

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).

2021 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析*

向纯怡 许映龙 高拴柱 王 晴 王海平

国家气象中心,北京 100081

提 要: 利用中央气象台台风实时业务数据和其他观测资料对 2021 年西北太平洋台风活动的主要特征和影响我国的台风的路径、强度及风雨影响进行了分析和回顾。结果表明:2021 年台风生成源地整体偏西,其中 5 个台风在我国南海近海生成;平均极值强度偏弱,有 6 个台风出现了快速增强,其中“灿都”24 h 内增幅达 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;先后有 6 个台风登陆我国,另外 2 个影响我国沿海。预报误差分析表明,主要的强度预报误差来源于快速增强,而路径预报误差在短时效内主要由转向台风造成。在弱引导气流下,“烟花”在移速减慢后出现的偏北向移动与对流层高层高空冷涡的影响有关。由海陆热力差异和局地辐合抬升造成的近岸对流增幅可能是“查帕卡”近海快速加强的主要原因。在副热带高压明显调整的背景下,“灿都”在东海北部长达 3 天的回旋给华东地区带来了明显的风雨影响。

关键词: 台风,活动特征,预报检验,引导气流,近海快速增强

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2022. 053001

Analysis of the Characteristics and Forecast Difficulties of Typhoon over the Western North Pacific in 2021

XIANG Chunyi XU Yinglong GAO Shuanzhu WANG Qian WANG Haiping

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the operational real-time typhoon data of National Meteorological Centre and other sources of observations including automatic station and satellite images, the main characteristics of typhoon activities in Western North Pacific and the South China Sea in 2021, including influential tracks, strength, wind and rainfall, are analyzed and reviewed. It is found that in 2021, the genesis region was obviously westward, with five typhoons generated in the South China Sea. The overall strengths of the typhoons were weaker than normal, and six typhoons experienced rapid strengthening activities, among which Typhoon Chanthu increased to $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ within 24 hours, which was rare in the past 30 year. Six typhoons made landfall in China and the other two affected coastal areas. The forecast error analysis shows that the main strength forecast error was due to the rapid strengthening cases, while the track forecast error was mainly caused by the sharp turning of typhoons. Under the weak steering flow, the northward movement of Typhoon In-Fa after slowing down was related to the influence of upper-tropospheric cold low. The increase of offshore deep convection caused by land-sea thermal difference and local convergence could be the main reason for the offshore rapid strengthening of Typhoon Cempaka. Under the background of the obvious adjustment of the subtropical high, Typhoon Chanthu dwelled over the northern part of the

* 国家重点研发计划(2017YFC1501604)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J027)共同资助

2022 年 3 月 25 日收稿; 2022 年 6 月 9 日收修定稿

第一作者:向纯怡,主要从事台风监测及预报研究. E-mail: xiangcy@cma. gov. cn

通讯作者:许映龙,主要从事台风预报研究. E-mail: xuyl@cma. gov. cn

East China Sea for three days bringing obvious rainfall and gale winds to the East China.

Key words: typhoon, characteristic of activity, forecast verification, steering flow, offshore rapid intensification

引 言

台风(也称热带气旋)是影响我国的极端天气之一,我国也是世界上受台风影响最严重的国家之一,平均每年约有 7 个台风登陆我国沿海,登陆台风会带来强风、暴雨、风暴潮等灾害(端义宏等,2012)。台风登陆常给我国沿海和内陆地区造成巨额经济损失和人员伤亡,尤其是在经济发达和人口密度高的东南沿海地区(许映龙等,2010;端义宏等,2014)。

尽管 2021 年台风灾害给我国造成的经济损失及人员伤亡相对较轻,但在实际业务预报中仍面临了许多困难及挑战。如 2106 号台风烟花在移动过程中出现了 3 个时段的移速减慢过程,既包括了移速减慢后伴随的移动方向调整,使得预报登陆地点从浙闽交界调整到浙江中部沿海,也包括首次登陆后在杭州湾停滞少动长达 18 h,给二次登陆预报带来诸多困难。又如 2107 号台风查帕卡属于典型的南海“土台风”,其在近海快速加强并在较短时间内登陆,给灾害防御提出了较大挑战。再如 2114 号台风灿都生成后即出现 24 h 内 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极端快速增强,该情况仍是目前台风预报领域很难解决的瓶颈问题之一;而在一度预报其会在浙江北部沿海登陆的情况下,最终“灿都”近距离擦过舟山群岛,并在东北北部徘徊长达 3 d,说明台风的登陆或擦过仍是实际预报中不可回避的现实问题。因此,本文对 2021 年西北太平洋和南海台风活动情况及登陆台风的特征进行回顾,对预报难点进行初步分析和讨论,发现预报中的预报难点和值得讨论的问题,为改进台风预报业务水平提供有利参考。

采用中央气象台台风实时业务定位定强数据作为台风特征分析及预报检验数据来源,使用的实况观测资料包括:全国地面气象自动站观测资料、风云气象卫星资料、沿海雷达资料等。文中提到历史同期均采用的是 1949—2020 年平均。并且利用民政部门提供的台风灾害数据等分析了登陆台风的灾害损失。另外,在对台风预报难点分析时使用了欧洲中心的再分析资料 ERA5。

1 2021 年西北太平洋台风活动特征

1.1 台风生成特征

1.1.1 生成源地特征

2021 年西北太平洋和南海生成的 22 个台风,其平均生成位置 (16.6°N 、 132.0°E) 较历史平均生成位置 (16.1°N 、 136.5°E) 偏西约 4.5° 、偏北约 0.5° ,源地整体偏西(图 1)。5 个台风在我国南海近海生成(2104 号“小熊”、2107 号“查帕卡”、2109 号“卢碧”、2115 号“电母”和 2117 号“狮子山”),其中“小熊”“查帕卡”“卢碧”生成时距离海岸线在 200 km 以内,且都在华南沿海登陆,属于典型的南海“土台风”。

1.1.2 生成数量特征

2021 年西北太平洋和南海共有 22 个台风(热带风暴级及以上)生成,较历史平均(27.0 个)偏少 5.0 个。西北太平洋和南海连续两年出现台风生成数偏少的情况,特别是 2020 年 7 月出现了历史上首个“空台”事件。Wang et al(2021)研究认为,ENSO

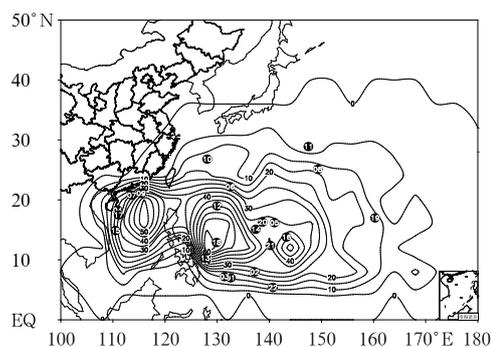


图 1 2021 年台风生成位置(标号代表台风编号)与 1949—2020 年历史平均生成源地密度(等值线,单位: $\text{个} \cdot \pi^{-1} \cdot \text{R}^{-2}$, $R=250 \text{ km}$)分布

Fig. 1 Density distribution (contour, unit: $\text{each} \cdot \pi^{-1} \cdot \text{R}^{-2}$, $R=250 \text{ km}$) of TC formation over Western North Pacific and the South China Sea from 1949 to 2020 with 2021 TC genesis locations (TC number in black circle)

循环对西北太平洋台风活动有明显的影响(申松林和江静,2010;黄勇等,2008)。从 2020 年春季热带太平洋的 El Niño 事件衰减后,赤道中东太平洋海温转为冷位相,进入连续两年的 La Niña 事件(刘芸芸和高辉,2021),2021 年作为 La Niña 事件衰减年,7 月热带大气对前期 La Niña 事件结束后的响应最为强烈(赵俊虎等,2022),热带对流活动被抑制,可能是导致台风活动频数减小的原因之一。

另一方面,西北太平洋和南海海域台风活动有明显的季节性,夏秋季节活跃的台风数量约占全年台风总数的 80% (陈联寿等,2012)。由 2021 年逐月台风生成个数与历史同期对比来看(图 2a),台风活跃季前期(1—6 月)共有 5.0 个台风生成,较历史同期平均值偏多 0.6 个;台风活跃期(7—10 月)共有 15.0 个台风生成,较历史同期平均值偏少 3.5 个;台风季后期(11—12 月)西北太平洋和南海共有 2.0 个台风生成,较历史同期平均偏少 1.8 个。全年来看,除了 2 月、4 月、6 月、10 月台风生成个数达到历史平均值外,其余月份均少于历史平均,而活跃期(7—10 月)内台风生成个数明显偏少。

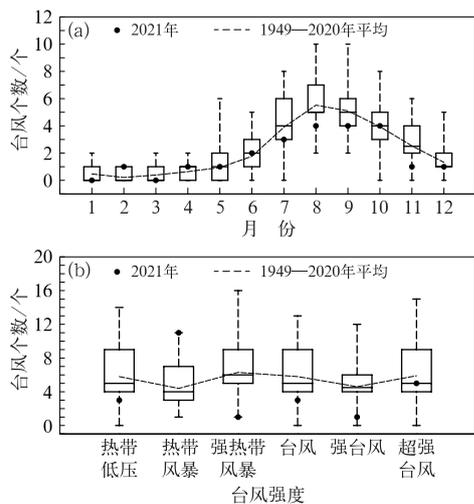


图 2 2021 年(a)逐月和(b)不同强度台风生成个数与历史同期(1949—2020 年)对比 (上、下边缘分别为最大、最小值,箱体上、中、下分别表示第 75%、50%、25%分位值)

Fig. 2 TC number in (a) each month and (b) different strengths in 2021 compared to climatology (The top/bottom lines represent the max/min values, the top/middle/bottom lines in box equal to 75th/50th/25th percentiles)

1.1.3 极值强度特征

22 个台风的平均极值强度(生命史最大强度)为 $34.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12 级),较历史平均值($40.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 13 级)偏低 $5.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从不同等级的极值强度分布上看(图 2b),除热带风暴级(TS)较历史平均值偏多 6.6 个外,强热带风暴级(STS)偏少 5.2 个,热带低压(TD)偏少 2.9 个,台风级(TY)偏少 2.7 个,强台风级(STY)偏少 2.6 个,超强台风级(super TY)与历史同期的统计中位数相当,但较历史均值偏少 0.9 个。台风级及以上的占比(44%)较历史平均(66%)明显偏低,但有 5 个台风达到超强台风级。说明 2021 年台风强度整体偏弱,极值强度呈两极化分布特征,热带风暴级占比明显高于其他等级。

1.2 台风活动特征

1.2.1 群发期特征

西北太平洋的台风多形成于西南季风气流与副热带高压(以下简称副高)南侧偏东气流产生的辐合带中,75% 的台风发生在季风槽内(高建芸等,2011),因此南海夏季风及东亚夏季风活动与台风活跃密切相关(王慧等,2006)。因而分析当年季风的的活动情况与台风活动之间对应关系具有一定的参考意义。由于 2021 年台风生成源地整体偏西,由 2021 年 6—10 月南海夏季风强度指数与台风生成频数的逐日演变分布(图 3)可以看出,南海夏季风偏强阶段(图 3 中红色时段)有 11 个台风活动,较季风活动偏弱阶段(图 3 中蓝色时段)多 5 个。而在南海夏季风最强的峰值时段内(7 月第 4 候至 8 月第 1 候)的 20 天内有 6 个台风活动,其中“卢碧”“银河”

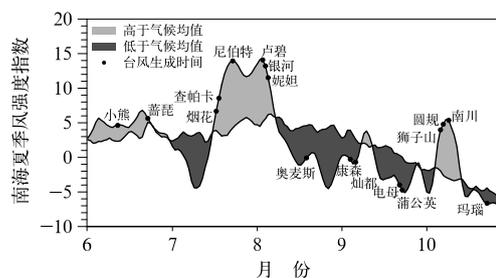


图 3 2021 年 6—10 月南海夏季风强度指数 (数据源自国家气候中心)与台风活动 (The South China Sea summer monsoon index from June to October 2021 (data from National Climate Centre) and the genesis time of TCs)

“妮妲”在 8 月 5—8 日同时活动且均是东北行路径,这可能与季风活跃带来强盛的西南气流有关。另外一个台风的群发期(10 月 8—13 日)，“狮子山”“圆规”“南川”也与南海季风的阶段性增强有关。在南海夏季风偏弱的 8 月下旬至 10 月上旬,也有从“奥麦斯”到“蒲公英”共 5 个台风生成,但他们生成源地除“电母”外均在菲律宾以东,受到南海季风气流的影响较小。可见,南海季风的强弱与该海域夏季台风的群发及间断有明显的对应关系。

表 1 2021 年西北太平洋及南海出现的双台风事件
Table 1 Double typhoon events over Western North Pacific and South China Sea in 2021

序号	台风名称	共同存在时段/BT	最近距离/km
1	烟花、查帕卡	7 月 19 日 08 时至 24 日 23 时	1650
2	卢碧、银河	8 月 5 日 14 时至 9 日 14 时	1280
3	康森、灿都	9 月 7 日 08 时至 12 日 20 时	1100

没有出现逆时针旋转,均属于非典型双台风事件。

1.2.3 快速增强事件

快速增强(即 24 h 最大风速增加大于 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)事件是台风预报中的难点问题之一。2021 年的 22 个台风中,有 6 个台风经历了快速增强,分别

1.2.2 多台风事件

22 个台风中只有 9 个以单个台风出现,与历史平均单独活动台风数(9.8 个)相当,其他以多台风活动同时出现。根据 Ren et al(2020)最新提出的双台风定义标准,当西北太平洋两个同时存在的台风距离在 1800 km 以内,且共同存在时间在 12 h 以上则定义为双台风事件。据此标准,2021 年共出现了 3 次双台风事件(表 1),较多年平均(7.9 次)明显偏少,且双台风之间最近距离均在 1100 km 以上,

为“舒力基”“查帕卡”“灿都”“蒲公英”“妮妲图”“雷伊”(表 2),其中“蒲公英”出现快速增强的时段最长,累计长达 31 h。从快速增强发生的位置可见,仅有“查帕卡”是登陆前在华南沿海出现了快速增强。

表 2 2021 年西北太平洋及南海出现的台风快速增强事件
Table 2 Rapid strengthening of TCs over Western North Pacific and South China Sea in 2021

编号	台风名称	快速增强时段/BT	最大 24 h 风速增幅/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
2102	舒力基	4 月 16 日 02 时至 17 日 08 时	27
2107	查帕卡	7 月 18 日 20 时至 19 日 14 时	23
2114	灿都	9 月 7 日 08 时至 8 日 08 时	40
2116	蒲公英	9 月 24 日 08 时至 25 日 17 时	22
2121	妮妲图	12 月 1 日 20 时至 2 日 14 时	19
2122	雷伊	12 月 15 日 02—17 时	23

24 h 强度增幅最大的为“灿都”,在生成后立即出现了显著的快速增强,9 月 7 日 08 时至 8 日 08 时最大风速由 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增强到 $58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,增幅达 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,统计表明这样的强度增幅具有极端性(图略),为过去 30 年中增强幅度最大的一次台风快速增强事件。

1.3 台风登陆特征

2021 年有 6 个台风(“小熊”“烟花”“查帕卡”“卢碧”“狮子山”“圆规”)共 9 次登陆我国沿海地区,其中“烟花”“卢碧”分别出现 2 次和 3 次登陆(图 4)。另有 2 个台风(“灿都”“雷伊”)虽未直接登陆我国(图略),仍对我国近海海域及沿海地区带来

了明显的风雨影响。

1.3.1 登陆台风偏少偏弱

2021 年共有 6 个台风登陆我国,较 1991—2020 年平均偏少 1.6 个(图 5a),为近 30 年(1991—2020 年)来第三次出现连续 2 年登陆个数偏少(第一次为 1997 年和 1998 年,第二次为 2014 年和 2015 年)。6 个台风的平均登陆强度($27.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)较近 30 年平均($32.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)明显偏弱(图 5b)。

6 个登陆台风中,登陆广东有 2 个(“查帕卡”“卢碧”),登陆海南 3 个(“小熊”“狮子山”“圆规”),登陆浙江 1 个(“烟花”),登陆福建和台湾 1 个(“卢碧”)。其中,登陆广东、海南和台湾的平均登陆强度均小于历史平均值,说明 2021 年登陆华南台风的平均登陆

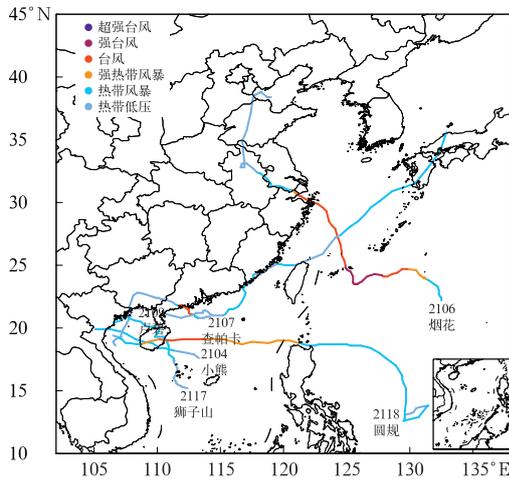


图 4 2021 年登陆我国台风路径
(颜色代表台风强度等级,下同)

Fig. 4 Tracks of Landfall TCs in China in 2021
(Colors represent scales of typhoon strength, the same below)

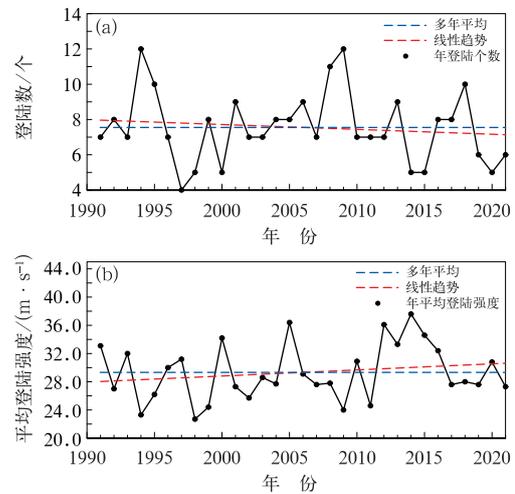


图 5 1991—2021 年登陆我国
(a)台风个数和(b)平均登陆强度

Fig. 5 (a) Numbers and (b) averaged strength of landing TCs in 1991—2021

强度偏弱。登陆浙江的“烟花”,其平均登陆强度远高于历史同期平均值($32.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

1.3.2 登陆后维持时间长

6 个登陆台风的平均生命史为 5.9 d,较历史平均(7.6 d)偏少超过 1 d(图略),说明 2021 年登陆台风的生命史偏短。6 个台风登陆后平均维持时间为 69.8 h,远高于历史平均登陆后维持时间(47.3 h),说明登陆后维持时间较长。这主要是由于“烟花”登陆后维持热带低压及以上强度达 128 h,二次登陆后维持时间为 79 h,为历史上登陆华东后陆上维持时间最长的台风。

1.3.3 风雨影响及灾害

2021 年的 6 个登陆台风均对我国造成了一定

程度的风雨影响(表 3),台风灾害造成 14 个省份共计 644.1 万人受灾,5 人死亡,161.4 万人紧急避险转移,198.2 万人紧急转移安置;800 余间房屋倒塌,9400 余间不同程度损坏;农作物受灾面积达 44.12 万 hm^2 ,其中绝收面积为 4.45 万 hm^2 。总体来看,2021 年台风灾害造成的损失为近 20 年最低。登陆台风给华东、华南以及华北一带造成不同程度的风雨及灾害影响,其中“烟花”影响我国大陆地区时间最长(10 d),影响范围多达 14 个省份,均打破纪录,但由于气象预警发布及时、灾害防御得力,并未造成人员死亡。

另外,“灿都”在东海北部近海海域长时间回旋,使得华东沿海及台湾岛东部都出现了大到暴雨。

表 3 2021 年登陆我国台风一览表
Table 3 List of typhoons landing in China in 2021

台风编号	台风名称	登陆时间 /BT	登陆地点	登陆强度		灾害损失			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	
2104	小熊	6月12日 09:45	海南陵水	20	热带风暴级	0.05	0.05		海南
2106	烟花	7月25日 12:30	浙江舟山	35	台风级	482.0	114.1		浙江、上海、江苏、台湾、安徽、山东、河南、河北、北京、天津、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江
		7月26日 09:50	浙江平湖	25	强热带风暴级				
2107	查帕卡	7月20日 21:50	广东阳江	33	台风级	6.3	1.1		广东、广西、海南
		8月5日 11:20	广东汕头	23	热带风暴级				
2109	卢碧	8月5日 16:50	福建东山	20	热带风暴级	7.4	3.2	2	广东、福建、浙江、台湾
		8月7日 08:30	台湾新竹	18	热带风暴级				
2117	狮子山	10月8日 22:50	海南琼海	20	热带风暴级	34.7	7.4	1	广东、广西、海南
2118	圆规	10月13日 15:40	海南琼海	33	台风级	28.5	10.0	2	福建、广东、广西、海南、云南

“雷伊”进入南海后再次加强为超强台风级,使得南沙群岛、中沙群岛、海南岛东部近海出现 8~10 级风,部分岛礁阵风达 12 级以上,三沙市共有 5 个岛礁出现大到暴雨。

2 2021 年台风业务预报误差分析

2.1 台风路径预报分析

2021 年中央气象台对西北太平洋及南海生成的 22 个台风的 24、48、60、70、120 h 各预报时效主观路径预报误差分别为 76、131、189、235 和 278 km (图 6a),较 2016—2020 年各时效的平均误差(71、129、201、271 和 359 km)在 72、96、120 h 相对分别提高 6.5%、13.4%和 22.6%,该误差数据由中央气象台业务定位及定强数据计算而得。

从各个台风的路径误差贡献率可以看出(图 7a),就 24 h 路径预报而言,误差贡献率(误差贡献率定义为某个台风预报误差之和占总误差的比率)最大的“灿都”,其次是“烟花”。进一步分析单个台风预报误差大样本值发现,8 月 5 日在西北太平洋上同时存在的“卢碧”“银河”“妮姐”3 个台风均出现了 200 km 以上的 24 h 路径预报误差,说明多台风活动期内新生成台风(“银河”“妮姐”均为 8 月 5 日 14 时生成)初期存在较大的路径不确定性,并且

给“卢碧”的路径预报带来更多的不确定性。

2.2 台风强度预报分析

2021 年中央气象台 24~120 h 各时效主观强度预报平均误差分别为 3.6、4.5、4.1、4.7 和 5.1 $m \cdot s^{-1}$ (图 6b),较 2016—2020 年各时效平均误差的相对提高比例分别为 10.7%、20.0%、34.1%、33.4% 和 28.9%,2021 年的各时效强度误差明显小于过去 5 年平均。

从单个台风的强度误差贡献率可以看出(图 7b),对 24 h 强度误差贡献最大的也是“灿都”,其次是“舒力基”。进一步分析单个台风的预报误差大值样本发现,强度的误差值与台风的快速增强过程密切相关,表 2 中所列的 6 个发生快速增强的过程,均为出现了较大的强度误差样本。统计表明,约 60%~70% 的强度预报误差来源于快速增强台风,这说明快速增强仍然是台风预报中的难点问题之一。

3 2021 年台风预报难点分析

3.1 弱引导气流下的路径预报

研究指出,台风的移动不仅受到大尺度环境背景流场的影响(Tao et al, 2017),也与 beta 效应(Wang and Holland, 1996)、海陆差异(Fiorino and Elsberry, 1989)、地形影响(Wu and Wang, 2000; George and Gray, 1976),以及其他天气系统(沈新勇等, 2012; 毕鑫鑫等, 2018)等因素有关。一般而言,西北太平洋的台风路径主要受其周围环境气流的引导(Velden and Leslie, 1991),在弱引导气流下台风的移动速度减慢,甚至出现回旋少动,而后发生的路径转折往往是台风路径预报中较大误差的来源之一。

“烟花”生命史期间(2021 年 7 月 18—30 日),其平均移速为 $10.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,而在生成之初的 19 日和 21—23 日,以及登陆后的 26—27 日出现了 3 个时段的移速减慢(图略)。其中,21—23 日的移速减慢伴随着移动路径由西南偏南方向移动转为北偏西方向移动。如图 8 所示,在移速减慢的阶段(21 日 08 时至 23 日 20 时)中央气象台所有的路径预报都偏向于实际路径的左侧,并且预报的登陆位置在浙江中部沿海,较实际登陆地点偏南。为了分析在

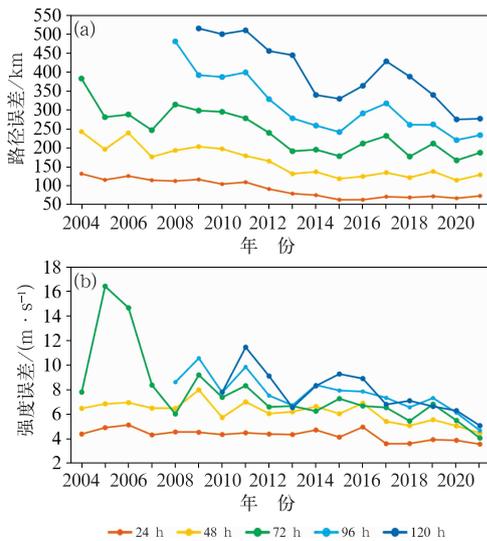


图 6 中央气象台逐年台风平均(a)路径和(b)强度预报误差

Fig. 6 Annual mean errors of CMA (a) tracks and (b) strength of typhoon forecasts

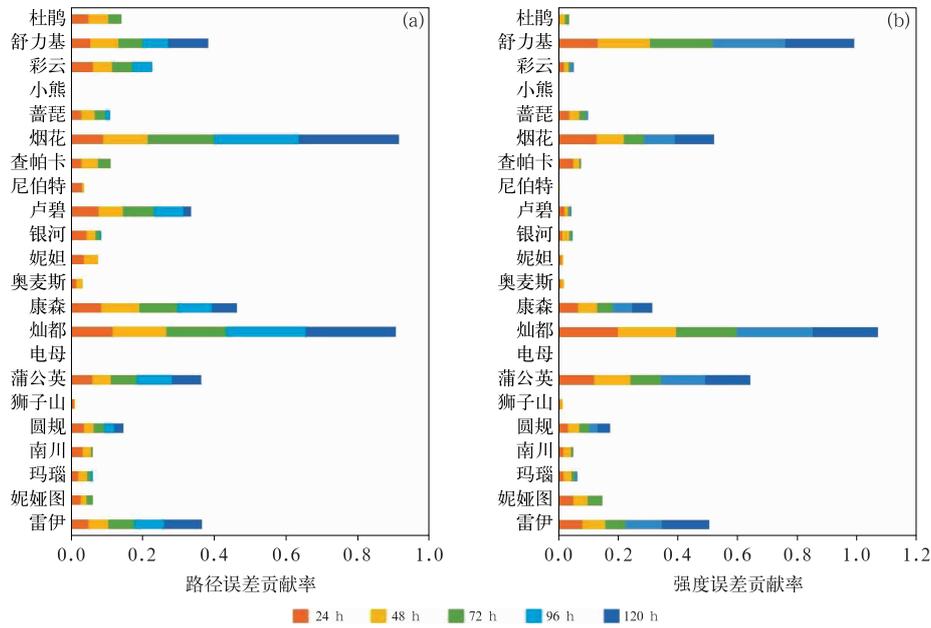


图 7 2021 年单个台风的(a)路径和(b)强度预报误差贡献率

Fig. 7 Contribution rate of (a) track forecast and (b) strength forecast errors from each TC in 2021

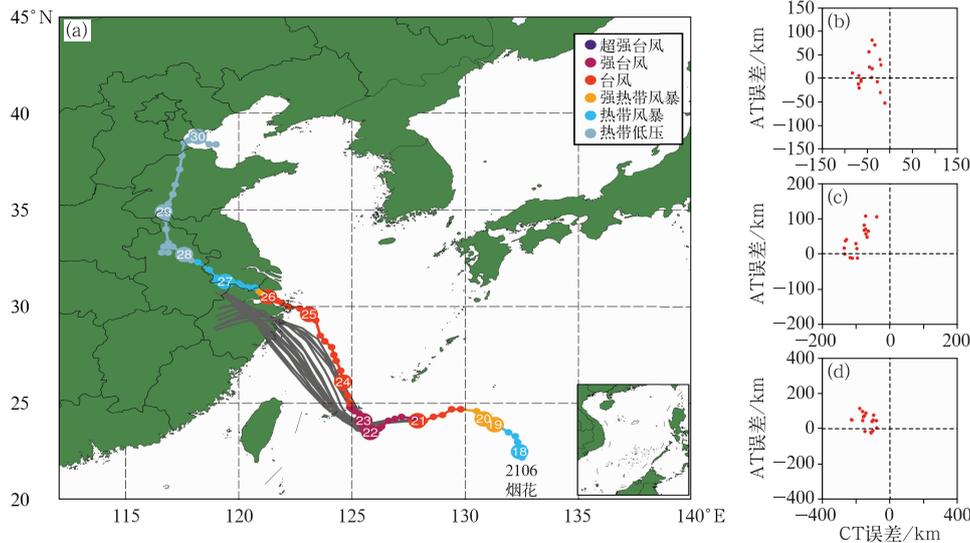


图 8 2021 年 7 月 21 日 08 时至 23 日 20 时(a)台风烟花的路径预报(灰线)和该时段内的(b)24 h、(b)48 h 和(c)72 h 的 AT 和 CT 误差散点分布 (彩色线为实况路径)

Fig. 8 (a) Track forecasts of Typhoon In-Fa (gray line) from 08:00 BT 21 to 20:00 BT 23 July 2021 and the 24 h (b), 48 h (c), 72 h (d) along track and cross track errors (Color line represents the observation of Typhoon In-Fa)

此路径转折过程中不同预报时效的误差分布情况, 将该时段内的路径误差分解为顺着路径方向误差 (along track, AT) 和垂直路径方向误差 (cross track, CT), 发现从 24~72 h 路径预报均明显偏向于实际路径的左侧(CT<0), 主要的路径预报误差

是垂直路径的由移动方向偏差造成(CT 误差为主), 即在移动减慢过程中对之后移动方向预报的偏差较大, 说明弱引导气流下台风移动路径预报存在较大的不确定性。

根据 Velden and Leslie(1991)的计算方案, 选取

距台风中心 $3^{\circ}\sim 7^{\circ}$ 经纬距圆环, 计算 1000~200 hPa 各高度层引导气流, 再对 850~200 hPa 进行各层平均得到整层引导气流。得到“烟花”7月20—24日的对流层各层及整层的引导气流(图9)。分析发现, 在发生移动减慢的阶段(21日20时至22日20时)对流层整体的环境引导气流都较弱, 各层的引导气流都在 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下, 这也是导致“烟花”移动减慢的重要原因。23日白天开始对流中下层和对流层高层均出现了自南向北的引导气流, 且对流层高层的引导气流具有更为深厚的垂直分布和风速矢量。整层引导气流矢量的时间分布(图9上方方框内)也清晰地反映了引导气流大小及方向的变化过程, 尤其是23日后, 整层引导气流的偏北分量逐渐加大, 造成了“烟花”移速开始加快, 并由之前的西偏南路径转为北偏西方向移动。在弱引导气流下, “烟花”的移动变化与整层引导气流的变化密切相关。

进一步分析造成对流层高层(200 hPa)引导气流发生改变的主要原因, 发现7月21日“烟花”高层是各向均匀的流出气流(图10a); 22日开始, 中心位于朝鲜半岛以西的高空冷涡系统(图10中“C”表示)开始逐渐从“烟花”中心(图10中红色“十”表示)的西侧逐渐移动到北侧, 且冷涡下游的反气旋性环流加深了冷涡中心与台风之间的高层偏南气流, 有利于“烟花”在23日之后的转向和移速加快(图10d)。另外, 此时“烟花”东侧正有热带扰动发展(后期发展为“尼伯特”), 也会对其移动趋势造成影响。温典等(2019)研究也发现, 对流层上部槽的切断高空冷涡是台风路径变化的一个重要影响系统。

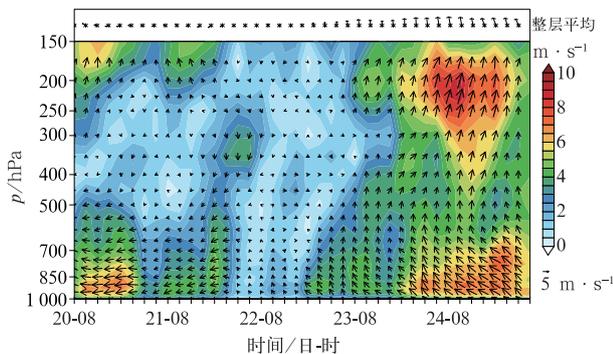


图9 2021年7月20—24日台风烟花引导气流(风矢, 填色)及整层平均(上方框内风矢)的时间演变

Fig. 9 The steering flow temporal evolution of Typhoon In-Fa during 20–24 July 2021 (vector, colored) and the vertically integrated average (vector in top box)

3.2 近海快速加强的监测与预报

近海快速加强一直都是台风业务预报中的难点问题之一, 也是热带气旋研究领域重要的科学问题之一(余晖和端义宏, 2002)。统计分析表明, 约17%的台风在靠近岛屿或陆地时出现了快速加强现象(冯锦全和陈多, 1995)。“查帕卡”于7月18日14时在南海北部海域生成后即开始快速加强, 19日白天到夜间迅速发展加强, 最大的24 h强度增幅达到 $23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (距离广东西部沿海在150 km以内), 属于典型的近海快速增强台风。在实际预报中考虑到“查帕卡”生成后距离陆地较近发展空间有限, 并且受到东侧“烟花”的影响, 使得“查帕卡”后期的路径具有一定的不确定性。目前对于海上台风的强度分析使用的是基于卫星云图的台风强度客观分析方法, 该方法根据卫星云图分析台风云型特征, 得到最终强度指数(CI指数), 并给出对应的台风最大风速和最低气压结果(Velden et al, 2006)。在此次“查帕卡”的近海快速加强过程中, 由于其低层中心距离陆地较近, 广东阳江雷达捕捉到了其快速加强过程中台风眼墙的形成过程。如图11a所示, 19日20时雷达反射率上已经可以清晰地看到正在发展增强过程中的眼墙结构, 眼壁回波最强在台风中心的西侧和北侧(50 dBz以上), 最强回波的伸展高度达到7.5 km, 说明此时台风的眼墙结构已经形成。而在同时刻的FY-4A卫星的BD增强红外图像中(图11b), “查帕卡”低层环流中心被深厚的冷云盖所覆盖, 仅从云型结构分析上很难判断出台风中心深对流的快速发展。19日20时, 客观Dvorak分析算法得到的CI指数为3.0, 对应的最大风速值应为 $20\sim 25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而中国、日本、美国的主观强度分析结果分别为30、28、20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 存在较大的差异。19日夜间, 距离“查帕卡”中心约90 km的广东省台山市川岛镇记录到了 $30.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (11级)的平均风和 $37.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (13级)阵风(图略), 说明我国的主观强度分析结果更为合理。20日白天, 随着可见光云图上台风眼结构的逐渐清晰(图略), 基于卫星云图的强度分析由强热带风暴级加强为台风级。由此可见, 单纯用卫星资料分析台风的强度, 由于台风低层对流的发展加强可能早于对流层高层, 另外夜间仅有红外通道观测资料而缺少必要的台风低层环流信息, 因而与实际台风强度的发展存在一定的滞后。在实际的业务监测分析中, 为了避免对快速加强过

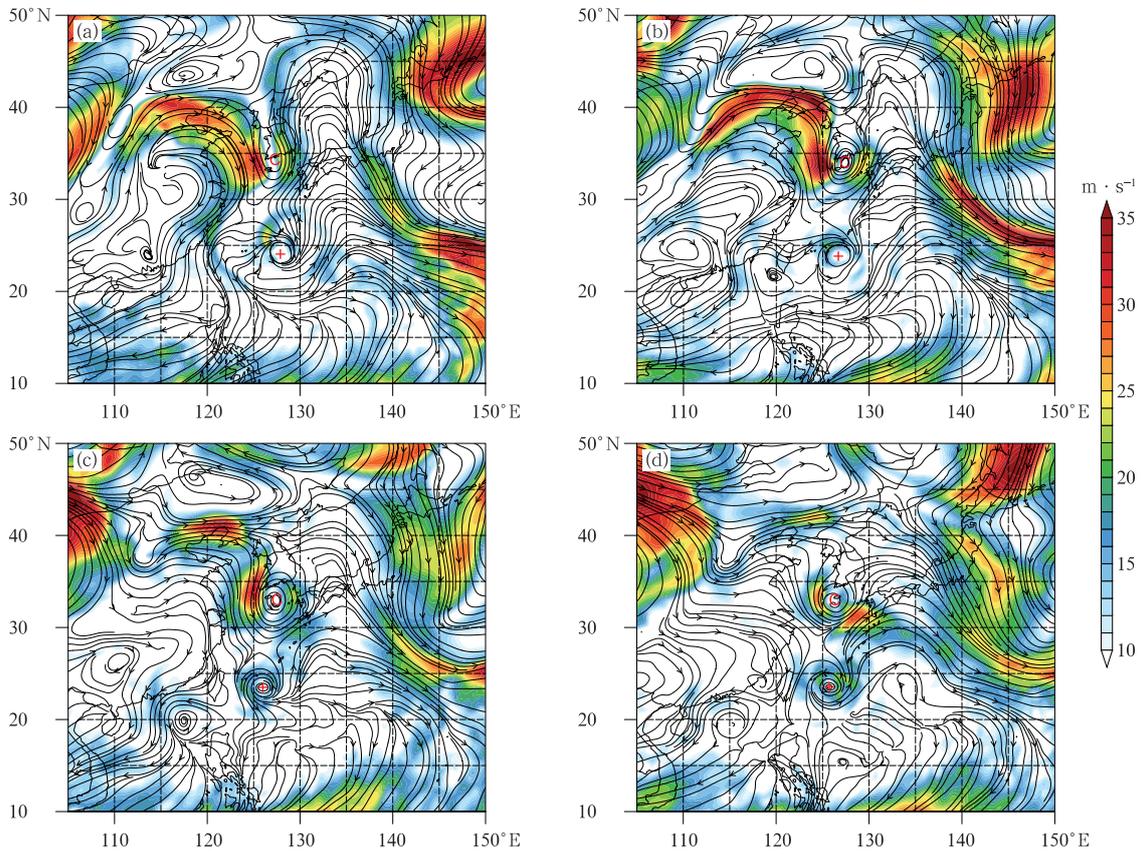


图 10 2021 年 7 月 (a)21 日 08 时、(b)22 日 08 时、(c)23 日 08 时和 (d)24 日 08 时的 200 hPa 流场
 (填色和流线表示风速,红色“十”代表高层台风中心位置,“C”代表高层冷涡位置)

Fig. 10 Streamline at 200 hPa at 08:00 BT (a) 21, (b) 22, (c) 23 and (d) 24 July 2021
 (Color and stream line represent wind speed, red cross represents the TC center in upper level,
 C represents the center of upper-air cold vortex)

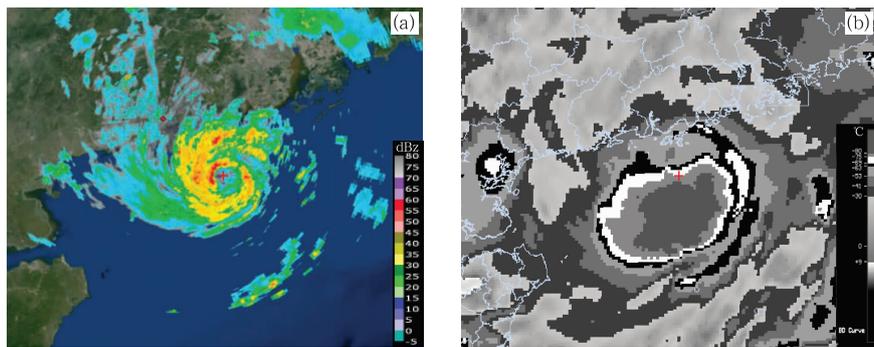


图 11 2021 年 7 月 19 日 20 时 (a)阳江雷达反射率和 (b)FY-4A 的 BD 增强红外云图
 (红色“十”为台风中心位置)

Fig. 11 (a) Radar reflectivity from YJGD radar observation and (b) BD intensified IR image
 of FY-4A at 20:00 BT 19 July 2021
 (Red cross represents the center of TC)

程中台风强度的低估,需要应用如雷达观测、海岛自动站及其他观测手段,以获取更全面的台风强度变化信息。

对于台风近海快速增强的原因,研究发现除了影响台风强度发展的大尺度环境动力及热力条件外,海陆热力差异的变化也与近海台风易出现快速

增强密切相关(Qiu et al, 2020; Chen, 2011)。研究发现,近海的台风尺度和移动速度可能会对台风周围的海气相互作用产生影响,Lok et al (2021)对 1713 号台风天鸽和 1822 号台风山竹的对比分析发现,台风尺度偏小且移动快的台风在临近登陆前,其外围的下沉气流将使其移动方向前方云量减少,太阳辐射增温明显,导致沿岸海域的海面温度升高,最终通过潜热加热造成台风临近登陆前的加强。

“查帕卡”尽管尺度小但其移速较慢(登陆前平均移速为 $4.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$),19 日白天发生快速增强阶段其移动方向前侧并未出现明显的晴空区。在快速增强过程中,南海西北部海域的海面温度都维持在 29°C 以上,较气候平均偏高 1°C 以上(图略)。台风中心附近的表层海水受到台风低层环流影响,较其他海域海面温度略低,但值得注意的是在广东西部沿海海域出现了一条狭窄的暖水区(图 12a); 由于该暖水区的存在,海面向大气释放感热(图 12b),最强的感热通量区位于台风中心的北侧,即靠近海陆边界的一侧。另一方面,“查帕卡”北侧对流则持续发展(图 12a)造成对流性降水在北侧的增加(图 12c),其结果是对流性降水的潜热释放进一步加强了台风中心北侧的能量收支。在潜热加热

和感热加热的共同作用下,使得“查帕卡”北侧的大气获得更大的能量。

从沿台风中心的纬度-高度垂直剖面可以看出(图 13),7 月 19 日 20 时“查帕卡”中心的北侧有明显的上升气流,主要云量集中在对流中高层;到了 20 日 02 时,台风中心南北两侧都出现了上升气流,而对流中低层的云量也随之增加。由于在夏季海陆下垫面的热力差异会造成海陆边界出现海陆风,因此在 19 日夜間至 20 日凌晨,近地面从暖的陆地下垫面吹向海面的偏北气流与台风外围气流在台风中心北侧辐合抬升,进一步增加潜热能的释放和台风中心北侧深对流的发展。季亮等(2007)、Lok et al (2021)指出低空急流汇入大量的水汽和边界层的潜热输送可能是近海加强的可能原因。“查帕卡”个例分析表明,在实际预报中,除了分析如海温、垂直切变等有利的大尺度环境动力和热带条件外,还需要考虑海陆热力差异造成的局地对流增幅以及辐射的日变化差异对台风强度发展可能造成的影响。

3.3 登陆或擦过预报调整

“灿都”的 24~48 h 路径预报误差贡献率在全年 22 个台风中最大(图 7a)。从 9 月 11 日 08 时至

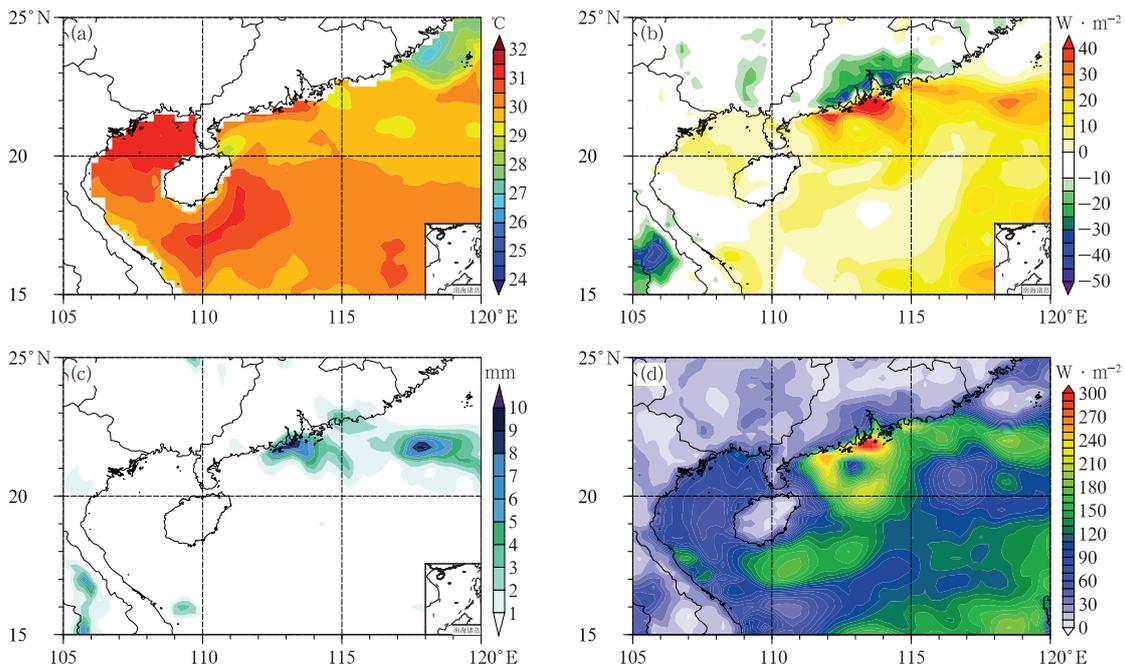


图 12 2021 年 7 月 19 日 20 时南海北部海域(a)海面温度, (b)感热通量,(c)对流性降水量,(d)潜热通量

Fig. 12 (a) Sea surface temperature, (b) sensible heat flux, (c) convective precipitation and (d) latent heat flux over northern of South China Sea at 20:00 BT 19 July 2021

13 日 08 时的路径预报及对应的 AT 和 CT 误差分布可以看出(图 14), 在移动速度稳定的情况下, 主要的 24 h 路径预报误差来源于移向预报偏左(CT < 0), 而由于对其在东海北部长达 3 天的回旋预报不足, 48~72 h 的预报误差则多来源于移速偏快(AT > 0)。从 9 月 11—14 日大尺度环境场的演变

可以发现, 随着西风带短波槽的东移, 11 日位于“灿都”北侧的副热带高压坝在 12 日迅速崩溃, 而 13 日又再度西伸加强。在此过程中“灿都”始终位于副高主体的西侧, 在强大的气压梯度力作用下台风中心东侧偏南气流明显增强(图 15b), 这也对应了 12 日“灿都”向北移动的加快。尽管数值模式估计到了

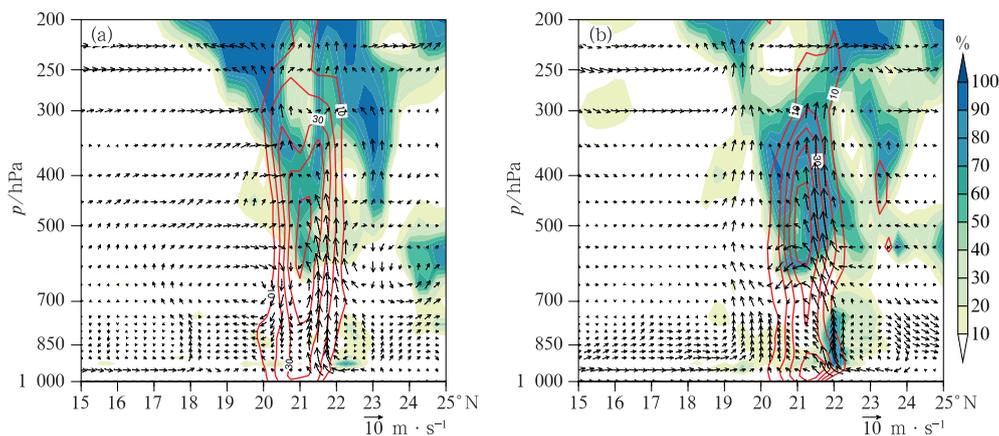


图 13 2021 年 7 月(a)19 日 20 时及(b)20 日 02 时沿台风中心的云量覆盖率(填色)、
相对涡度(等值线, 单位: 10^{-5} s^{-1})和风场(风矢)的纬度-高度垂直剖面
Fig. 13 The vertical-latitude cross-section along cloud cover rate of TC center (colored),
relative vorticity (contour, unit: 10^{-5} s^{-1}) and winds (vector)
at (a) 20:00 BT 19 and (b) 02:00 BT 20 July 2021

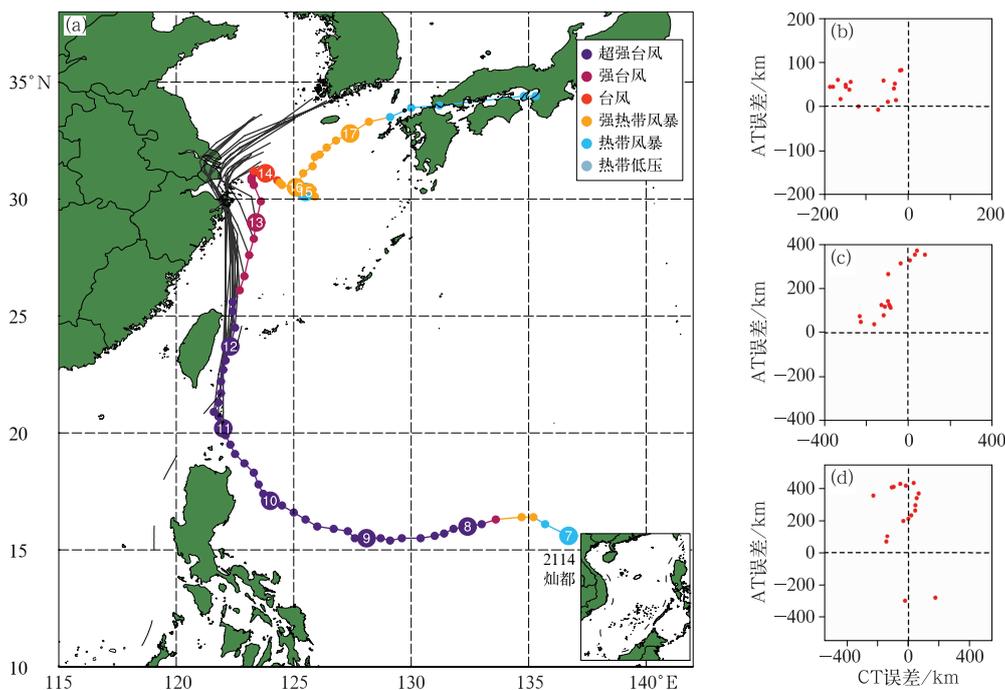


图 14 同图 8, 但为 2021 年 9 月 11 日 08 时至 13 日 08 时的台风灿都
Fig. 14 Same as Fig. 8, but for Typhoon Chanthu from 08:00 BT 11
to 08:00 BT 13 September 2021

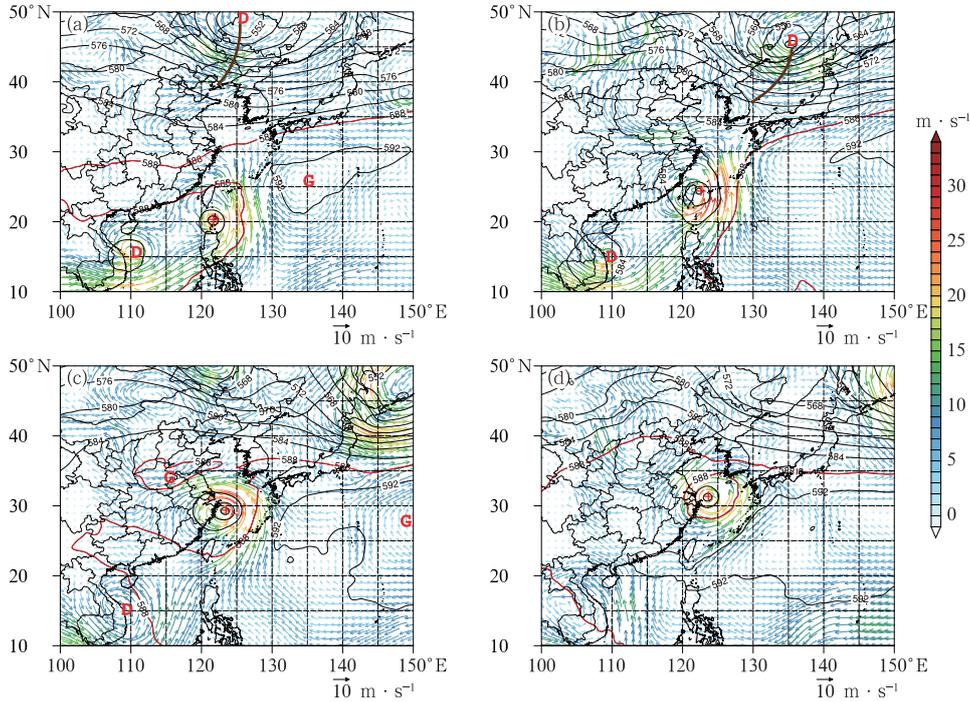


图 15 2021 年 9 月 (a)11 日 08 时, (b)12 日 08 时, (c)13 日 08 时和 (d)14 日 08 时的 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场

(等值线表示 500 hPa 高度场, 单位: dagpm, 588 线为红色; “G”/“D” 分别代表高/低压中心位置; 红色“十”代表台风中心位置; 棕色线代表槽线; 彩色箭头表示 850 hPa 风矢量)

Fig. 15 Geopotential height at 500 hPa and wind field at 850 hPa at 08:00 BT of (a) 11, (b) 12, (c) 13 and (d) 14 September 2021

(Contours with 588 line specialized in red, unit: dagpm; G/D represents the location of high/low centers; red cross indicates the location of TC; brown line denotes the trough line; color arrow indicates wind speed at 850 hPa)

13 日之后副高的西伸加强(图 15c), 但由于此时“灿都”已经移动到了副高主体的北沿, 并影响了副高在其北侧的西伸加强; 另一方面, 由于南侧“康森”的持续西移加大了两者的距离, 并使得副高在“灿都”南侧得以加强西伸, “灿都”南侧偏西气流的影响抵消了北侧陆地高压带来的偏东气流的影响。随着副高的持续加强西伸(图 15d), “灿都”从 14 日开始持续 3 天位于副高控制下, 从之前的偏北向移动转为在东海北部海面回旋打转。

对台风登陆点和登陆时间的预报预警在防台减灾及灾害应急管理中具有特殊的意义, 而在“宁空勿漏”指导思想下, 对部分近海擦过的台风往往也容易出现过度预警的情况(雷小途, 2012)。在对“灿都”的预报中, 也由于将防御台风登陆后的可能灾害影响放在首要位置, 而出现了过度预警问题。9 月 10—11 日的预警中先是预报“擦过或登陆台湾岛东北部”; 12 日预警调整为“登陆或擦过浙江东北部沿海”, 同时也考虑“擦过舟山近海进入杭州湾”的可

能; 13 日的预警中再度调整为“穿过舟山群岛, 登陆上海浦东到江苏启动一带沿海”, 同时也考虑“在杭州湾到长江口一带回旋”的可能。在已知台风后期的路径存在一定不确定性, 即同时存在“登陆”和“擦过”两种可能性时, 为了保持预报和预警的连续性, 业务路径预报调整往往存在一定的滞后性, 并且从防灾减灾的角度考虑, 优先将“登陆”的可能性放在首位, 从而造成对一些近海“擦过”而未登陆台风的“空报”问题。

值得注意的是, 尽管“灿都”最终没有在浙江东部沿海登陆(其中心距离浙江舟山嵊泗岛最近时约为 80 km), 但浙江东部、上海大部、江苏南部、安徽东部及台湾岛等地出现大到暴雨, 其中浙江东南部出现了特大暴雨, 浙江宁波余姚累计降水量达到 426 mm(图略); 浙江北部沿海也出现了 10~12 级的阵风, 局部地区风力达 13~15 级, 10 级以上阵风持续时间超过 3 d(图略)。由此可见, 近海“擦过”和直接“登陆”的台风相比, 其造成风雨影响的强度和

范围并未减弱和缩小;相反,类似“灿都”这样没有登陆,但由于在近海长时间回旋,其风雨影响预报则更为困难。

4 结论与讨论

对2021年西北太平洋和南海台风的活动特点及主要影响我国的台风进行了系统的概况和总结,主要结论如下:

(1) 2021年台风源地整体偏西,其中5个台风在我国南海近海生成;台风生成个数偏少,平均极值强度偏弱,热带风暴等级占比偏多;台风群发特征明显;全年共有6个台风经历了快速增强;登陆强度偏弱,“烟花”登陆后长时间维持,造成年度最大的风雨影响,全年台风的灾害损失相对较小。

(2) 预报误差分析说明,主要的强度预报误差来源于快速增强,而全年强度预报好于近5年平均;转向或移动缓慢台风是较大的路径预报误差的主要来源。

进一步对“烟花”“查帕卡”“灿都”3个难预报的台风分析发现:①弱引导气流下台风移动路径预报存在较大的不确定性,主观预报具有明显移向偏差,“烟花”在移速减慢后出现的偏北向移动与对流层高层高空冷涡的影响有关;②较卫星云图,“查帕卡”在雷达反射率图像上先出现明显的台风眼墙结构特征,而由海陆热力差异和局地辐合抬升造成的近岸对流增辐可能是其近海快速加强的主要原因;③在副高形态调整的背景下,从防灾减灾的需求优先考虑预报“灿都”登陆浙江北部,但对其路径的不确定性应予以充分的考虑。

值得进一步研究和讨论的科学问题包括:①2020—2021年连续2年台风的生成及登陆个数偏少,而同期的北大西洋飓风数量偏多,ENSO是如何协同影响这两大海域的台风生成频数是非常值得研究的科学问题;②在弱引导气流下路径调整仍是路径预报中的难点问题,需要关注多尺度系统的相互作用,及时考虑移速及移向变化与其他天气系统移动之间的联系;③近海快速增强的预报依然是台风强度预报领域中的瓶颈问题,值得在基础理论及预报方法上有更大的突破及创新性研究,另外局地海陆热力差异和日变化差异在近海台风快速加强中的作用也是值得研究的问题;④在实际预报为了避免过度预警的问题,可以通过增加路径袭击概率预报,

或是登陆地点或重点影响城市的概率预报等来解决,并及时根据登陆概率的变化调整对应的风雨影响预报。

参考文献

- 毕鑫鑫,陈光华,周伟灿,2018. 超强台风“天鹅”(2015)路径突变过程机理研究[J]. 大气科学,42(1):227-238. Bi X X, Chen G H, Zhou W C, 2018. A mechanism study on the sudden track change of Super Typhoon Goni (2015)[J]. Chin J Atmos Sci, 42(1):227-238(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).
- 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,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).
- 冯锦全,陈多,1995. 我国近海热带气旋强度突变的气候特征分析[J]. 热带气象学报,11(1):35-42. Feng J Q, Chen D, 1995. Analyses of climatic characteristics accompanying sudden intensity changes in offshore tropical cyclones in China[J]. J Trop Meteor, 11(1):35-42(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).
- 黄勇,李崇银,王颖,等,2008. 近百年西北太平洋热带气旋频数变化特征与 ENSO 的关系[J]. 海洋预报,25(1):80-87. Huang Y, Li C Y, Wang Y, et al, 2008. Study on the variation characteristics of annual frequency for tropical cyclones in Western North Pacific during the last hundred years and relationship with ENSO[J]. Mar Forecasts, 25(1):80-87(in Chinese).
- 季亮,费建芳,黄小刚,等,2007. 台风“云娜”(2004)近海加强的数值模拟研究[J]. 气象科学,27(5):530-535. Ji L, Fei J F, Huang X G, et al, 2007. Numerical simulation of Typhoon Rananim (2004) intensification[J]. Sci Meteor Sin, 27(5):530-535(in Chinese).
- 雷小途,2012. 台风“登陆”及“擦边”刍议[J]. 气象,38(6):641-645. Lei X T, 2012. Preliminary discussion on the landfall and touch typhoon[J]. Meteor Mon, 38(6):641-645. (in Chinese).
- 刘芸芸,高辉,2021. 2021年春季我国气候异常特征及可能成因分析

- [J]. 气象, 47(10):1277-1288. Liu Y Y, Gao H, 2021. Features and possible causes of climate anomalies in China in spring 2021 [J]. Meteor Mon, 47(10):1277-1288(in Chinese).
- 申松林, 江静, 2010. 西北太平洋台风频数异常年的气候背景分析 [J]. 气象, 36(5):64-70. Shen S L, Jiang J, 2010. Climatic background analysis of abnormal year for typhoons in Northwest Pacific [J]. Meteor Mon, 36(5):64-70(in Chinese).
- 沈新勇, 毕明玉, 张玲, 等, 2012. 中尺度对流系统对台风“风神”移动路径影响的研究 [J]. 气象学报, 70(6):1173-1187. Shen X Y, Bi M Y, Zhang L, et al, 2012. The impact of mesoscale convective systems on the track of Typhoon Fengshen (2008) [J]. Acta Meteor Sin, 70(6):1173-1187(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).
- 温典, 李英, 魏娜, 等, 2019. 高空冷涡影响台风 Meranti(1010)北翘路径的集合预报分析 [J]. 大气科学, 43(4):730-740. Wen D, Li Y, Wei N, et al, 2019. An ensemble analysis on abrupt northward turning of Typhoon Meranti (1010) under the influence of an upper-tropospheric cold low [J]. Chin J Atmos Sci, 43(4):730-740(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).
- 余晖, 端义宏, 2002. 西北太平洋热带气旋强度变化的统计特征 [J]. 气象学报, 60(6):680-687. Yu H, Duan Y H, 2002. A statistical analysis on intensity change of tropical cyclone over Northwestern Pacific [J]. Acta Meteor Sin, 60(6):680-687(in Chinese).
- 赵俊虎, 陈丽娟, 章大全, 2022. 2021 年夏季我国气候异常特征及成因分析 [J]. 气象, 48(1):107-121. Zhao J H, Chen L J, Zhang D Q, 2022. Characteristics and causes for the climate anomalies over China in summer 2021 [J]. Meteor Mon, 48(1):107-121(in Chinese).
- Chen G H, 2011. A Comparison of precipitation distribution of two landfalling tropical cyclones during the extratropical transition [J]. Adv Atmos Sci, 28(6):1390-1404.
- Fiorino M, Elsberry R L, 1989. Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion [J]. J Atmos Sci, 46(7):975-990.
- George J E, Gray W M, 1976. Tropical cyclone motion and surrounding parameter relationships [J]. J Appl Meteor Climatol, 15(12):1252-1264.
- Lok C C F, Chan J C L, Toumi R, 2021. Tropical cyclones near landfall can induce their own intensification through feedbacks on radiative forcing [J]. Commun Earth Environ, 2(1):184.
- Qiu W Y, Wu L G, Ren F M, 2020. Monsoonal influences on offshore rapid intensification of landfalling typhoons in a sheared environment over the South China Sea [J]. Wea Forecasting, 35(2):623-634.
- 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.
- Tao C, Jiang H Y, Zawislak J, 2017. The relative importance of stratiform and convective rainfall in rapidly intensifying tropical cyclones [J]. Mon Wea Rev, 145(3):795-809.
- Velden C, Harper B, Wells F, et al, 2006. The Dvorak tropical cyclone intensity estimation technique: a satellite-based method that has endured for over 30 years [J]. Bull Am Meteor Soc, 87(9):1195-1210.
- Velden C S, Leslie L M, 1991. The basic relationship between tropical cyclone intensity and the depth of the environmental steering layer in the Australian Region [J]. Wea Forecasting, 6(2):244-253.
- Wang C, Wu K, Wu L G, et al, 2021. What caused the unprecedented absence of Western North Pacific tropical cyclones in July 2020? [J]. Geophys Res Lett, 48(9):e2020GL092282.
- Wang Y Q, Holland G J, 1996. The beta drift of baroclinic vortices. Part I: adiabatic vortices [J]. J Atmos Sci, 53(3):411-427.
- Wu L G, Wang B, 2000. A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion [J]. Mon Wea Rev, 128(6):1899-1911.

(本文责编:何晓欢)