和 TYTEC 在各预报时效都是最低的,在今后对此类台风的预报中可作为重点参考,对其预报质量也要注意做进一步的检验。如果综合考虑这几家模式的平均情况,显然误差则会明显减小。这进一步说明了当各个模式预报分歧较大时,侧重参考各家模式所有预报成员的平均路径的方案仍是可行的。

另外,从各层的形势场检验来看,高层 200 hPa 南亚高压断裂为东西两块,这显然有利于“丹娜丝”的北上,但当时模式的长时效预报是南亚高压在“丹娜丝”北侧呈东西带状分布。从 500 hPa 形势场上

看,西风槽实际向东移动的速度明显比模式预报的移动速度更快,这也有利于“丹娜丝”北上;从低层 850 hPa 的流场图中看到,模式预报出了副热带高压与赤道高压的打通,导致环境引导气流发生突变,这与 1013 号台风鲇鱼突然北翘时的形势场极为相似,也有利于台风的北上。因此,在业务预报中,随时滚动检验高、中、低层形势场的预报质量也是判断模式预报合理性的重要途径。

### 3.2 多台风共存条件下台风预报的不确定性

在前文论述中已经提到,虽然 2019 年共出现了 8 次多台风共存的现象,但共存台风相互之间的距离都较远,即使是距离较近的台风利奇马与台风罗莎之间也始终在大约 1400 km 以上,因此,实际上 2019 年并没有出现双台风发生“藤原效应”的现象,当然“利奇马”与“罗莎”也并未产生直接的相互作用。但是,由于“罗莎”的存在阻碍了副热带高压的南落,从而对“利奇马”的登陆也起到了促进的作用。

通常情况下,由于多台风的共存,使得环境的形势场更加复杂,从而给分析预测台风的未来移动路径带来很大的不确定性(董林等,2020)。对台风利奇马的路径预报误差主要出现在台风生成初期至登陆前的西北行过程中,对于登陆后向北移动的路径预报误差较小。如图 8a 所示,从 ECMWF 模式于 8 月 5 日 08 时起报的 500 hPa 形势场 96 h 预报(8 月 9 日 08 时)检验图上可以看到,影响“利奇马”的主要天气系统是副热带高压、西风槽、双台风和赤道高压。模式预报的西风槽偏弱,而副热带高压预报偏强。同时赤道缓冲带高压预报偏强,对“罗莎”的中心位置预报偏北,以上原因导致模式对台风利奇马



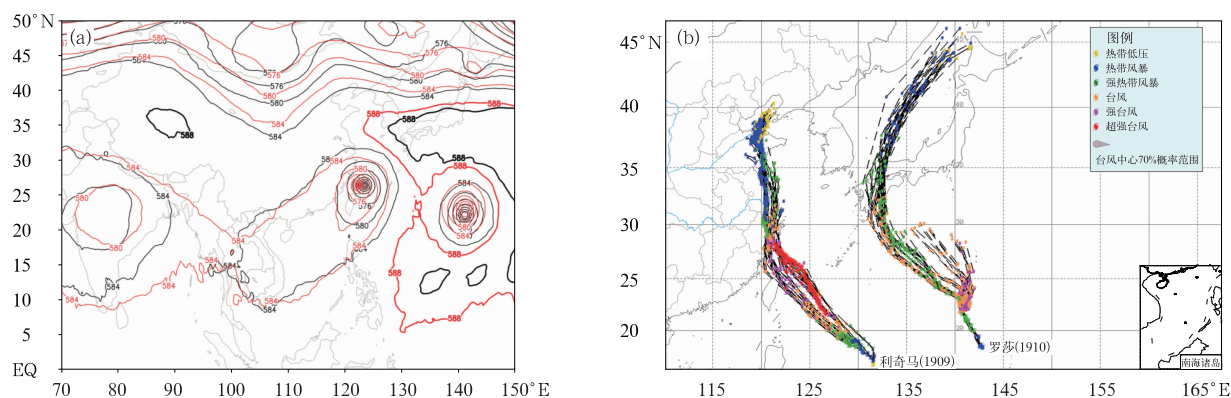


图8 2019年8月EC模式500 hPa高度场(a,单位:dagpm;黑色:9日08时初始场,红色:5日08时的96 h预报场),中央气象台发布的台风利奇马和罗莎预报(b)

Fig. 8 ECMWF 500 hPa geopotential height (a, unit: dagpm; balck: 08:00 BT 9 August, red: 96 h forecast at 08:00 BT 5 August), and forecast chart of typhoons Lekima and Krosa released by CMA (b) in August 2019

路径预报在登陆前的西北行过程中明显较实况偏南。

各家业务预报中心在参考模式的基础上所做的综合预报也都出现了类似的预报偏差,由于台风罗莎的存在,使得影响“利奇马”位置移动的因素更多,并且在图8b显示的由起报时间8月5日08时开始至之后的96 h期间,两个台风都出现了快速发展,“利奇马”由热带风暴级加强为超强台风级,“罗莎”由热带低压级加强为强台风级,如此强烈的强度发展也势必给其周围的环境场变化带来较大的影响,因此预报员所面临的困难也更大。

台风利奇马是2019年对我国影响最大的一个台风,在菲律宾以东洋面上生成后向西北方向移动过程中,由强热带风暴级快速增强至超强台风级。登陆后强度逐渐减弱,并向北偏西转偏北方向移动,穿过江苏东部后进入黄海中部海面,在山东省青岛市沿海二次登陆,穿过山东半岛西部后进入莱州湾减弱消失。在陆地时间长达44 h,其中滞留浙江达20 h。预报员对路径的预报除了在初期出现偏南以外,其余包括登陆点的预报、登陆后的路径预报以及后期回旋打转阶段预报误差并不大,并且比日本和美国的各个时效预报误差都小(中央气象台的24 h路径预报误差为63 km,日本气象厅为72.9 km,美国关岛预报中心为68.6 km)。与路径预报的困难相比,对“利奇马”登陆前的快速增强过程[24 h内中心附近最大风力由11级( $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )增大至16级( $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )]预报的困难则更大。

“利奇马”在西北行过程中快速增强,并且维持超

强台风级的时间长达51 h,直至8月10日01:45在浙江省温岭市沿海以超强台风级(16级, $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )登陆,是2019年登陆我国的最强台风,在1949年以来登陆我国大陆地区的台风中强度排名第五,在登陆浙江的台风中排名第三。浙江沿海的平均风力普遍达到12~14级,部分沿海岛屿达到15~17级。对于“利奇马”的快速增强,主要的有利条件是海温超过了 $29.5^\circ\text{C}$ ,并有 $0.5\sim 1^\circ\text{C}$ 的海温正距平,且垂直切变适中。水汽的收支和高层的出流条件也是有利的。通过对5—7日850 hPa的轨迹追踪结果来看,西南季风中的大部分水汽都卷入到了“利奇马”中,而且“罗莎”南侧的水汽有一部分绕过“罗莎”卷入“利奇马”,因此,罗莎的存在也为“利奇马”的快速增强做出了贡献。

中央气象台对“利奇马”快速增强阶段的预报明显偏弱。从图8b可以看到,在中央气象台8月6日14时起报的预报中,对于东侧台风罗莎的较长时效预报较实况偏东,强度预报明显偏强,对于西侧台风利奇马的路径预报较实况偏南,强度预报则明显偏弱,究其原因,大致有三点:第一,由于对“利奇马”的路径预报比实况更靠近台湾岛北部,考虑到靠近地对台风强度会有削弱的作用;第二,通常数值模式,尤其是全球模式,受到分辨率等因素的影响,难以预报出台风的快速增强,对于“利奇马”的强度预报也不例外,模式未能反映出来,因此预报员也无法得到模式预报的提示。不过值得一提的是,区域模式(麻素红和陈德辉,2018;杨国杰等,2018;赵杨洁等,2019)GRAPES\_TYM在对“利奇马”的强度预

报中表现明显优于其他主流模式(图略),在今后对台风强度的预报中须更加重视其参考性;第三,预报员考虑到“罗莎”的存在会分割一部分来自西南季风的水汽供应,且对“罗莎”预报的位置距离“利奇马”较实况更远、强度更强,因此预报员认为“罗莎”会分割更多的水汽供应,对“利奇马”的强度发展是不利的。但事后通过敏感性试验发现,“罗莎”的存在并未削弱“利奇马”的强度,当滤除“罗莎”后,“利奇马”的强度反而减弱,也就是说“罗莎”的存在有利于“利奇马”的强度增强。因此在今后的业务预报和研究中,需要更加关注和讨论当东台风存在时,其对西台风路径和强度的影响及其机制。

### 3.3 引导气流对台风移动速度的影响

台风的路径预报误差体现在两个方面:移动方向和移动速度的误差。1912 号台风杨柳在菲律宾以东洋面上生成后,一路向西偏北方向移动,穿过南海北部海域,中央气象台对其移动方向的预报误差很小,但平均路径误差的计算结果却显示 24 h 和 48 h 的误差分别达到了 140 km 和 397 km,误差的来源主要是对其移动速度的估计出现了较大的偏差。以 8 月 27 日 14 时的 24 h 预报为例,当时中央气象台的主观预报也预计“杨柳”将是一个移动速度快的台风,预报移动速度为  $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,但是实际的移动速度却达到了  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,因此这一时刻的 24 h 路径预报误差达到了 215 km。

台风的移动速度决定于周围流场的特点、台风范围的大小及其结构的不对称性,另外,热力因子如温度场与加热场等也有很大影响(黄士松,2009;蒋贤安和朱永提,1989;董克勤,1987;Holland,1983;

1991)。通常认为南海海域是台风移速较慢的海域(王志烈,1987),但副热带高压北侧和南侧又常常是台风快速移动的区域,而北侧西风带里的移速又大于南侧的东风带。但位于南海北部海域的台风杨柳却移速很快。预报移动速度明显偏慢的重要原因是低估了副热带高压南侧偏东急流对台风快速移动的引导作用。从 8 月 28 日欧洲中心 500 hPa 的 24 h 流场和风速图(图 9a)中可以看到,当时副热带高压南侧的偏东风急流的风速达到  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上。因此在业务预报中需要更加关注副热带高压南侧偏东风急流对台风快速移动的引导作用。

2019 年另一个移速预报出现较大偏差的是 1913 号台风玲玲,其为近海北上路径,历史上也出现过北上台风移速较快的个例,如 1109 号台风梅花北上时的最大移速也达到  $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。“玲玲”在北上过程中的移动速度也很快,以 9 月 7 日 02 时为例,其预报移速为  $43 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,实际移速则达到  $52 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,这一时刻的 24 h 路径预报误差达到 284 km。预报移动速度明显偏慢的重要原因是低估了副热带高压西侧偏南急流的作用,当时的偏南风急流的风速达到  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 9b)。

从已有统计看,移动速度快的台风多发生在北偏东或东北行路径中,西行和偏北行台风的快速移动个例较少,因此,预报员在台风路径业务预报中,对于这些路径的台风除了关注引导气流方向外,还需关注引导气流的强度和高层流场可能对台风移动速度预报的影响,以及更加重视对副热带高压西侧或南侧急流增强引起的台风快速移动,及时检验移速的预报并及时订正,并在未来进一步加强对引导气流强度与台风移速关系的定量化研究。

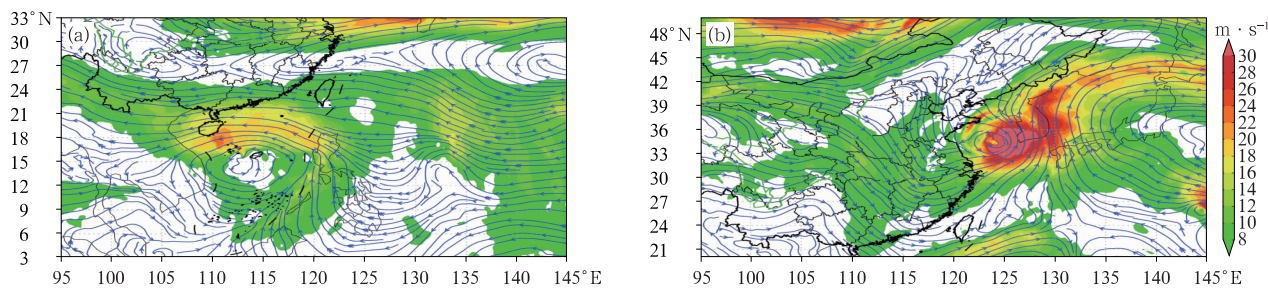


图 9 EC 模式的 24 h 500 hPa 流场和风速预报(填色)

(a) 台风杨柳:2019 年 8 月 28 日 20 时起报, (b) 台风玲玲:2019 年 9 月 7 日 08 时起报

Fig. 9 ECMWF 500 hPa flow field and wind speed (colored) 24 h forecast of

(a) Typhoon Podul at 20:00 BT 28 August 2019,

(b) Typhoon Lingling at 08:00 BT 7 September 2019



## 4 结论与讨论

2019年度西北太平洋及南海共有29个台风生成,生成数比多年同期平均偏多,有6个台风登陆我国,与多年同期平均持平;台风整体强度和登陆平均强度都偏弱,但“利奇马”登陆强度高、影响重;秋季台风生成明显偏多,11月有6个台风生成,与1991年并列成为1949年以来11月生成台风最多的年份。台风预报的误差和主要难点如下:

(1)2019年中央气象台对24~120 h各时效台风路径预报误差分别为75、136、208、260、340 km;24~72 h分别较2018年的72、124、179 km分别增加了3、12和29 km,96~120 h较2018年的262、388 km分别减小了2、48 km。与近5年的平均误差相比,本年度在24~72 h的预报误差有所增大,而96~120 h的预报误差则明显减小,尤其是120 h的预报准确率创新高。与日、美相比,中国在24 h和96~120 h的预报水平处于领先地位,48~72 h的预报误差比日本略高,但低于美国,与EC确定性模式相当。TYTEC方法与其他世界主流模式相比,预报误差仍然是最低的。

(2)对台风丹娜丝的预报分析发现,当各个模式预报分歧较大时,侧重参考各家模式所有预报成员平均路径的方案仍是可行的,随时滚动检验高中低层形势场的预报质量也是判断模式预报合理性的重要途径;当多台风共存时,距离相对较近,且都强烈发展时,势必给周围环境场带来较大的影响,为台风路径和强度的预报带来较大的不确定性,因此需要更加关注和讨论当东台风存在时,其对西台风路径和强度的影响极其机制;如何定量估计引导气流强度对台风移动速度的影响是另一个预报难点,应当更加重视对副热带高压西侧和南侧急流增强引起台风移速增大的问题,努力开展量化研究,并及时进行检验订正。

本研究重点讨论了2019年的台风预报难点,未来还需要综合近几年的台风预报难点进行归纳和分析,提出可供预报员参考和模式改进的意见和建议。

## 参考文献

陈联寿,丁一汇,1979.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社:318-474. Chen L S, Ding Y H, 1979. An Introduction to the Western Pacific Typhoon[M]. Beijing: Science Press: 318-474(in

Chinese).

董克勤,1987.热带气旋移动研究述评[J].热带气象学报,3(4):356-363. Dong K Q, 1987. On recent studies of tropical cyclone motion[J]. J Trop Meteor, 3(4): 356-363(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).

董林,许映龙,吕心艳,等,2020.台风纳沙和海棠的预报着眼点分析[J].气象,46(1):29-36. Dong L, Xu Y L, Lyu X Y, et al, 2020. Analysis of forecast focuses of binary typhoons Nesat and Haitang[J]. Meteor Mon, 46(1): 29-36(in Chinese).

杜新观,余锦华,2020. ENSO发展年与衰减年夏季环境要素对热带气旋生成频数变化的贡献[J].热带气象学报,36(2):244-253. Du X G, Yu J H, 2020. Contribution of environmental factors to the change of tropical cyclone frequency in the summer of ENSO developing and decaying years[J]. J Trop Meteor, 36(2): 244-253(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).

韩翔,赵海坤,孙齐,2018.夏季热带大气准双周振荡对西北太平洋台风生成的影响[J].热带气象学报,34(4):524-534. Han X, Zhao H K, Sun Q, 2018. Effects of quasi-biweekly oscillation of tropical atmosphere on typhoon formation in Northwest Pacific[J]. J Trop Meteor, 34(4): 524-534(in Chinese).

黄士松,2009.低纬大气环流系统若干问题研究[M].北京:气象出版社:315-326. Huang S S, 2009. Research on Some Problems of Low Latitude Atmospheric Circulation System[M]. Beijing: China Meteorological Press: 315-326(in Chinese).

蒋贤安,朱永祺,1989.9414号热带气旋移动路径异常影响因子的数值研究[J].应用气象学报,9(1):38-47. Jiang X A, Zhu Y T, 1989. A numerical study on factors affecting unusual motion of TC 9414 (Doug)[J]. Quart J Appl Meteor, 9(1): 38-47(in Chinese).

李英,陈联寿,张胜军,2004.登陆我国热带气旋的统计特征[J].热带气象学报,20(1):14-23. Li Y, Chen L S, Zhang S J, 2004. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China[J]. J Trop Meteor, 20(1): 14-23(in Chinese).

柳龙生,黄彬,吕爱民,等,2019a.2019年夏季海洋天气评述[J].海洋气象学报,39(4):97-107. Liu L S, Huang B, Lü A M, et al, 2019a. Summer 2019 marine weather review[J]. J Mar Meteor, 39(4): 97-107(in Chinese).

柳龙生,吕心艳,高拴柱,2019b.2018年西北太平洋和南海台风活动概述[J].海洋气象学报,39(2):1-12. Liu L S, Lü X Y, Gao S Z, 2019b. Overview of typhoon activities over western North Pacific and the South China Sea[J]. J Mar Meteor, 39(2): 1-12(in Chinese).

- 麻素红,陈德辉,2018.国家气象中心区域台风模式预报性能分析[J].热带气象学报,34(4):451-459. Ma S H, Chen D H, 2018. Analysis of performance of regional typhoon model in National Meteorological Center[J]. J Trop Meteor, 34(4): 451-459 (in Chinese).
- 聂高臻,黄彬,曹越男,等,2018.2018年夏季海洋天气评述[J].海洋气象学报,38(4):103-114. Nie G Z, Huang B, Cao Y N, et al, 2018. Summer 2018 marine weather review[J]. J Mar Meteor, 38(4): 103-114 (in Chinese).
- 钱苏伟,赵立清,王晓春,等,2019.夏季季节内振荡对西北太平洋台风活动的影响[J].热带气象学报,35(5):664-672. Qian S W, Zhao L Q, Wang X C, et al, 2019. Effects of the boreal summer intraseasonal oscillation on tropical cyclone activity in the Northwest Pacific Ocean[J]. J Trop Meteor, 35(5): 664-672 (in Chinese).
- 涂石飞,徐峰,常舒捷,等,2019.西北太平洋热带气旋活动对夏秋型 ENSO 事件的响应[J].气象,45(7):920-930. Tu S F, Xu F, Chang S J, et al, 2019. Response of tropical cyclone in the Northwest Pacific for summer and autumn ENSO events[J]. Meteor Mon, 45(7): 920-930 (in Chinese).
- 王海平,董林,2020.2019年西北太平洋和南海台风活动概述[J].海洋气象学报,40(2):1-9. Wang H P, Dong L, 2020. Overview of typhoon activities over western North Pacific and the South China Sea in 2019[J]. J Mar Meteor, 40(2): 1-9 (in Chinese).
- 王海平,王慧,杨正龙,等,2017.2017年夏季海洋天气评述[J].海洋气象学报,37(4):75-84. Wang H P, Wang H, Yang Z L, et al, 2017. Summer 2017 marine weather review[J]. J Mar Meteor, 37(4): 75-84 (in Chinese).
- 王慧,丁一汇,何金海,2006.西北太平洋夏季风的变化对台风生成的影响[J].气象学报,64(3):345-356. Wang H, Ding Y H, He J H, 2006. Influence of western North Pacific summer monsoon changes on typhoon genesis[J]. Acta Meteor Sin, 64(3): 345-356 (in Chinese).
- 王慧,高拴柱,曹越男,2020.2019年10月大气环流和天气分析[J].气象,46(1):138-144. Wang H, Gao S Z, Cao Y N, 2020. Analysis of the October 2019 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 46(1): 138-144 (in Chinese).
- 王志烈,1987.台风预报手册[M].北京:气象出版社:37-48. Wang Z L, 1987. Typhoon Forecast Manual[M]. Beijing: China Meteorological Press: 37-48 (in Chinese).
- 许映龙,韩桂荣,麻素红,等,2011.1109号超强台风“梅花”预报误差分析及思考[J].气象,37(10):1196-1205. Xu Y L, Han G R, Ma S H, et al, 2011. The analysis and discussion on operational forecast errors of Super Typhoon Muifa (1109)[J]. Meteor Mon, 37(10): 1196-1205 (in Chinese).
- 杨国杰,沙天阳,程正泉,2018.2009—2015年ECMWF热带气旋集合预报的检验及分析[J].气象,44(2):277-283. Yang G J, Sha T Y, Cheng Z Q, 2018. Verification and analysis on tropical cyclone ensemble forecast of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts from 2009 to 2015[J]. Meteor Mon, 44(2): 277-283 (in Chinese).
- 殷明,肖子牛,李崇银,等,2016.2015年西北太平洋热带气旋活动特征及强 El Niño 现象对其影响的初步分析[J].气象,42(9):1069-1078. Yin M, Xiao Z N, Li C Y, et al, 2016. Analysis on features of tropical cyclone activities over the western North Pacific in 2015 and their variations associated with strong El Niño[J]. Meteor Mon, 42(9): 1069-1078 (in Chinese).
- 张丽杰,朱慧云,2018.影响中国的热带气旋生成源地研究[J].热带气象学报,34(3):289-296. Zhang L J, Zhu H Y, 2018. A study on the sources of tropical cyclones in China[J]. J Trop Meteor, 34(3): 289-296 (in Chinese).
- 赵杨洁,李江南,董雪晗,等,2019.模式分辨率对台风“天鸽”(2017)模拟效果的影响[J].热带气象学报,35(5):629-643. Zhao Y J, Li J N, Dong X H, et al, 2019. The impact of resolution on the simulation results of Typhoon Hato (2017)[J]. J Trop Meteor, 35(5): 629-643 (in Chinese).
- Bell G D, Halpert M S, Schnell R C, et al, 2000. Climate assessment for 1999[J]. Bull Amer Meteor Soc, 81(6): S1-S50.
- Dong K Q, Neumann C J, 1983. On the relative motion of binary tropical cyclones[J]. Mon Wea Rev, 111(5): 945-953.
- Holland G J, 1983. Tropical cyclone motion: environmental interaction plus a beta effect[J]. J Atmos Sci, 40(2): 328-342.
- Holland G J, 1991. Contributions by mesoscale system to the mean-dering motion of tropical cyclones[C]//Second Technical Conference of SPECTRUM, WMO: 62-82.
- Ren F M, Xie Y J, Yin B W, et al, 2020. Establishment of an objective standard for the definition of binary tropical cyclones in the western North Pacific[J]. Adv Atmos Sci, 37(11): 1211-1221.
- Wang B, Chan J C L, 2002. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific[J]. J Climate, 15(13): 1643-1658.
- Waple A M, Lawrimore J H, Halpert M S, et al, 2002. Climate assessment for 2001[J]. Bull Amer Meteor Soc, 83(6): 938.