

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).

2017 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析^{*}

董 林¹ 高拴柱¹ 许映龙^{1,2} 吕心艳¹ 黄奕武¹

¹ 国家气象中心, 北京 100081

² 中国科学院大学, 北京 100049

提 要: 利用历史台风最佳路径、中央气象台台风路径强度实时预报, 以及 ECMWF 数值预报和 NCEP 海温实况等资料, 对 2017 年西北太平洋台风活动的主要特征和预报难点进行了分析, 结果表明: 2017 年台风生成具有源地偏西、南海台风偏多和台风群发特征明显等特征; 台风活动具有年度活跃程度低、台风极值强度偏弱和超强台风异常偏少等特征; 台风登陆具有登陆台风个数多、登陆地点偏南、登陆强度偏弱等特征。对 2017 年度的预报误差进行分析, 结果显示: 24、48、72、96 和 120 h 台风路径预报误差分别为 74、137、233、318、428 km, 各时效误差均较 2016 年有所增加; 但与日本、美国相比, 除 120 h 外, 中国路径预报水平依然处于领先地位。24、48、72、96 和 120 h 台风强度误差分别为 3.6、5.4、6.6、7.4 和 6.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 较 2016 年有所减小, 24 h 误差为历史最低值。强度预报水平居于日本、美国之间。另外, 2017 年最主要的预报难点是双台风或多台风之间复杂的相互作用和近海快速加强台风的强度预报。

关键词: 台风活动特征, 高空急流, 预报误差, 预报难点

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.09.012

Analysis of Characteristics and Forecast Difficulties of TCs on Western North Pacific in 2017

DONG Lin¹ GAO Shuanzhu¹ XU Yinglong^{1,2} LÜ Xinyan¹ HUANG Yiwu¹

¹ National Meteorological Centre, Beijing 100081

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: The characteristics of tropical cyclones (TCs) on Western North Pacific in 2017 were analyzed by using the best-track data, CMA operational forecast data, ECMWF products and NCEP SST_RTG data. Results can be summarized in the following three perspectives. The first is the tropical cyclogenesis. TCs have obvious characteristics of the cluster of tropical cyclogenesis. The generating locations are inclined to be westward. There are more TCs that generated on South China Sea than those in other areas. The second is TCs' activities. It can be concluded that the annual activity level is low, TCs' extreme intensity is rather weak, and the number of super typhoon is anomaly small. The third is TCs' landing. More TCs made landfall this year, and the landing locations are inclined to be southward and the average intensity of landing TCs is weak in general. Estimations of track errors in this year show that there are small increases compared to those of 2016, with the value of 74, 137, 233, 318 and 428 km for 24, 48, 72, 96 and 120 h lead time, respectively. As for track forecast skill, CMA is ahead of JMA and JTWC except the 120 h lead

^{*} 中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-090)及国家自然科学基金面上项目(41575063 和 41675044)共同资助

2018 年 5 月 30 日收稿; 2019 年 7 月 22 日收修定稿

第一作者: 董林, 主要从事台风预报和研究. Email: donglin@cma.gov.cn

通信作者: 高拴柱, 主要从事台风预报和相关研究工作. Email: gaosz@cma.gov.cn

time. The intensity errors are 3.6, 5.4, 6.6, 7.4 and 6.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ for 24, 48, 72, 96 and 120 h lead time, respectively, decreasing a little compared to the errors in 2016. It is noteworthy that the error of 24 h lead time is the lowest in records. The intensity forecast skill is between JMA and JTWC. The forecast difficulties are the complicated interaction between binary or among multiple TCs and the intensity forecast of RI TCs off-shore.

Key words: characteristics of TCs, high level jet, forecast error, forecast difficulty

引言

全球平均每年有 80 个热带风暴、台风(除特别指明之处,本文中的台风指热带风暴及以上强度的热带气旋)、飓风生成,其中 33% 生成在西北太平洋,是全球热带气旋最为频繁的海域(陈联寿等, 2012)。每年约有 7 个台风在我国沿海登陆。台风登陆不仅严重影响人民的生产和生活,也造成了重大的经济损失和人员伤亡。为了减小损失,预报和科研人员积极开展台风预报技术总结和机理研究、不断提高数值模式的预报水平,同时,基于对模式性能的检验评估和预报误差的统计分析开发各种客观订正方法,台风路径预报水平不断提高(陈国民等, 2017;许映龙等, 2015;许映龙和黄奕武, 2017;高拴柱等, 2018;Elsberry, 2014;李永平等, 2017;麻素红等, 2018;Chen et al, 2018;Zhang et al, 2017;Qi et al, 2014;Dong and Zhang, 2016)。但是,在业务中仍然有预报难题没有解决,特别是疑难路径台风和强度快速变化台风的预报问题,无论是数值模式、客观方法还是预报员的订正能力均十分有限。如出现疑难路径的 1109 号台风梅花、1013 号台风鲇鱼和 1508 号台风鲸鱼等(许映龙等, 2011;Qian et al, 2013;郑艳等, 2018),近海快速加强的 1010 号台风莫兰蒂、1409 号台风威马逊、1522 号台风彩虹和 1713 号台风天鸽等(高拴柱等, 2012;程正泉等, 2017;刘赛赛等, 2017;王靖等, 2018)。这样的台风有时会出现较大的预报失误,造成严重灾害和巨大损失,难以取得满意的服务效果(王秀荣等, 2018)。因此,对台风活动特征的分析 and 预报中难点问题的总结仍需持续、深入地进行下去,它是开展台风机理研究的基础,同时也可以为开发客观预报方法和改进模式预报性能提供线索。

本文利用 1949—2016 年中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)台风最佳路径资料、2017 年中央气象台、日本气象厅(Japan

Meteorological Agency, JMA)、美国联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)的台风路径和强度实时预报资料,欧洲中期预报中心(European Center for Medium Weather Forecasting, ECMWF)和美国环境预报中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)的数值预报产品以及 NCEP 的全球实时(Real-Time Global, RTG)海温分析产品(RTG_SST)等,首先对 2017 年西北太平洋和南海台风活动的主要特征进行总结,然后对 2017 年度台风预报误差进行分析,最后对业务中的主要预报技术难点进行讨论,以期对未来台风业务预报和研究提供参考。

1 2017 年台风活动特征

2017 年度,在西北太平洋和南海共有 27 个台风生成(图 1a),与多年平均值(26.9 个,图 2a)持平。2017 年度有 8 个台风在我国沿海登陆,登陆台风个数较多年平均(7.0 个,图 1b)偏多 1 个。

1.1 台风生成特征

2017 年度,在西北太平洋和南海共有 27 个台风生成,与多年平均值持平(26.9 个,图 2a),但是从生成源地来看,150°E 以西海域生成的台风多达 23 个(图 2b),占全年生成总数的 85.2%,高于多年平均值(21.4 个,79.9%);南海海域(120°E 以西海域)有 8 个,占总数的 29.6%,比多年平均值(4.6 个,17.1%)多 3.4 个(偏多 73.9%)。

从台风的生成时间来看(图 2c),7、8 月台风生成数明显偏多,特别是 2017 年 7 月,有 8 个台风生成,较多年平均值(4.0 个)偏多 4 个(偏多一倍);8 个台风中有 6 个生成于 7 月下旬,特别是 7 月 21 和 22 日,2 天内有 4 个台风生成。按照季风槽内 TC 群发的定义(吕心艳和端义宏, 2011),2017 年度共有 5 次季风槽内的 TC 群发过程(1707 和 1708、1709 和 1710、1715 和 1716、1718 和 1719、TD03 和

1720),较多年平均值(3.8次)偏多1.2次。另外,还有一次为大洋中部槽(TUTT cell)内的群发过程(1705和1706)。2017年度,台风生成具有源地偏西、南海台风偏多、台风群发特征明显等特征。

1.2 台风活动特征

1.2.1 年度台风生命史特征

台风生命史是指台风从生成到消亡的时间(单位:h)。利用式(1)计算单个台风的生命史:

$$L_i = (n - 1)6 \quad (1)$$

式中, L_i 表示单个台风的生命史, n 表示在台风最佳路径中数据点的个数。计算单个台风生命史时, n 从第一个风速 $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数据点开始算起到最后一个数据点结束,即排除了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。将当年每一个台风的生命史累加可得到年度台风生命史。由于台风最佳路径数据集为每6h一个数据点,利用式(1)进行计算,将导致只有一个数据点的台风生命史为0h,与实况相比有一定误差,但是由于计算标准一致,因此在年际的尺度上进行比较,对于判断年度台风的活跃程度仍具有参考意义。年度台风生命史由该年所有台风生命史累加而得,年度台风生命史越长,表明该年台风活跃程度越高。

从年度台风生命史时间序列图(图3a)可以看出,1949—2017年年度台风生命史在1392~6390h,平均为4011h,平均单个台风的生命史长度为148h(6.2d)。年度台风生命史长度受到当年台风总数和单个台风生命史长度的影响,如年度生命史最低的1998年只有14个台风生成,且每一个台风的平均生命史只有99h(4.1d)。台风个数少且单个台风生命史短,两方面的因素共同造成了该年台风极度不活跃。相反,年度生命史最长的1967年(6390h)有40个台风生成,其中超过200h的台风有11个,台风Opal生命史达486h,位于单个台风生命史最长的第三位。台风个数多且单个台风生命史长,两方面的因素共同造成了该年台风极度活跃。

2017年年度台风生命史为2748h,较多年平均值低1263h;平均单个台风生命史为102h(4.3d),较多年平均值低46h(1.9d)。2017年年度台风生命史仅高于1998年(1392h)、2010年(1746h)、1999年(1902h)和1983年(2550h),与1995年(2748h)并列位于年度台风生命史最低值的第五

位,台风活跃程度低。2017年台风生成个数与多年平均值相当,但是只有1705号台风奥鹿、1718号台风泰利、1721号台风兰恩和1726号台风启德共4个台风生命史在多年均值以上,其他台风的生命史均较短。因此,从年度台风生命史来看,2017年台风活跃程度低,这主要是由于大多数台风生命史较短造成的。

1.2.2 台风极值强度特征

2017年度台风的极值强度为 $58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (16级),较多年平均极值强度 $72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (17级以上)低 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,位于极值强度由低到高排名的第四位(图3b),仅高于1999年($50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、1996年($55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和2002年($55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。2017年度的年平均极值强度为 $32.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (11级),较多年平均值($40.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,13级)低 $7.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;位于年平均极值强度由低到高排名的第二位,仅高于1999年($28.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。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)的台风共有14个,占比51.8%,较多年平均值(10.5个)多3.5个(多12.7%);极值强度较强的强台风级和超强台风级($\geq 41.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,14级及以上)的台风共有8个,较多年平均值(10.6个)少2.6个(少9.8%);特别是极值强度 $\geq 51.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (16级及以上)的超强台风只有2个,较多年平均值(5.9个)少3.9个,仅多于1999年(0个)、1985年(1个)、1998年(1个)和2002年(1个);超强台风占比为7.4%,较多年平均值(22.1%)低14.7%。因此,2017年度台风的极值强度弱,且全年台风的整体强度偏弱,超强台风显著偏少。

1.2.3 多台风同时活动特征

从统计分析来看(图4a),两个或多个台风同时活动(多台共存:在6h间隔的路径数据中,至少有一个时间点重叠且台风中心风速 $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)并不罕见,年平均频次为9次。台风生命史长或者生成时间集中是导致台风共存的两个主要因素。Dong and Neumann(1983)曾经指出,季风槽和TUTT cell持续活跃是造成多台共存的主要形势;因为这两种形势下,极易造成台风群发。2017年度虽然台风群发过程偏多,但是大多数台风生命史较短,因此多台共存只出现了7次(图4b~4h),较多年平均少2次。在7次多台共存中有5次2台、1次3台、1次4台。4台共存是非常罕见的现象,资料分析表明(图4a),4台共存只出现过14次,占总

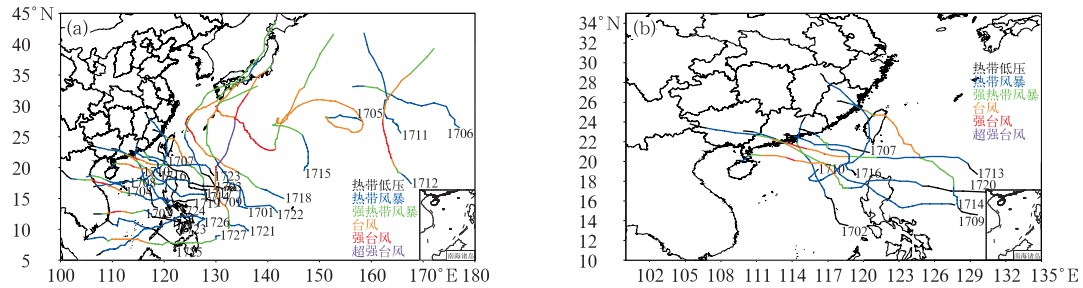


图1 2017年西北太平洋和南海生成台风(a)和登陆中国台风(b)路径图

Fig.1 Tracks of TCs over Western North Pacific and South China Sea (a) and those making landfall over China coastal areas (b) in 2017

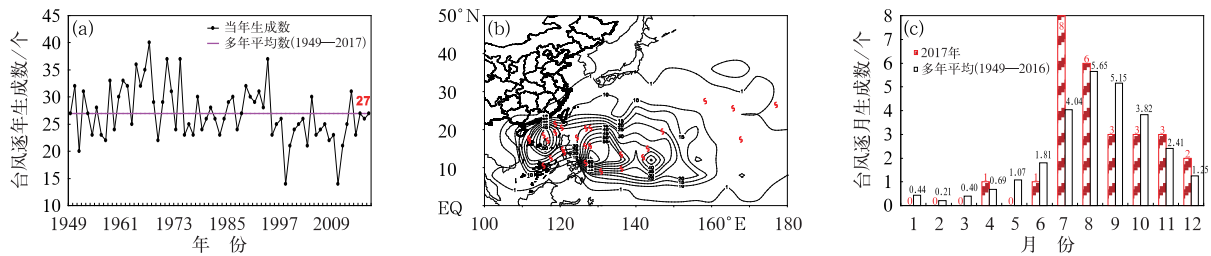


图2 西北太平洋和南海(a)1949—2017年逐年生成台风频数变化曲线;

(b)2017年台风生成位置分布(9)与1949—2016年台风生成源地密度分布(等值线,

单位: $\text{个} \cdot \pi^{-1} \cdot \text{r}^{-2}$, $r=250 \text{ km}$);(c)2017年与多年平均逐月生成台风频数对比

Fig.2 (a) Variation curves of the annual TC formation frequency over Western North Pacific

and South China Sea from 1949 to 2017, (b) TCs' generating location in 2017 (9) and

origin distribution density in 1949—2016 (isoline, unit: $\text{个} \cdot \pi^{-1} \cdot \text{r}^{-2}$, $r=250 \text{ km}$);

(c) comparison of the monthly TC formation frequencies between 2017 and the average of 1949—2017

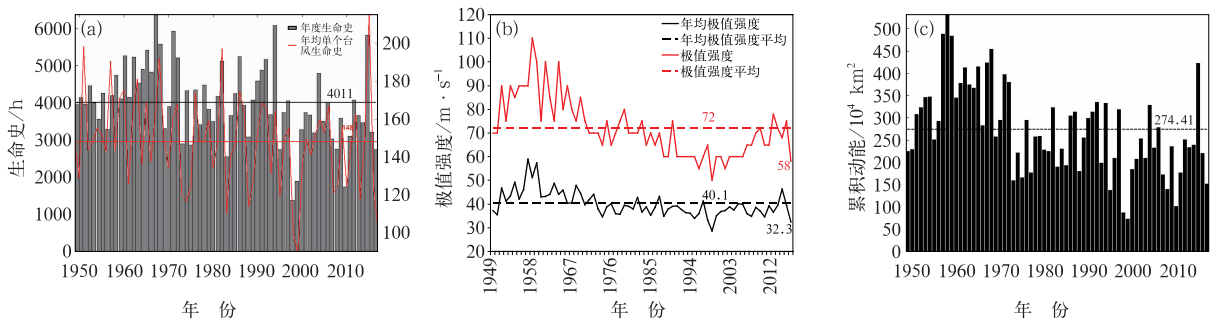


图3 1949—2017年西北太平洋和南海逐年台风年度生命史和年均单个

台风生命史(a)、极值强度(b)和累积动能(c)

Fig.3 TCs' annual lifetime and average lifetime per TC (a), extreme intensity (b), accumulated cyclone energy (c) over Western North Pacific and South China Sea in 1949—2017

频次的1%。2017年度出现4台共存主要有两个原因,一是台风集中生成,7月21和22日2天内有4个台风集中生成(1705、1706、1707、1708);二是1705号台风奥鹿特别“长寿”。“奥鹿”生命史长达438 h(18.3 d),是2017年度最“长寿”的台风,在最

长生命史排序中排名第六位,仅次于1972年的“Rita”(540 h)、1986年的“Wayne”(504 h)、1967年的“Opal”(486 h)、1953年的“Nina”(456 h)和1983年的“Abby”(444 h)。“奥鹿”的超长生命史导致其参与了1次4台、1次3台和1次2台共存,一直活跃

表 1 2017 年台风极值强度分布与多年情况对比

Table 1 Comparison of TCs' extreme intensity distribution between 2017 and 1949–2017

台风极值强度 等级	热带风暴 (TS)	强热带风暴 (STS)	台风 (TY)	强台风 (STY)	超强台风 (Super TY)	合计
中心风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	17.2~24.4	24.5~32.6	32.7~41.4	41.5~50.9	≥ 51.0	
1949—2017 年总个数/个	291	435	402	321	410	1859
多年平均数/个	4.2	6.3	5.8	4.7	5.9	26.9
2017 年个数/个	8	6	5	6	2	27
2017 年占比/%	29.6	22.2	18.5	22.2	7.4	100
多年平均占比/%	15.7	23.4	21.6	17.3	22.1	100

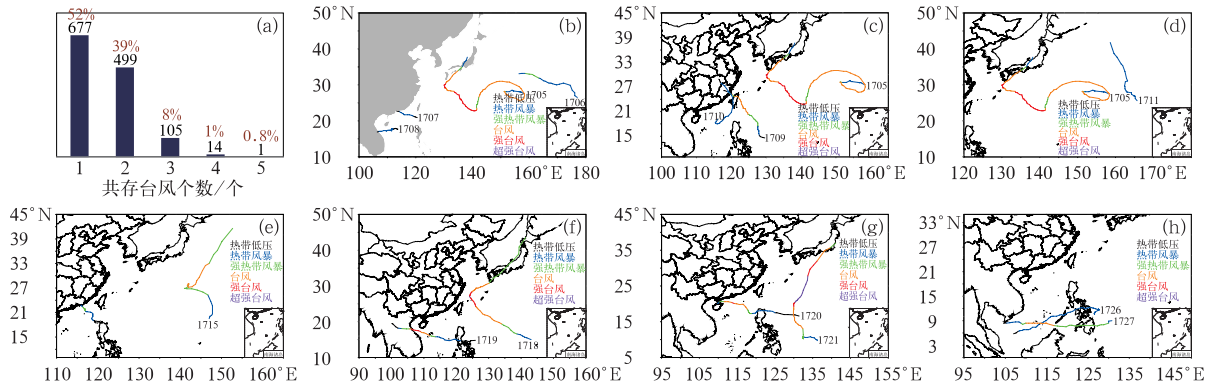


图 4 1949—2017 年西北太平洋和南海多台风共存频次分布(a), 2017 年西北太平洋和南海 4 台风(b), 3 台风(c), 2 台风(d~h)共存示意图

Fig. 4 Frequency distribution of multiple TCs over Western North Pacific and South China Sea from 1949 to 2017 (a), multiple TCs over Western North Pacific and South China Sea in 2017 with (b) four TCs, (c) three TCs, (d–h) two TCs

到 1711 号台风尼格停编后 2 d 才消失。

1.2.4 台风活跃程度特征

台风的年度生成个数、生命史和极值强度分布只能从单个侧面反映当年台风的活跃程度。为了更加全面、定量地评估年度热带气旋的活跃程度,美国海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)在 20 世纪 90 年代末提出了以台风累积动能(accumulated cyclone energy, ACE)指数代表热带气旋的年度活跃程度(Bell et al, 2000; Waple et al, 2002)。ACE 指数是以某一个区域、整个台风季、每 6 h 间隔台风最大持续风速平方和的累积代表该区域的台风季节活跃程度。该指数可综合表征台风的个数、持续时间和强度等信息,近年来在业务和研究中被广泛使用(邱品竣和余嘉裕, 2006; 黄丽娜等 2009; 2013)。ACE 指数的计算公式为:

$$ACE = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (V_{i,j})^2 \quad (2)$$

式中, V 为台风中心最大持续风速值, 单位为 kn

($1 \text{ kn} \approx 0.514 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); i 是当年的台风个数; j 是每个台风生命史期间 6 h 间隔的数据点数; ACE 指数只累加台风生命史阶段的台风动能, 其中生命史的定义与式(1)相同; ACE 的单位为 10^4 kn^2 。

从 ACE 指数的逐年分布时间序列图中(图 3c)可以看出, 西北太平洋和南海区域台风最活跃的为 1958 年($533 \times 10^4 \text{ kn}^2$), 最不活跃的是 1999 年($73 \times 10^4 \text{ kn}^2$), 均值为 $274 \times 10^4 \text{ kn}^2$; 最高值和最低值相差 6.3 倍。2017 年的台风活跃程度较低, ACE 指数为 $152 \times 10^4 \text{ kn}^2$, 在排序中位于 ACE 由低到高排名的第六位, 仅高于 1999 年($73 \times 10^4 \text{ kn}^2$)、1998 年($87 \times 10^4 \text{ kn}^2$)、2010 年($102 \times 10^4 \text{ kn}^2$)、1995 年($137 \times 10^4 \text{ kn}^2$)和 2008 年($140 \times 10^4 \text{ kn}^2$)。从上面的分析可以看出, 台风生命史短和强度偏弱共同造成了 2017 年度 ACE 指数偏低。

1.3 台风登陆特征

2017 年共有 8 个台风 10 次登陆中国沿海地区

(表 2),其中广东 5 次、台湾 2 次、香港 1 次(不含二次登陆),登陆中国的台风个数和频次均较多年平均值偏多(图 5a)。从登陆地点的分布来看,2017 年登陆地点明显偏南,8 个台风的 10 次登陆均在福建及其以南地区;2017 年有 5 个台风登陆广东,较多年平均(2.7 个)偏多近一倍;没有台风在海南登陆,较多年平均(1.4 个)偏少(图 5b)。从历史资料分析来看,从 1949—2017 年的 69 年中,有 16 年出现了海南空台的情况,占比为 23%,因此海南空台并不是非常罕见。

2017 年登陆台风强度偏弱,平均第一次登陆强度为 $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,较多年(1949—2016 年)平均值($32.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)弱 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;2017 年度平均登陆强度(含多次登陆)为 $28.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,较多年平均值($31.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)弱 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;登陆时间集中:“纳沙”和“海棠”在 21 h 内先后登陆同一地点(福建福清);“天鸽”和“帕卡”4 天内先后登陆广东珠海和台山。综上所述,2017 年度在台风登陆方面具有登

陆个数偏多、登陆强度弱、登陆位置集中且偏南等特征。

2 预报误差分析

2.1 路径预报误差

2017 年中央气象台 24、48、72、96 和 120 h 各时效台风路径预报误差分别为 74、137、233、318、428 km(图 6a);较 2016 年的 66、127、213、292、364 km 分别增加了 8(12%)、10(8%)、20(9%)、26(9%)和 64 km(18%)。24 和 48 h 预报误差优于或持平于过去 5 年的平均值(77 和 137 km),但 72、96 和 120 h 的长时效预报不及过去 5 年的预报水平(204、280 和 386 km)。与日、美相比,除 120 h 外,中国在各时效的预报水平处于领先地位(图 6b);但是中、日、美(CMA、JMA 和 JTWC,即西北太平洋三个主要台风预报预警中心)2017 年的台风路径官

表 2 2017 年登陆我国的台风一览表

Table 2 List of the typhoons making landfall on China in 2017

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
1702	苗柏 Merbok	25	广东深圳	6 月 12 日 23:10	9	23	990
1707	洛克 Roke	20	香港	7 月 23 日 09:50	8	20	995
1709	纳沙 Nesat	40	台湾宜兰	7 月 29 日 19:40	13	40	960
1710	海棠 Haitang	23	福建福清	7 月 30 日 06:00	12	33	975
			台湾屏东	7 月 30 日 17:30	9	23	984
			福建福清	7 月 31 日 02:50	8	18	990
1713	天鸽 Hato	48	广东珠海	8 月 23 日 12:50	14	45	950
1714	帕卡 Pakhar	33	广东台山	8 月 27 日 09:00	12	33	978
1716	玛娃 Mawar	25	广东汕尾	9 月 3 日 23:30	8	20	995
1720	卡努 Khanun	42	广东湛江	10 月 16 日 03:25	10	28	988

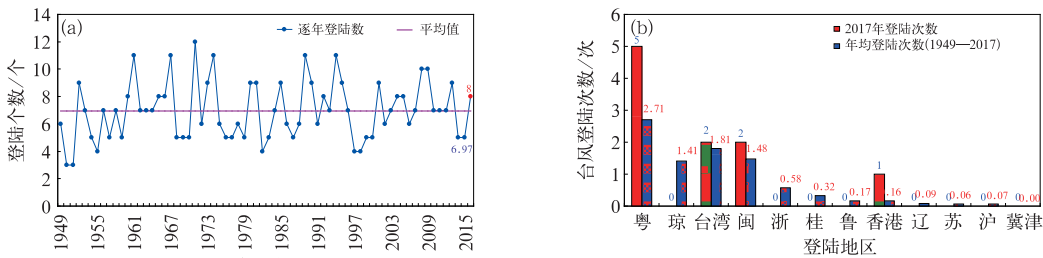


图 5 1949—2017 年西北太平洋和南海逐年登陆中国台风频数变化(a),1949—2017 年平均与 2017 年登陆台风在各省(市、区)的分布对比(b)

Fig. 5 Curve of the annual frequency of TC landing on China over Western North Pacific and South China Sea from 1949 to 2017 (a), comparison of the provincial distribution of TCs making landfall between 2017 and 1949—2017 (b)

方预报误差均较 2015 年有所增加(图略)。官方预报是预报员基于模式、客观方法和预报经验所做出的综合判断,因此模式的表现对官方预报的影响比较大。与 2015 年相比,2017 年度 ECMWF 和 NCEP 等全球模式及集合预报系统的误差均有所增加(Chen et al, 2018),这可能是各预报中心官方预报误差增加的重要原因。

从台风的路径误差分布中可以看出(表略),误差较大的样本主要集中在 1705 号台风奥鹿、1708 号台风桑卡、1709 号台风纳沙、1712 号台风榕树、1715 号台风珊瑚、1718 号台风泰利和 1721 号台风兰恩 7 个台风。分析发现,路径误差较大的台风可分为两类:(1)多台并存期间的台风,(2)远海、转向的长路径台风。表明对这两类台风的预报难度较大,无论是模式的预报能力、客观方法,或是预报员的订正能力均十分有限。在大误差的 7 个台风中,前 3 个台风表现为多台并存特征;由于 1705 奥鹿的生命史长达 438 h(18.3 d),其整个生命史经历了 4 台和 3 台共存的阶段(图 4b 和 4c);1708 和 1709 号台风误差较大的样本均出现在其与另外一个台风近

距离相互作用阶段。多台之间及台风与周边系统之间复杂的相互作用,导致预报难度加大、误差增加。后 4 个大误差台风的共同特征是生命史长、远海转向(1718 号台风泰利为东海转向)。这类台风的大误差一般出现在转向期间,这可能是由于模式对转向点的预报偏差造成的,即模式对于副热带高压(以下简称副高)断裂的时间和位置预报不准确。从全年台风来看,西行台风的预报效果最好,即当副高强度较强且呈带状分布,台风的路径为稳定的西行路径时,模式的预报效果最好。

2.2 强度预报误差

2017 年台风强度预报各时效误差分别为 3.6、5.4、6.6、7.4 和 6.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;较 2016 年的 5.0、6.9、6.7、7.9、8.9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 分别减小 1.4、1.5、0.1、0.5 和 2.1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;特别是 24 h 误差为历史最低值(图 7a)。从中、日、美三家的对比来看,24~72 h 时效日本最佳、中国居中(图 7b)。台风强度预报水平的提高可能与模式预报性能的改进有关,但是从统计来看,强度预报误差与台风自身的强度有关。

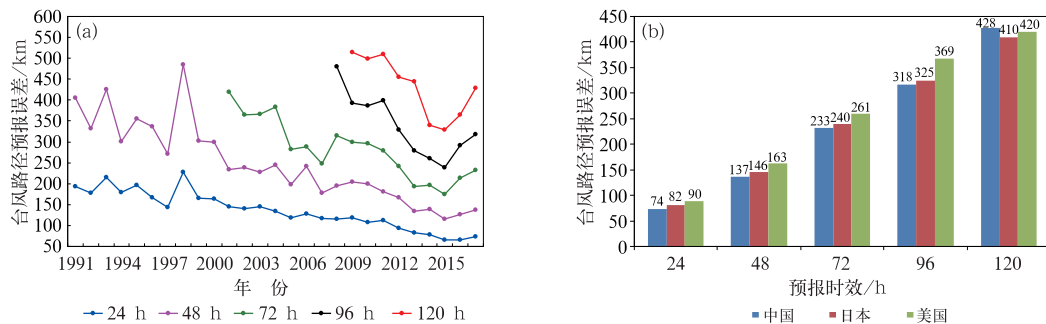


图 6 1991—2017 年中央气象台官方预报(a)和 2017 年中、日、美官方预报对比(b)台风路径预报误差

Fig. 6 TC track errors of CMA official forecast from 1991 to 2017 (a), comparison of CMA, JMA and JTWC official forecast in 2017 (b)

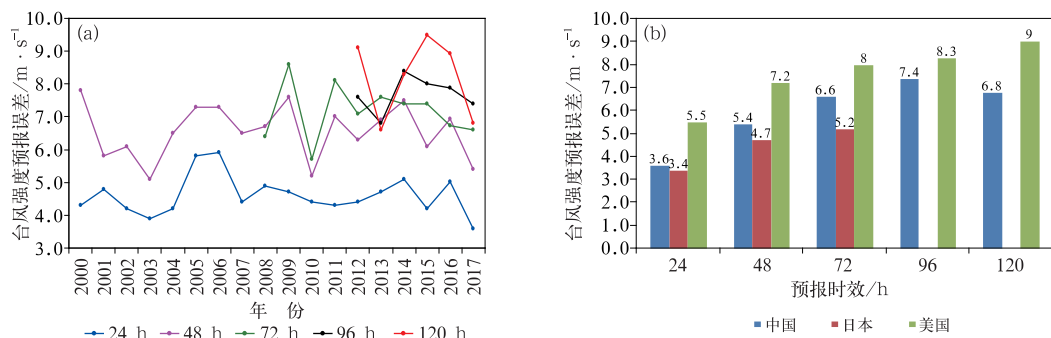


图 7 同图 6,但为台风强度预报误差

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for TCs' intensity errors

2017年台风整体强度偏弱,这可能也是误差偏小的一个原因。

强度预报误差较大的台风主要有7个,分别为1705号台风奥鹿、1709号台风纳沙、1712号台风榕树、1713号台风天鸽、1718号台风泰利、1722号台风苏拉和1724号台风海葵。在这7个台风中,1709、1713、和1724为西行或西北行台风;1709号台风纳沙出现大误差是对其登陆福建以后的快速减弱估计不足;1713号台风天鸽是由于近海快速加强阶段预报偏弱;1724号台风海葵是对其南海遭遇冷空气引起快速减弱消失出现了预报偏差;另外4个为转向台风,其中前3个为远海转向,模式对这类台风的预报能力有限,预报员经验不足,导致2017年预报一部分远海台风路径和强度误差均较大;对最后一个1718号台风泰利的路径预报偏差(预报登陆但实际为东海转向)导致了大的强度预报误差。

3 预报难点分析

3.1 双台或多台相互作用增加预报难度

2017年度多次出现双台或多台并存的现象。台风之间以及台风与周边系统之间的相互作用复杂,特别是1709纳沙和1710海棠之间近距离的双台风作用明显(在此期间1705号台风奥鹿存在,为3台共存,图4c),导致预报难度加大。“纳沙”和“海棠”先后于2017年7月30和31日在福建福清登陆,登陆后环流合并北上,自南向北先后影响台湾、福建、浙江等18个省(区、市),造成大范围的风雨影响。双台风具有登陆前双台风作用明显、24 h内在同一地点登陆、登陆后两个台风环流合并、“海棠”非对称结构对风雨分布有明显影响、台风倒槽和西风带系统结合致使降水范围大时间长等五大特点。双台风的路径和强度预报具有“纳沙”起编时刻确定预报方向难度大、双台风作用导致登陆前路径不确定性大和登陆后合并难把握,以及“纳沙”登陆福建的强度预报难确定等三大预报难点。分析结果显示:三大预报难点分别是由于模式在长时效对副高和高空急流的预报偏差、罕见的近距离双台风作用、一次登陆强度和地点的摆动等原因造成的,其中特别难把握的是前两点。

7月26日,在1709号台风纳沙起编时,GRAPES、T639、ECMWF和NCEP模式对其后期

的路径方向预报存在较大分歧:前三个模式均预报其将向东北方向移动,只有NCEP模式预测其将向西北方向移动。分析模式预报出现分歧的原因,主要是由于各家模式在96~120 h时效对副高强度的预报不同造成的。NCEP模式预报副高将一直维持带状形态,而另外三家模式预报副高将出现断裂、东退和减弱的形势(图8c和8d)。分析模式预报的合理性、判断“纳沙”未来的移动方向是此次台风预报的难点之一。自1508号台风鲸鱼路径预报失误之后,预报员通过总结和查阅文献发现(郑艳等,2018; Guard, 1977),一些模式对副热带西风急流的预报存在系统性偏差,导致高层(200或100 hPa)预报场的形势由非转向型变为转向型,正如此次ECMWF模式的高层流场所预报的形势(图8a和8b),而500 hPa副高的形态也随之由带状断裂为东、西两部分,最终导致台风的长时效路径由西行或西北行变为转向型。预报员自2015年开始关注到这种情况,并在2016年1601号台风尼伯特的预报中利用这一经验对预报路径进行了修正,取得了很好的预报效果。此次的预报更为复杂,副高的东北侧、日本南部洋面有另一个台风奥鹿影响着副高的形态,但是对“奥鹿”强度和位置的预报具有不确定性,这些不确定性叠加,使预报难度更大。预报员利用之前的预报经验,结合集合预报等资料对形势场进行综合分析,最终判断“纳沙”将向西北行,取得了较好的预报效果。虽然此次预报成功,但是目前该方法还处于经验性、定性阶段,需要进一步检验和量化。

台风纳沙和海棠先后于7月26和28日生成,两个台风从7月28日20时至30日20时共存时间达2 d(在此期间1705号台风奥鹿存在,3台共存,图4c)。两个台风之间的距离从1000 km逐渐减小到650 km左右,并在先后登陆福建后发生环流合并的现象。Lander and Holland(1993)曾经指出,台风共存期间,由于台风与周边系统之间以及各个台风之间异常复杂的相互作用,会导致预报难度明显增加,预报不确定性增大。从统计来看(图4a),在西北太平洋和南海,双台风共存现象并不罕见,1949—2017年,共发生499次,占全部样本的39%;但是两个台风距离在1000 km以下的样本却比较少,只占双台风样本的7.7%。当两个台风之间的距离在500 km以下时,发生合并的概率较大,但是这种情况一般发生在海上,靠近我国大陆的合并现象非常罕见,在历史上只出现过3次,分别为1970年的

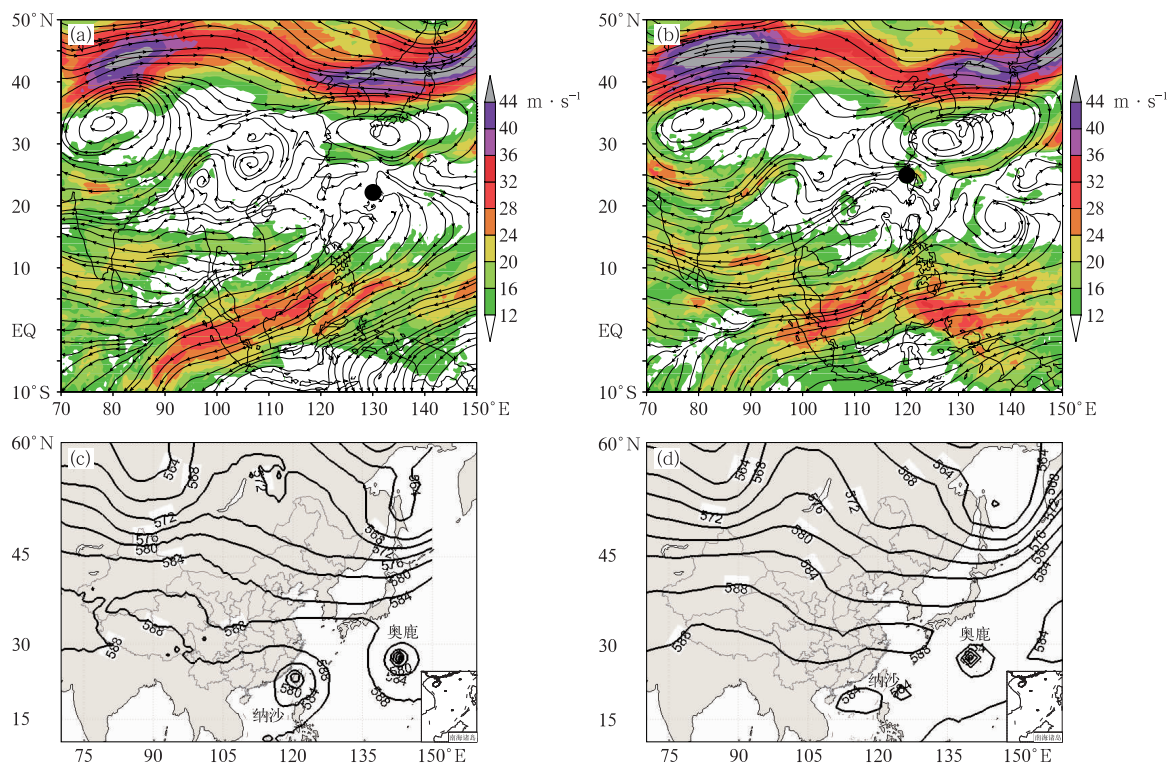


图8 ECMWF模式2017年7月29日20时的96 h(a)和00 h(b)的200 hPa流场和等风速线(填色 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 黑色圆点为台风纳沙的位置); NCEP模式(c)和ECMWF模式(d)25日20时起报的96 h(29日20时)500 hPa高度场(“纳沙”和“奥鹿”的位置分别用各自台风名字标注)

Fig. 8 ECMWF 200 hPa stream and wind (shaded $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 20:00 BT 29 July 2017, (a) 96 h, (b) 00 h (black dot: the location of Nesat); 500 hPa geopotential height 96 h forecast by NCEP (c) and ECMWF (d) at 20:00 BT 29 July 2017 (initial time: 20:00 BT 25 July 2017) (1709 Neast and 1705 Noru are marked by names respectively)

“Ellen”(7009)和“Fran”(7010)在东海合并,1994年的“Tim”(9406)和“Vanessa”(9407)在台湾海峡合并,以及1997年的“Amber”(9714)和“Cass”(97XX)在福建境内合并;在以上三次合并中,除了1970年的“Ellen”和“Fran”强度相当,合并后互旋为一个双眼台风(陈联寿等,2012),另外两次合并都是以弱台风逐渐减弱成为强台风环流一部分的方式发生的。可见,“纳沙”和“海棠”的距离之近及在陆地上环流合并的现象都是非常罕见的。

对这种近距离双台风的预报,不仅模式的预报能力有限,预报员也缺乏预报经验,很难做出有效的订正。从两个台风的预报路径来看,较大预报误差均出现在双台风靠近阶段(图9a和9b)。实际业务中的双台风作用远比理想的藤原效应复杂,Lander and Holland(1993)通过对大量样本的统计分析发现,双热带气旋相互作用的过程可以分为三个阶段:起初为相互靠近,通常是反气旋式地靠近。然后经

历相互捕捉过程,接着发生长时间互旋,互旋过程中两气旋可能相互接近,也可能分离。两者相互作用的停止可能有两种情况,一是其中之一消失,多为合并到主导气旋环流中;另一情况是其中之一从相互影响中迅速逃逸(图9c)。实际上,直接观察台风的移动路径很难发现明显的规律,这些统计结论是在将台风路径转换为相对于质心的运动后得到的。目前尚不能定量地将其用于实际预报,因此双台或多台之间的相互作用以及由此引起的路径和强度的变化目前依然是业务中的预报难点。

3.2 近海快速加强台风的预报问题

1713号台风天鸽于2017年8月23日12:50在广东省珠海市登陆(强台风级,14级,45 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),是2017年度登陆我国的最强台风,与9111号台风弗雷德并列为1949年以来8月登陆广东最强的台风(图10a)。“天鸽”具有近海快速加强、鼎盛

期登陆、正面袭击珠江口、强风及风暴潮破坏力大的特点,特别是在进入南海趋向广东沿海的过程中,其强度迅速增强(图10b),近中心最大风速由22日11时的 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增强至23日11时的 $48\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,中心气压则由985 hPa下降至940 hPa,24 h中心风速增强幅度达 $23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,中心气压下降达45 hPa,其中22日23时至23日11时的12 h内中心风速增强达 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,符合国内外关于台风快速增强的定义(陈联寿和丁一汇,1979;阎俊岳等,1995;黄荣成和雷小途,2010;Kaplan et al, 2010)。

通过对再分析资料和海温观测资料的分析可以发现,“天鸽”具备近海急剧加强台风的海洋和大气环境条件。这些有利条件主要有四点(图11),一是高层热带东风急流急剧加强导致其高层流出快速加强;二是来自南半球的越赤道气流和副高西侧东南风流入的增强有利于低层水汽和能量的卷入;三是

南海北部和广东中西部偏暖的海表温度;四是其高低空环境风垂直切变一直维持在 $6.3\sim 8.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的较小区间。统计表明,当环境风垂直切变(即200~850 hPa的水平风速差)较小时,有利于台风的加强(陈联寿和丁一汇,1979;梅双丽和江静,2012;Bender, 1997;DeMaria and Kaplan, 1999;Kaplan and DeMaria, 2003;Wong and Chan, 2004;Pater-son et al, 2005)。

由上述分析可知,“天鸽”具备了台风快速加强所需的有利的大气和海洋环境条件。但在实时业务预报中,给出“天鸽”将出现近海快速加强的预报却有很大难度。主要原因有三点:第一,上述是根据已知路径、利用再分析或观测数据做出的分析,在实时业务中台风未来的移动路径具有不确定性。此次集合预报对“天鸽”的预报路径发散度较大;不同时间起报的确定性模式的预报路径左右摆动幅度较大。

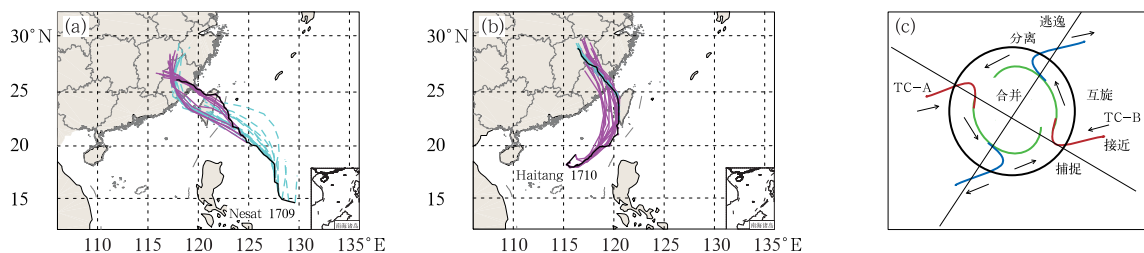


图9 台风实况路径(黑色实线)和所有时段预报路径(虚线,其中粉色虚线为双台风相互作用阶段的预报路径)

(a)1709号台风纳沙,(b)1710号台风海棠,(c)双台风相互作用概念模型(红色、绿色和蓝色分别代表两个台风相互作用期间的接近或捕捉阶段、互旋或合并阶段和分离或逃逸阶段;Lander and Holland, 1993)

Fig. 9 CMA observed track (solid black line) and forecast track (dashed line, pink dashed lines are forecasts on the interaction stage of binary TCs)

(a) 1709 Nesat, (b) 1710 Haitang, (c) conceptual model of interaction between binary TCs (The red, green and blue lines represent the tracks on the stage of approaching or capturing, rotating or merging and releasing or escaping of binary TCs, respectively; Lander and Holland, 1993)

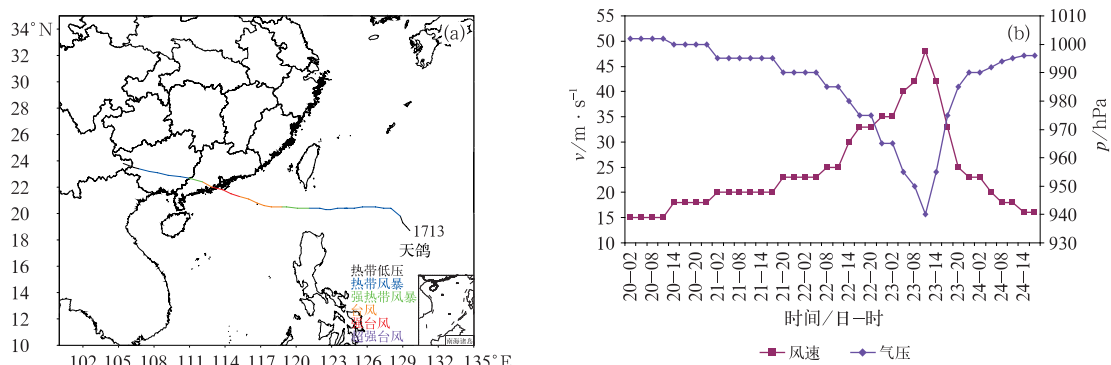


图10 2017年8月20—24日1713号台风天鸽(强台风级)路径(a)与中心风速和气压演变(b)

Fig. 10 Track (a) and curve of wind speed and pressure (b) during the lifetime of 1713 Hato

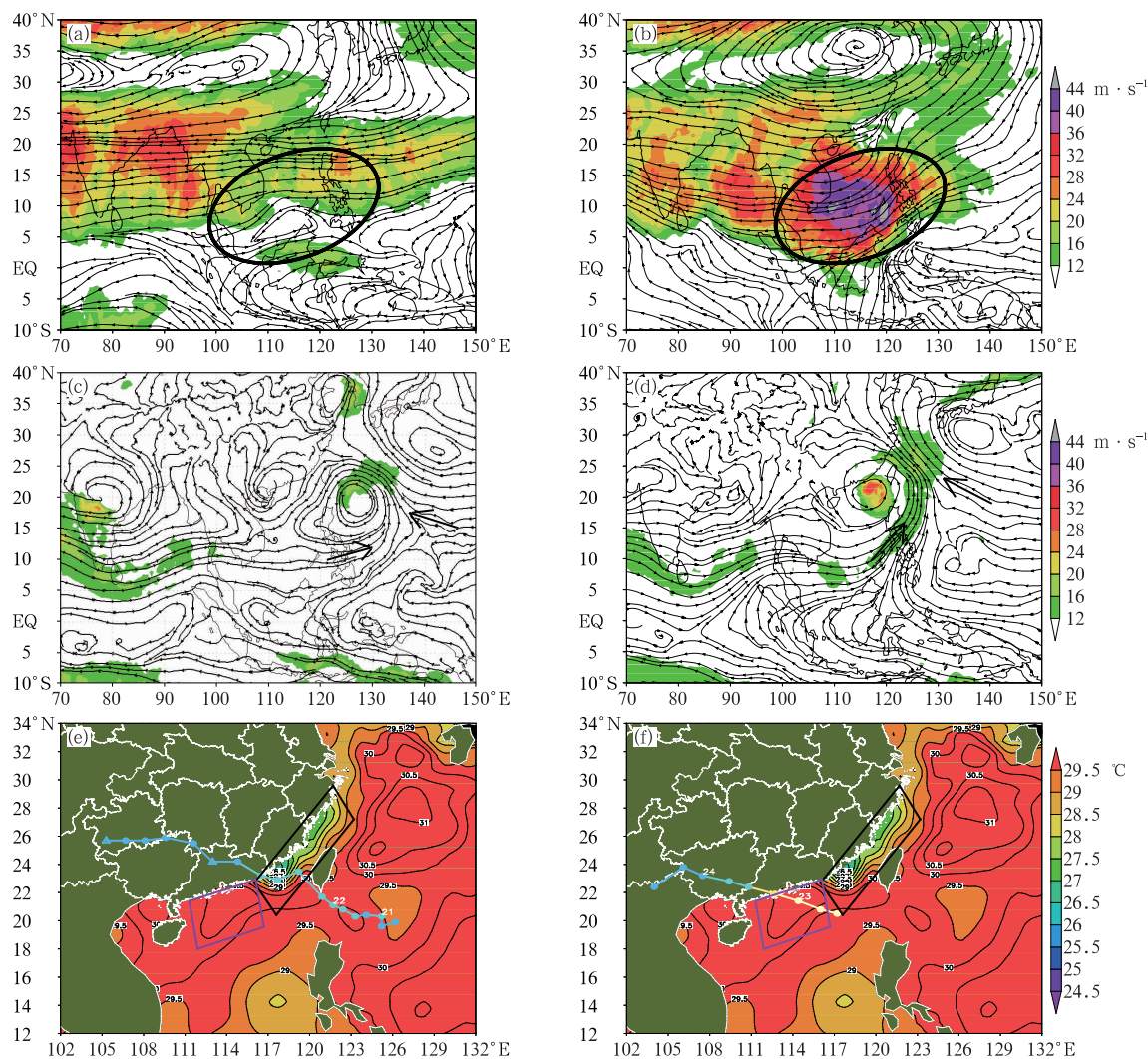


图 11 2017 年 8 月 20 日 20 时(a,c,e)和 22 日 20 时(b,d,f)的 ECMWF 模式 100 hPa(a,b)和 850 hPa(c,d)流线和等风速线($\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 填色)分析场(黑色椭圆区域为热带东风急流区)以及 ECMWF 模式预报路径和 NCEP RTG 海温分析场(e,f; 黑色和紫色方框分别指示了低海温区和高海温区)

Fig. 11 ECMWF 100 hPa (a, b) and 850 hPa (c, d) stream and wind (shaded; wind speed $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tropical easterlies jet is marked by the black ellipse), ECMWF forecast track and NCEP RTG_SST analysis (e, f; Low and high SST area are marked by black and purple squares respectively) at 20:00 BT 20 (a, c, e) and 20:00 BT 22 (b, d, f) August 2017

第二,不同的预报路径所经过的海洋和大气条件不同,一部分模式或集合成员对“天鸽”的预报路径不具备快速加强的条件。一些偏东、偏北的预报路径,将经过一个异常的低海温区,海洋条件明显不利(图 11c);同时,不同的模式对高层急流的预报也有较大差别,一部分模式没有预报出热带东风急流将急剧加强,大气条件是否有利于快速加强是不确定的。因此,在上述四个有利条件中,仅有低层入流和垂直切变是比较确定的有利条件,不足以做出台风

将快速加强的判断。第三,台风近海快速加强是小概率事件,当模式给出的信息不明确时,可能表明系统的可预报性比较差。如果仅根据预报员经验,过早地选取一种预报信息呈现给公众,这样的预报结论存在很大风险。因此,在“天鸽”生命史的早期阶段,对其强度预报采取了稳妥方式,预报其将以正常速度加强;直至登陆前一日,云型发展、路径方向、沿途海温以及高空出流等条件越来越有利于出现快速加强时,才进行了明显地调整,并在预警中明确给出

“天鸽”将出现近海快速加强的信息。但是,近海快速加强台风的预报未来很长一段时间依然是业务中的难点,只有机理研究上取得突破、模式性能明显提高时,才能从根本上解决。

4 结论和讨论

2017年度,在西北太平洋和南海共有27个台风生成,与多年平均值持平,其中8个台风在我国沿海登陆,登陆台风个数较多年平均偏多1个。台风生成具有源地偏西、南海台风偏多、群发特征明显;另外,台风年度活跃程度低、台风极值强度偏弱且超强台风异常偏少;2017年度登陆台风个数多、登陆地点偏南且登陆强度偏弱。

(1) 台风预报误差。24、48、72、96和120 h台风路径预报误差分别为74、137、233、318、428 km;各时效误差均较2016年有所增加。但与日本和美国相比,除120 h外,路径预报水平处于领先地位。多台风之间和与环境的复杂的相互作用,以及长时效的路径预报误差往往偏大,而带状副高下稳定西行台风的路径预报误差一般较小。另外,24、48、72、96和120 h台风强度误差分别为3.6、5.4、6.6、7.4和6.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;较2016年有所减小;24 h误差为历史最低值。强度预报水平居于日本和美国中间。对于快速增强台风的强度预报明显偏弱,误差较大。

(2) 台风预报难点。2017年度最主要的预报难点是双台风或多台风之间复杂的相互作用和近海快速加强台风的强度预报。这两类预报难点问题都包含着更加复杂的台风移动和发展的机理,如副热带西风急流的加强对南亚高压强度和形态的影响,对副高和台风路径的作用;热带东风急流的加强对台风高层出流的影响,以及对台风的路径和强度变化的作用;以及双台或多台之间、台风与周边天气系统之间复杂的相互作用等。这些问题既是台风预报业务中的难题,阻碍着预报水平的提高,影响着台风预报的服务效果;而且又是台风机理研究的核心问题,需要长时间地深入研究,才可能有所突破,从而提高预报精度,更好地服务于社会。

参考文献

陈国民,白莉娜,万日金,2017. 2015年西北太平洋热带气旋预报精度评定[J]. 气象,43(4):501-507. Chen G M, Bai L N, Wan R J, 2017. Verification on forecasts of tropical cyclones over western North Pacific in 2015[J]. Meteor Mon, 43(4):501-507(in Chinese).

陈联寿,丁一汇,1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社:123-474. Chen L S, Ding Y H, 1979. An introduction to the Western Pacific typhoon[M]. Beijing: Science Press:123-474(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:2-3. Chen L S, Duan Y H, Song L L, et al, 2012. Typhoon Forecasting and Disaster[M]. Beijing: China Meteorological Press:2-3(in Chinese).

程正泉,林良勋,杨国杰,等,2017. 超强台风威马逊快速增强及大尺度环流特征[J]. 应用气象学报,28(3):318-326. Cheng Z Q, Lin L X, Yang G J, et al, 2017. Rapid intensification and associated large-scale circulation of Super Typhoon Rammasun in 2014[J]. J Appl Meteor Sci, 28(3):318-326(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).

高拴柱,吕心艳,王海平,等,2012. 热带气旋莫兰蒂(1010)强度的观测研究和增强条件的诊断分析[J]. 气象,38(7):834-840. Gao S Z, Lü X Y, Wang H P, et al, 2012. An observational and diagnostic analysis on the intensity and intensity changes of Typhoon Meranti(1010)[J]. Meteor Mon, 38(7):834-840(in Chinese).

黄丽娜,高建芸,孙健,等,2013. 西北太平洋台风累积动能气候异常特征分析[J]. 气象,39(8):995-1003. Huang L N, Gao J Y, Sun J, et al, 2013. Abnormal climatic features of accumulated cyclone energy over the Northwest Pacific[J]. Meteor Mon, 39(8):995-1003(in Chinese).

黄丽娜,林笑茹,曾华,等,2009. 西北太平洋台风累积动能的气候特征[J]. 气象,35(9):44-50. Huang L N, Lin X R, Zeng H, et al, 2009. Climatological characters for accumulative cyclone energy over western North Pacific[J]. Meteor Mon, 35(9):44-50(in Chinese).

黄荣成,雷小途,2010. 环境场对近海热带气旋突然增强与突然减弱影响的对比分析[J]. 热带气象学报,26(2):129-137. Huang R C, Lei X T, 2010. Comparative analysis of the influence of environment field on rapid intensifying and weakening of tropical cyclones over offshore waters of China[J]. J Trop Meteor, 26(2):129-137(in Chinese).

李永平,郑霞,杨棋,等,2017. 上海市气象局海洋气象数值预报技术研究进展[J]. 气象科技进展,7(6):75-81. Li Y P, Zheng Y X, Yang Q, et al, 2017. Progress of the numerical prediction of marine meteorology in SMB[J]. Adv Meteor Sci Technol, 7(6):75-81(in Chinese).

刘赛赛,张立凤,张晓慧,2017. 台风“彩虹”(1522)近海急剧加强的特征分析[J]. 气象科学,37(4):487-496. Liu S S, Zhang L F, Zhang X H, 2017. Characteristics analysis on rapid intensification of Typhoon Mujigae (1522) over the offshore area of China[J]. J Meteor Sci, 37(4):487-496(in Chinese).

吕心艳,端义宏,2011. 季风槽内热带气旋生成的基本特征分析[J]. 气象学报,69(6):990-1000. Lü X Y, Duan Y H, 2011. Characteristics of the tropical cyclogenesis in the summer monsoon

- trough[J]. *Acta Meteor Sin*, 69(6):990-1000(in Chinese).
- 麻素红, 张进, 沈学顺, 等, 2018. 2016年 GRAPES_TYM 改进及对台风预报影响[J]. *应用气象学报*, 29(3):257-269. Ma S H, Zhang J, Shen X S, et al, 2018. The upgrade of GRAPE_TYM in 2016 and its impacts on tropical cyclone prediction[J]. *J Appl Meteor Sci*, 29(3):257-269(in Chinese).
- 梅双丽, 江静, 2012. 西北太平洋热带气旋迅速增强特征及其影响因素[J]. *热带气象学报*, 28(1):1-11. Mei S L, Jiang J, 2012. Characteristics and influence factors of rapid intensification of tropical cyclones in the western North Pacific[J]. *J Trop Meteor*, 28(1):1-11(in Chinese).
- 邱品竣, 余嘉裕, 2006. 西北太平洋地区台风活跃度分析: 活跃年和不活跃年比较[J]. *台湾大气科学*, 34(3):201-215. Qiu P J, Yu J Y, 2006. Examining typhoon activity in the Western North Pacific: difference between active and non-active years[J]. *TW J Atmos Sci*, 34(3):201-215(in Chinese).
- 王靖, 钱传海, 张玲, 2018. 2017年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. *海洋气象学报*, 38(2):1-11. Wang Q, Qian C H, Zhang L, 2018. The characteristics and impact of typhoon activities over Western North Pacific and South China Sea[J]. *J Mar Meteor*, 38(2):1-11(in Chinese).
- 王秀荣, 张立生, 李维邦, 2018. 台风灾害综合等级评判模型改进及应用分析[J]. *气象*, 44(2):304-312. Wang X R, Zhang L S, Li W B, 2018. Improvement and application analysis of the comprehensive grade evaluation model of typhoon disaster[J]. *Meteor Mon*, 44(2):304-312(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).
- 许映龙, 黄奕武, 2017. 2015年西北太平洋和南海台风活动特征及主要预报技术难点[J]. *海洋气象学报*, 37(1):31-41. Xu Y L, Huang Y W, 2017. The activity characteristics and forecasting difficulties of tropical cyclones over western North Pacific and South China Sea in 2015[J]. *J Mar Meteor*, 37(1):31-41(in Chinese).
- 许映龙, 吕心艳, 张玲, 等, 2015. 1323号强台风菲特特点及预报难点分析[J]. *气象*, 41(10):1222-1231. Xu Y L, Lü X Y, Zhang L, et al, 2015. Analysis on the characteristics and forecasting difficulty of Severe Typhoon Fitow (No. 1323)[J]. *Meteor Mon*, 41(10):1222-1231(in Chinese).
- 阎俊岳, 张秀芝, 陈乾金, 等, 1995. 热带气旋迅速加强标准的研究[J]. *气象*, 21(5):9-13. Yan J Y, Zhang X Z, Chen Q J, et al, 1995. The standard of rapidly intensified tropical cyclones[J]. *Meteor Mon*, 21(5):9-13(in Chinese).
- 郑艳, 程守长, 蔡亲波, 等, 2018. 台风鲸鱼(1508)路径和降水业务预报偏差原因分析[J]. *气象*, 44(1):170-179. Zheng Y, Cheng S C, Cai Q B, et al, 2018. Analysis on the forecast deviation of Typhoon Kujira (1508) in track and rainfall distribution[J]. *Meteor Mon*, 44(1):170-179(in Chinese).
- Bell G D, Halpert M S, Schnell R C, et al, 2000. Climate assessment for 1999[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 81(6):S1-S50.
- Bender M A, 1997. The effect of relative flow on the asymmetric structure in the interior of hurricanes[J]. *J Atmos Sci*, 54(6):703-724.
- Chen G M, Lei X T, Zhang X P, 2018. Verification of tropical cyclone operational forecast in 2017[R]. Ha Noi: UNESCAP/WMO Typhoon Committee:19.
- DeMaria M, Kaplan J, 1999. An updated statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) for the Atlantic and eastern North Pacific basins[J]. *Wea Forecasting*, 14(3):326-337.
- Dong K Q, Neumann C J, 1983. On the relative motion of binary tropical cyclones[J]. *Mon Wea Rev*, 111(5):945-953.
- Dong L, Zhang F Q, 2016. OBEST: an observation-based ensemble subsetting technique for tropical cyclone track prediction[J]. *Wea Forecasting*, 31(1):57-70.
- Elsberry R L, 2014. Advances in research and forecasting of tropical cyclones from 1963—2013[J]. *Asia-Pac J Atmos Sci*, 50(1):3-16.
- Guard C P, 1977. Operational application of a tropical cyclone recurrence/non-recurrence study based on 200 mb wind fields[R]. San Francisco: Fleet Weather Central/Joint Typhoon Warning Center FPO:96630.
- 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.
- Kaplan J, DeMaria M, Knaff J A, 2010. A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and Eastern North Pacific Basins[J]. *Wea Forecasting*, 25(1):220-241.
- Lander M, Holland G J, 1993. On the interaction of tropical-cyclone-scale vortices. I: observations[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 119(514):1347-1361.
- Paterson L A, Hanstrum B N, Davidson N E, et al, 2005. Influence of environmental vertical wind shear on the intensity of hurricane-strength tropical cyclones in the Australian Region[J]. *Mon Wea Rev*, 133(12):3644-3660.
- Qi L B, Yu H, Chen P Y, 2014. Selective ensemble-mean technique for tropical cyclone track forecast by using ensemble prediction systems[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 140(680):805-813.
- Qian C H, Zhang F Q, Green B W, et al, 2013. Probabilistic evaluation of the dynamics and prediction of Super Typhoon Megi (2010)[J]. *Wea Forecasting*, 28(6):1562-1577.
- Waple A M, Lawrimore J H, Halpert M S, et al, 2002. Climate assessment for 2001[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 83(6):938.
- Wong M L M, Chan J C L, 2004. Tropical cyclone intensity in vertical wind shear[J]. *J Atmos Sci*, 61(15):1859-1876.
- Zhang F Q, Tao D D, Sun Y Q, et al, 2017. Dynamics and predictability of secondary eyewall formation in sheared tropical cyclones[J]. *J Adv Model Earth Syst*, 9(1):89-112.