

2022 年西北太平洋和南海台风活动特征和预报难点分析*

钱奇峰 董林 许映龙 周冠博 王靖

国家气象中心, 北京 100081

摘要: 利用 1949—2021 年中国气象局台风最佳路径资料, 2022 年中央气象台台风路径和强度实时业务资料、欧洲中期预报中心 ERA-Interim 逐 6 h 再分析资料等, 对 2022 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: 2022 年, 台风活动的阶段性、群发性特征明显, 生成位置偏北偏西, 登陆我国台风数量偏少、强度偏强, 自 2019 年以来, 已连续四年登陆台风个数偏少。预报误差分析表明, 在台风生成初期、台风与西风带结合后转向以及多台风(低压)活动期间的路径预报误差较大。进一步分析台风暹芭、梅花和轩岚诺的预报难点, 结果表明: “暹芭”北侧的大陆高压和高层急流的预报偏差是导致后期路径预报调整的主要原因; “梅花”登陆后陆上路径预报偏差主要是模式对引导气流的预报偏差所致; “轩岚诺”路径和强度变化复杂, 在其快速加强和快速减弱的速率、结构变化导致的强度波动和尺度变化等方面有预报偏差。

关键词: 台风, 活动特征, 预报难点, 台风快速增强

Analysis on the Characteristics and Forecast Difficulties of the Typhoons over the Northwest Pacific in 2022

QIAN Qifeng DONG Lin XU Yinglong ZHOU Guanbo Wang Qian

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the operational real-time typhoon data of National Meteorological Center and other sources of observations including the ERA-Interim 6 h reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF), we analyze and review the main characteristics of typhoon activities in the Northwest Pacific in 2022. It is found that in 2022, the characteristics of typhoon activity were obvious in stages and clusters with the genesis zones being northward and westward, and the number of typhoons landing in China was still relatively less, which is similar with the typhoon numbers since 2019. However, the typhoon intensities in 2022 were stronger than the average. The forecast error analysis shows that the track errors mainly came from the initial stage of typhoon generation, the combination of typhoon and westerlies, and the period of multiply typhoons or low pressure area activity. Further analysis of the forecast difficulties of the typhoons Chaba, Muifa and Hinnamor reveals that: (1) The continental high and

*国家重点研发计划(2021YFB3900405)资助

2023 年 4 月 3 日收稿; 2023 年 9 月 日收修订稿

第一作者: 钱奇峰, 主要从事热带气旋的预报和研究, Email:qianqf@cma.gov.cn

通讯作者: 董林, 主要从事热带气旋的预报和研究, Email:donglin@cma.gov.cn

upper-level jet in the north of Chaba at the early stage of its generation was the key system leading to the long-time track adjustment of Chaba. (2) The track errors of the Muifa after landfall were due to the deviation of the models' forecasts of the steering flows. (3) The track and intensity of Hinnamor were complex, and China Meteorological Administration (CMA) made forecast deviations in the rate of its rapid intensifying and weakening, intensity fluctuations because of its unexpected changes in structure and size.

Keywords: typhoon, activity characteristics, forecast difficulties, rapid intensification

引言

我国海岸线绵长, 并且地处全球热带气旋 (tropical cyclone, TC) 发生频次最高、强度最大的北太平洋西侧, 是世界上受热带气旋灾害最严重的国家之一。随着我国沿海地区的经济规模和人口不断增长, 热带气旋造成的灾害损失日益严重 (许映龙等, 2010; 钱传海等, 2012; 陈联寿等, 2012), 如 2006 年的 0604 号台风碧利斯先后在台湾宜兰和福建霞浦沿海登陆后, 其深入我国内陆并长时间维持, 致使我国华南和江南南部出现历史罕见的持续性强降水, 引发山洪爆发等次生灾害, 直接经济损失达 348.29 亿元 (张恒德和孔期, 2007; 鲁亚斌等, 2007; 钱传海等, 2009)。又如 2021 年在台风烟花远距离影响的有利背景下, 源源不断的水汽在黄淮地区形成持续性偏东风水汽输送, 在低涡、切变线和辐合线的共同作用下, 引发河南强降水 (向纯怡等, 2022a; 任宏昌和张恒德, 2022; 汪小康等, 2022; 岳健等, 2023)。郑州、新乡、鹤壁和安阳等 20 个国家级气象站日降水量突破建站以来历史极值; 过程最大降水量达 1122.6mm, 郑州站日降水量达 624.1mm, 是建站以来最大日降水量的 3.4 倍, 造成了影响严重的河南“21·7”极端降水事件。近年来我国台风预报取得了较大进展, 但此类的高致灾性台风仍时有发生, 特别是对台风异常变化的预报、台风精细化预报、台风灾害预评估等能力方面, 还不能满足防台减灾需求 (曹莉等, 2018; 李泽椿等, 2020; 陈博宇等, 2020; 周冠博等, 2022a; 吕心艳等, 2022)。台风预报事关国家安全和百姓的生命财产, 不断提高我国台风预报准确率, 最大限度地减轻灾害损失, 总结和分析每年的西北太平洋和南海台风的活动特征和预报难点具有重要的科学意义 (高拴柱等, 2018; 董林等, 2019; 吕心艳等, 2021; 周冠博等, 2022b; 向纯怡等, 2022b)。

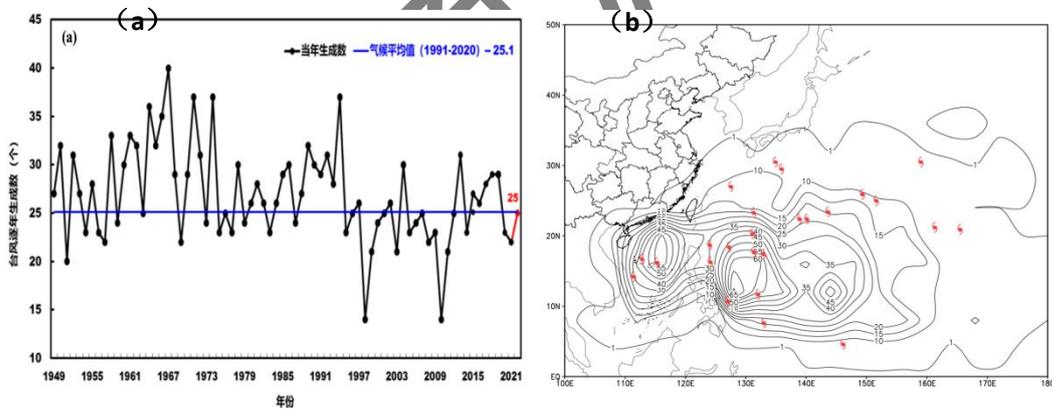
本文利用 1949—2021 年中国气象局 (CMA) 台风最佳路径资料 (Ying et al, 2014), 2022 年中央气象台台风路径和强度实时预报资料, 欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 的 ERA-Interim 逐 6 h 再分析资料 (水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$) (Yamaguchi and Majumdar, 2010), 对 2022 年西北太平洋和南海台风活动的主要特征进行分析, 总结 2022 年台风预报误差, 对业务中出现的主要预报难点问题探讨, 以期对未来台风业务预报和研究提供参考。

1 2022年西北太平洋和南海台风活动特征

1.1 台风生成特征

2022年，西北太平洋和南海共有25个台风生成，与多年（1991—2020年，下同）平均（25.1个）基本持平（图1a），平均台风极值强度为 $33.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，较多年平均 $37.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 偏弱。2022年的25个台风的平均生成位置为 19.7° N 、 134.5° E 较常年平均 16.1° N 、 136.3° E 偏北 3.6° ，偏西约 1.8° （图1b）。其中，在南海生成的“土台风”有3个（2203号“暹芭”、2207号“木兰”和2219号“桑卡”），较多年平均偏少1.5个。此外，有15个台风生成于 20° N 以北，多年平均为6.3个，非常罕见。

相比于多年台风逐月生成数（图2），2022年4月、9月和10月台风生成数超过多年平均，秋台风（9—11月）活动频繁，共有13个台风生成，占全年总数的52%。秋台风活动又呈现两个阶段，一是9月8—28日，21d内西北太平洋和南海共生成7个台风，平均3d生成1个台风；二是10月14—31日，18d内生成5个台风，平均3.6d生成1个台风，群发特征明显。



红色台风符号：2022年热带气旋生成位置。

图1 1949—2022年西北太平洋和南海热带气旋（a）逐年生成个数与（b）生成源地密度分布

Fig. 1 (a) Yearly number of tropical cyclones generated and (b) density distribution of tropical cyclone generation sources in the Northwest Pacific and South China Sea in 1949-2021

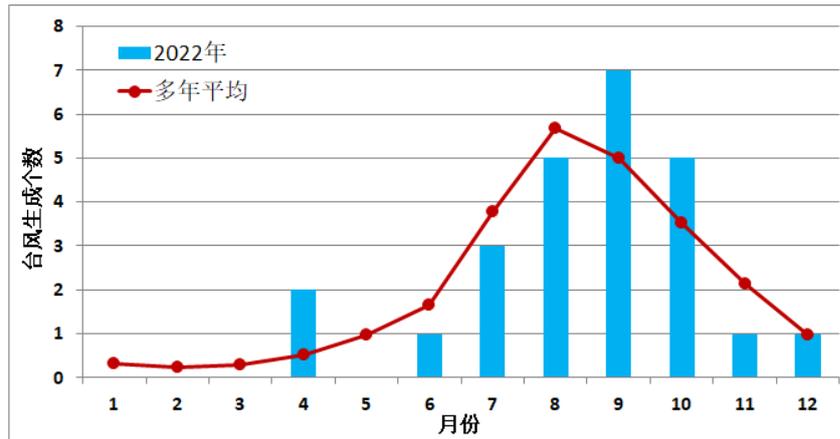


图 2 1991—2020 年逐月生成台风个数与 2022 年逐月生成热带气旋个数

Fig.2 Number of typhoons generated monthly from 1991 to 2020 (solid line), and number of tropical cyclones generated monthly in 2022 (blue bars)

1.2 台风活动特征

1.2.1 多台风活动频繁

2022 年，西北太平洋和南海台风活动的阶段性、群发性特征明显，25 个台风中有 20 个均伴有多台风活动，只有 5 个台风单独存在，较多年平均单独活动的台风数（10.6 个）明显偏少。按照 Ren et al(2020) 提出的双台风定义，当西北太平洋和南海的 2 个台风同时存在的距离在 1800 km 以内，且共同存在时间在 12 h 及以上时，则定义为双台风事件。2022 年共出现了 4 次双台风事件（表 1），其中“马勒卡”和“鲇鱼”、“桑达”和“翠丝”为典型双台风，其路径呈现相互靠近和互旋的现象，“鲇鱼”受双台风作用，其环流及减弱后的残涡长时间（近 72 h）在菲律宾中部附近回旋少动，持续强降水引发了山体滑坡等次生灾害，造成菲律宾重大人员伤亡。

表 1 2022 年西北太平洋和南海出现的双台风事件

Table 1 Binary typhoon events in the Northwest Pacific and the South China Sea in 2022

序号	台风名称	共存时段/BT	最近距离/km
1	马勒卡、鲇鱼	4 月 10 日 08: 00 至 12 日 20: 00	1177
2	暹芭、艾丽	7 月 1 日 11: 00 至 4 日 08: 00	1610
3	桑达、翠丝	7 月 31 日 14: 00 至 8 月 1 日 23: 00	255
4	塔拉斯、奥鹿	9 月 23 日 14: 00 至 24 日 08: 00	1642

1.2.2 台风快速增强多发

一些台风在发展过程中会出现强度迅速增强的阶段，被称为快速增强（rapid Intensification, RI），业务上通常将台风 24 h 最大风速增加超过 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 认为发生了 RI。对 RI 的预报是业务难点之一，也是台风强度预报误差的主要来源（周冠博，2022）。2022 年西北太平洋和南海生成的 25 个台风中，有 8 个经历了 RI，分别为“马勒卡”“蝎虎”“轩岚诺”“梅花”“南玛都”“奥鹿”“洛克”“纳沙”（表 2）。其中，以“奥鹿”24 h 强度增幅为最大，达到了 $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，并且在生命史中发生了二次 RI。首先从 9 月 23 日 20:00（8 级， $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）至 25 日 05:00 增强到了 17 级以上（ $62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）；随后由于受菲律宾吕宋岛影响，“奥鹿”强度有所减弱，但在南海再次发生快速增强，最大 24 h 强度增幅仍达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从 RI 持续时间来看，“奥鹿”两次 RI 过程累计持续时间达 80 h，在 8 个台风中 RI 的持续时间最长，其次是“轩岚诺”，RI 持续时间也达到了 54 h。值得注意的是，“轩岚诺”在东海强度也发生了二次增强，虽然并未达到 RI 的标准，但也使“轩岚诺”重新加强为超强台风，这也是 2022 年西北太平洋和南海的台风预报难点之一。

从 RI 发生的位置来看，大多数台风的 RI 均发生在西北太平洋，但“纳沙”和“奥鹿”的第二次 RI 均发生在南海。从 RI 发生的时间来看，主要发生在 8—9 月，但“马勒卡”和“纳沙”的 RI 分别发生在 4 月中旬和 10 月中旬。

表 2 2022 年西北太平洋及南海出现的台风快速增强事件
Table 2 Rapid intensification events of typhoons in the Northwest Pacific and the South China Sea in 2022

编号	台风名称	24 h 最大风速 增幅/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	快速增强时段/BT	RI 持续时间/h
2201	马勒卡	17	4 月 12 日 02:00 至 13 日 08:00	30
2210	蝎虎	19	8 月 22 日 14:00 至 24 日 08:00	42
2211	轩岚诺	27	8 月 28 日 14:00 至 30 日 20:00	54
2212	梅花	17	9 月 10 日 08:00 至 11 日 14:00	30
2214	南玛都	20	9 月 15 日 14:00 至 17 日 08:00	42
2216	奥鹿	42	9 月 23 日 20:00 至 25 日 20:00	48

		20	00	32
			9月26日08:00至27日16:00	
2218	洛克	24	9月28日20:00至30日05:00	33
2220	纳沙	17	10月15日14:00至17日07:00	41

1.3 台风登陆特征

2022年共有4个台风（“暹芭”“木兰”“马鞍”“梅花”）登陆我国沿海（图3），其中，“暹芭”从广东电白登陆后，穿过广东、广西进入湖南，之后“暹芭”减弱后的低压环流及其残留云系继续北上影响我国中东部至东北部地区，受影响的省（自治区、直辖市）达17个之多。另外“梅花”登陆浙江舟山后，又接连登陆上海奉贤、山东青岛和辽宁大连，是1949年有完整台风记录以来首个在不同省份四次登陆的台风，并且登陆强度均在热带风暴级以上，造成较大范围的风雨影响。

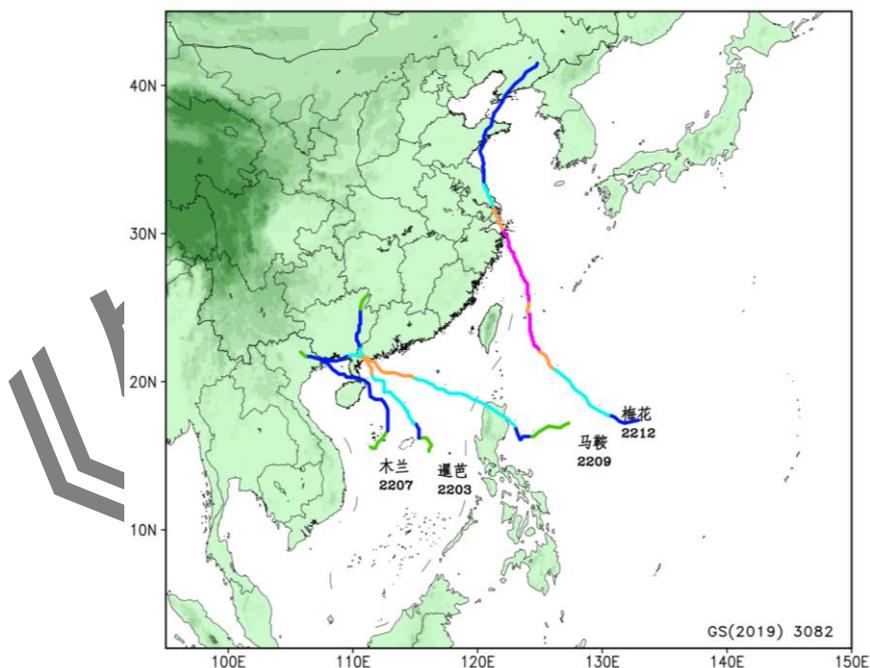


图3 2022年西北太平洋和南海登陆台风路径图

Fig. 3 Tracks of landfall typhoons from the Northwest Pacific and the South China Sea in 2022

1.3.1 登陆台风偏少偏强

2022年登陆台风数明显偏少（图4a），较常年同期（7.2个）偏少3.2个，为近30年

(1991 年以来) 登陆台风并列最少 (1997 年和 1998 年登陆台风均为 4 个)。同时, 自 2019 年以来, 已连续四年登陆台风个数偏少。

从登陆地段来看, 除了 2212 号台风梅花登陆浙江以外 (表 3), 另外 3 个台风均在广东西部登陆, 登陆地段集中。从登陆强度来看 (图 4b), 4 个台风平均首次登陆强度为 $33.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 略强于多年平均 ($32.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 其中除 2207 号台风木兰外, 首次登陆强度均达到了台风级及以上。

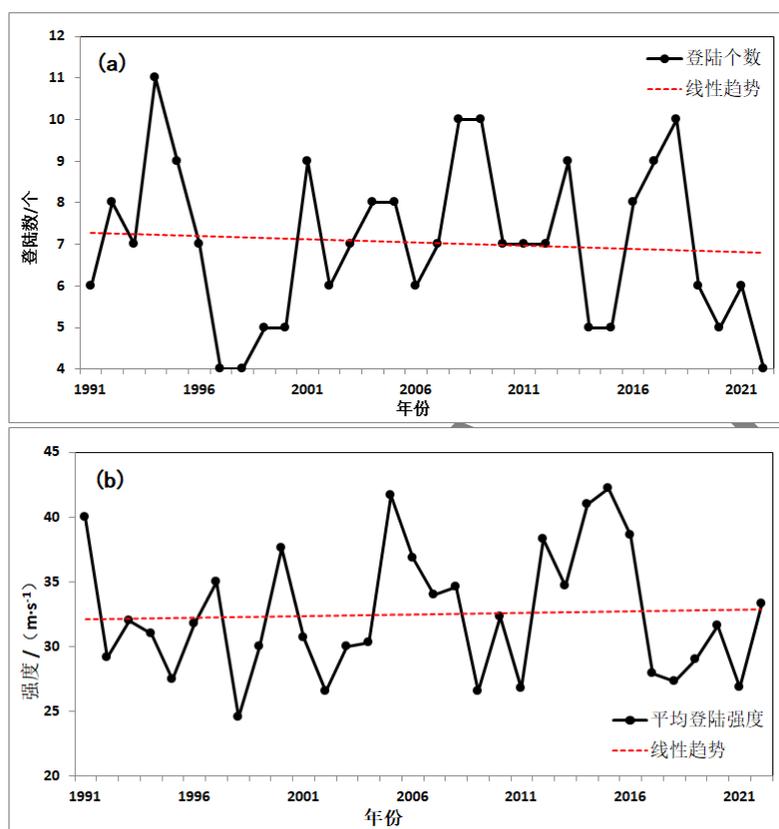


图 4 1991—2022 年登陆我国台风 (a) 个数和 (b) 平均登陆强度

Fig.4 (a) The number of typhoons making landfall on China and (b) their average landfall intensity from 1991 to 2022

1.3.2 风雨影响及灾害

2022 年的 4 个登陆台风均对我国造成了不同程度的影响 (表 3), 其中, “暹芭” 登陆后深入内陆, 导致多个省份先后出现强降雨, 海南、广东、广西、湖南、河南、安徽等地超过 60 个测站的日雨量达到特大暴雨量级, 广东茂名信宜大成镇日最大降水量达 695.6 mm; 海南三亚国家气象观测站日降雨量 (421.6 mm) 突破当地有气象记录以来日降雨量历史极值。特别是广东的雨区与 6 月极端龙舟水灾情雨区重叠, 出现了流域性洪水。

“梅花” 成为 1949 年有完整台风记录以来登陆浙江舟山以及登陆上海的最强台风, 浙

江、山东等地部分地区累计降水量达 250~500 mm,最大降水量为浙江余姚夏家岭的 707 mm,山东福山日降水量突破建站以来历史极值(王靖等, 2023)。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。

2022 年,台风灾害造成了 20 个省(自治区、直辖市)共计 429.8 万人受灾,247.9 万人紧急避险转移,800 余间房屋倒塌,1800 余间不同程度损坏,农作物受灾面积达 15.93 万 hm^2 ,其中绝收 1.14 万 hm^2 。总体数据表明,2022 年台风灾害造成的损失为 2000 年以来最低值。

表 3 2022 年登陆我国台风一览表
Table 3 List of the typhoons making landfall on China in 2022

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	
2203	暹芭	7月2日 15:00	广东电白	35	台风级	186.3	16.3	3	海南、广西、广东、福建、湖南、江西、湖北、河南、江苏、安徽、山东、河北、北京、天津、辽宁、吉林、黑龙江
2207	木兰	8月10日 10:50	广东徐闻	23	热带风暴级	12.6	7.6		广东、广西、海南
2209	马鞍	8月25日 10:30	广东电白	33	台风级	53.7	51.2		广东、广西、海南
2212	梅花	9月14日 20:30	浙江舟山	42	强台风级	177.2	172.8		台湾、浙江、上海、江苏、山东、辽宁、吉林
		9月15日 00:30	上海奉贤	35	台风级				
		9月16日 00:00	山东青岛	23	热带风暴级				
		9月16日 12:40	辽宁大连	23	热带风暴级				

2 2022 年台风预报误差分析

2.1 路径预报误差

2022年中央气象台对西北太平洋及南海生成的25个台风的24、48、72、96、120 h各时效主观路径预报误差分别为72、138、184、221、334 km(图5a),与过去5年(2017—2021年)各时效的平均误差(73、129、197、260、342 km)相比,其中24、72、96、120 h分别减小了1.4%、6.5%、15.0%和2.3%,48 h则增加了7.0%,该误差数据由中央气象台业务定位数据计算得到。

误差负贡献台风指该台风的平均误差大于全年平均误差。根据每个台风的预报样本误差(e)和年平均预报误差(E),可以认为当 $e < E$ 时,该样本对于全年预报准确率为正贡献,反之则为负贡献,因此可以用式(1)来表示单个台风相较于全年预报的相对贡献(QE)。

$$QE = \frac{(E - e) \times n}{E \times N} \times 100\% \quad (1)$$

式中:当 QE 描述某个预报时效时, n 为该台风该预报时效的样本数, N 为全年台风该预报时效总样本数。

根据式(1),计算2022年全部25个台风在各预报时效的 QE ,并将其从小到大排序,表4给出了2022年台风路径误差负贡献(即 $QE < 0$)的排名。其中,路径误差较大台风主要有“洛克”“梅花”“尼格”“马鞍”“暹芭”“南玛都”等,这些台风也往往是预报难点所在,下文选取典型个例“暹芭”“梅花”,对大误差产生的原因进行分析。

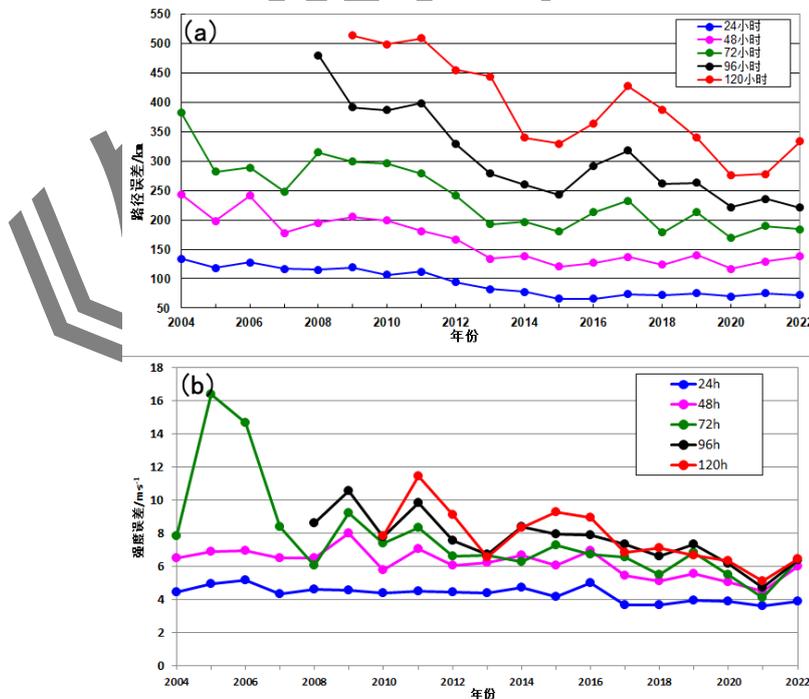


图5 中央气象台逐年台风平均 (a) 路径和 (b) 强度预报误差

Fig.5 (a) The average track forecast error and (b) average intensity forecast error of typhoons by CMA

表 4 2022 年台风路径和强度负贡献排名

Table 4 Negative contribution ranking of typhoon tracks and intensities in 2022

预报误差/h	路径误差负贡献排名			强度误差负贡献排名		
	1	2	3	1	2	3
24	洛克	尼格	南玛都	奥鹿	轩岚诺	南玛都
48	洛克	马鞍	暹芭	轩岚诺	奥鹿	南玛都
72	洛克	暹芭	马鞍	轩岚诺	奥鹿	南玛都
96	梅花	南玛都	—	轩岚诺	奥鹿	纳沙
120	梅花	南玛都	马勒卡	轩岚诺	梅花	—

注：“—”表中空缺表示该时效负贡献台风个数不足 3 个。

进一步将中央气象台路径预报误差分解为沿台风移动方向上移速误差 (along-track error, ATE) 和移向误差 (cross-track error, CTE) (王靖等, 2022) (图 6a), 发现 2022 年造成台风预报误差的主要是移速误差, 即路径移动方向上预报位置和实况的差异往往大于移向上偏离的差异, 这也是某些台风即使路径趋势预报较为准确, 但预报误差仍然较大的因素, 如台风梅花。

另外, 若以台风实况为坐标原点, 将台风相应预报时效的预报位置距实况的距离偏差分解成经向和纬向, 并利用式(2)计算平均, 得到台风路径预报误差的空间分布特征(图 6b)。

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \quad (2)$$

式中: *bias* 为平均偏差, 代表中央台预报的偏差大小和方向, *F* 代表路径预报, *O* 代表实况, *i* 表示第 *i* 个样本, *N* 为样本总数。由图 6b 可见, 中央台的路径预报总体较实况偏向南侧, 其中 24~72 h 平均偏差较小, 但 96~120 h 平均偏差明显增大, 分别约为 100km 和 200km。

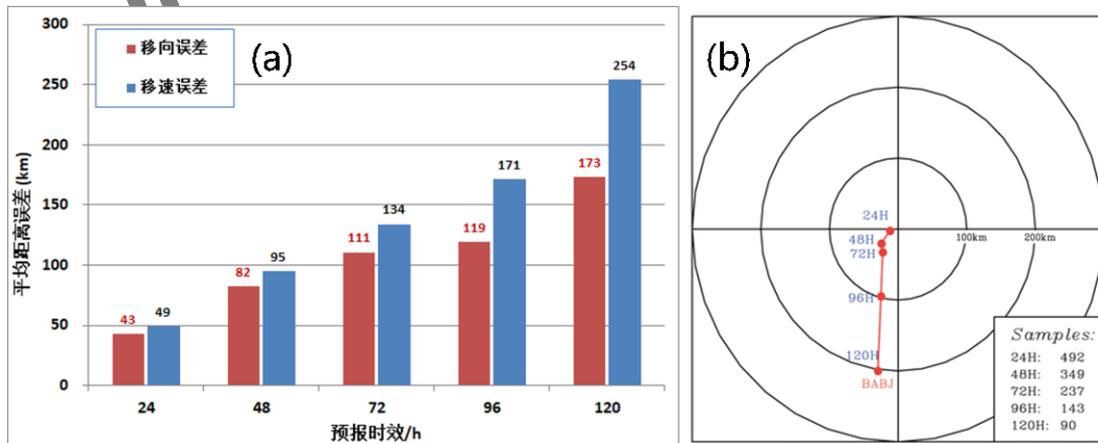


图 6 2022 年中央气象台台风路径预报 (a) 移速和移向误差, (b) 预报误差空间分布

Fig. 6 (a) Moving speed and direction errors and (b) spatial distribution of forecast errors in the 2022 typhoon

2.2 强度预报误差

2022 年中央气象台 24、48、72、96、120 h 各时效主观强度预报误差分别为 3.9、6.0、6.4、6.4、6.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 5b)，与过去五年 (2017—2021 年) 各时效的平均误差 (3.8、5.1、5.7、6.4、6.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 相比，24、96、120 h 的强度预报误差基本持平，但 48 h 和 72 h 预报明显增加了 17.6% 和 12.3%。

由表 2 和表 4 可见，2022 年台风强度预报误差较大的台风均发生了快速增强，分别计算了 2022 年发生快速增强的 8 个台风及其余 17 个非快速增强台风的平均强度预报误差 (图 7)，图中同时给出了全年平均强度预报误差进行对比。可见，快速增强组的平均强度预报误差较非快速增强组各时效误差增幅均超过 1 倍，因此对快速增强台风的预报是台风强度预报误差的主要来源。

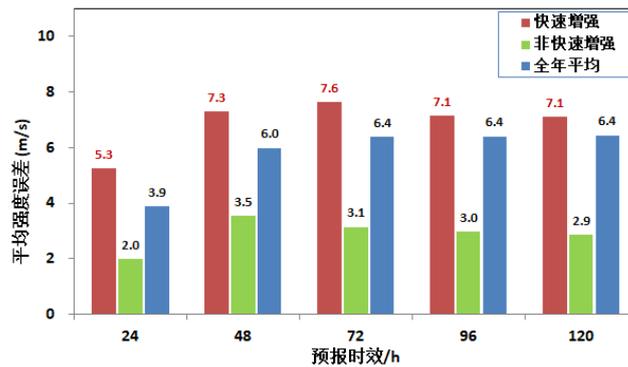


图 7 2022 年快速增强、非快速增强及全年台风平均强度预报误差

Fig.7 Comparison of forecast errors of rapid intensification, non-rapid intensification and annual average typhoon intensity in 2022

3 2022 年台风预报难点分析

从登陆台风的预报来看，有 2 个台风出现了较大的预报偏差，一个是 2203 号台风暹芭在生成初期的长时效路径预报偏西。中央气象台预计“暹芭”将在登陆后转向偏西方向移动，在广西南部缓慢西行或者原地回旋，实况是“暹芭”登陆后转向北偏东方向移动并进入湖南南部。这样的路径预报偏差，一方面导致长时效预报误差较大，同时还造成了较大的降雨预报偏差。另外一个预报难度较大的是 2212 号台风梅花登陆后的路径，中央气象台预计其将在登陆后从浙江北部或江苏南部转向偏西方向缓慢移动，并在深入内陆的过程中逐渐减弱填塞，但实况是“梅花”在浙江登陆后继续向偏北方向快速移动，分别在上海、山东和辽宁再

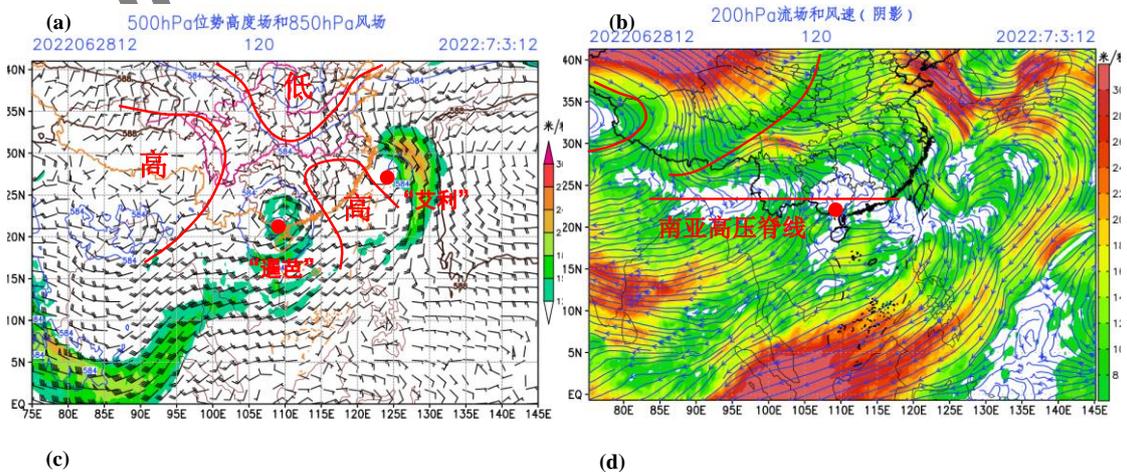
次登陆，影响华东和东北等地。“梅花”的路径预报偏差造成了山东、辽宁等地的降雨预报偏差。

另外，2211 号台风轩岚诺是一个极难预报的个例，在其发生发展的不同阶段，先后经历了生成初期强度快速增强、路径突变、双涡旋合并、尺度显著增大、强度快速减弱、双眼墙结构、眼壁替换及典型的变性过程，而且“轩岚诺”的路径、强度及结构变化之间存在复杂的相互作用，当前台风研究领域的诸多前沿问题在其生命史中均有体现。

3.1 2203 号台风暹芭的长时效路径预报难点分析

2203 号台风暹芭的长时效路径预报出现明显偏差，主要原因是确定性和多个集合模式对影响“暹芭”路径的关键系统出现了预报偏差，以下将从环流形势、关键系统、订正思路三个方面对预报难点进行分析。

从 6 月 28 日起报的确定性模式长时效 500 hPa 预报场上可以看到（图 8a），“暹芭”登陆后其北侧是宽广的鞍型场，同时距离北侧的西风带低槽比较远，说明此时对流层中层对台风登陆后向北的引导气流并不明显。850 hPa 风场也表明“暹芭”附近环境场中风速较弱，说明低层对台风移动的引导不明确。而东侧台风艾利附近的季风流入更强，有利于其进一步加强。一旦“艾利”的强度超过“暹芭”且纬度高于“暹芭”，2 个台风可能会出现明显的双台风效应，西台风“暹芭”将西行或回旋。从高空 200 hPa 的流场来看（图 8b），“暹芭”北侧为南压高压脊线，由于高压脊线的阻挡作用，导致“暹芭”的高空出流与西风急流不相连，高空出流与西风急流不相连也是不支持台风北行的重要信号。因此，通过“暹芭”生成初期起报的环流形势分析可见，“暹芭”登陆后其周边高低空各层的环境条件和东侧台风艾利的发展趋势均不支持其北行的路径预报。



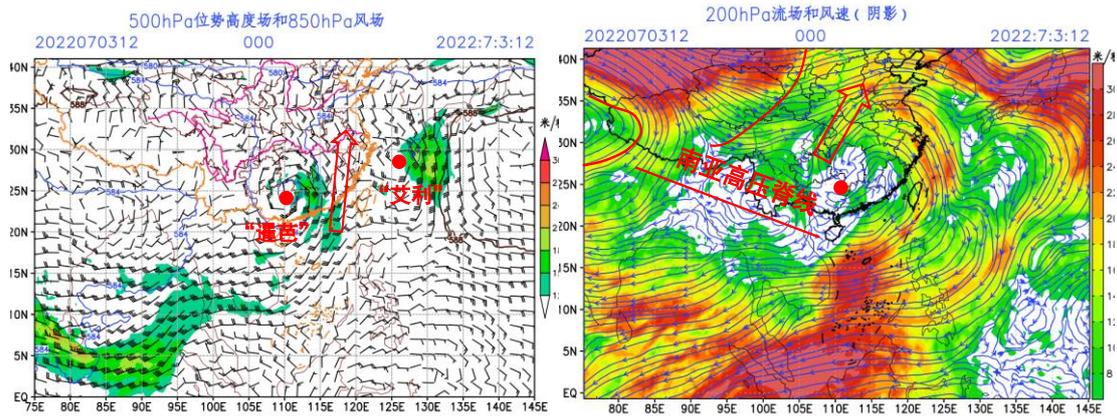


图 8 ECMWF 确定性模式 2022 年 (a, b) 6 月 28 日 20: 00 起报的 120 h 和 (c, d) 7 月 3 日 20: 00 分析场的 (a, c) 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: dagpm) 和 850 hPa 风速 (填色和风羽), (b, d) 200 hPa 流场和风速场 (填色)

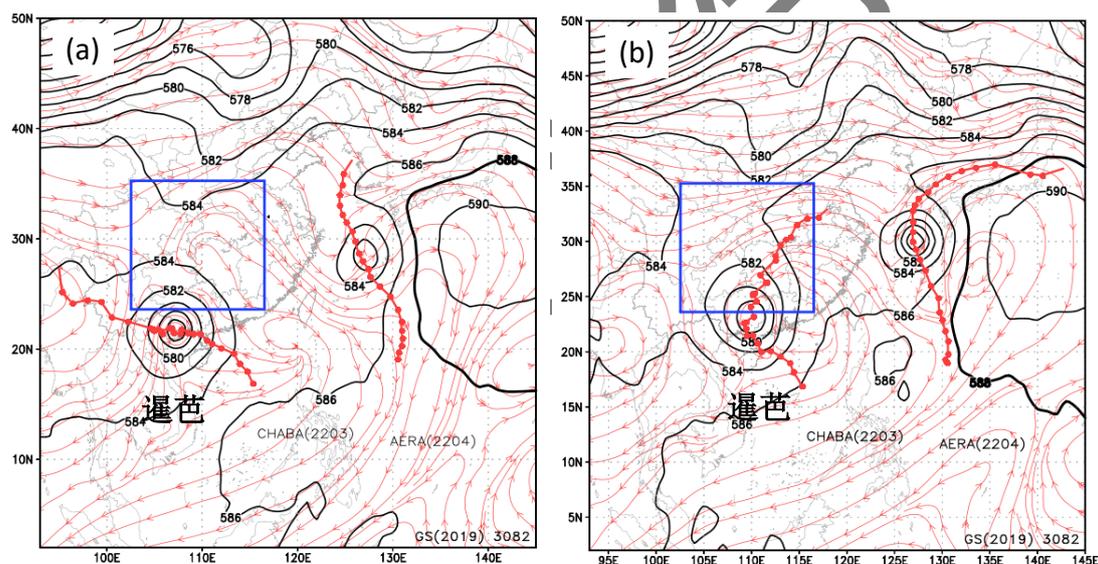
Fig.8 (a) The 500 hPa geopotential height (contours, unit: dagpm) and 850 hPa wind speed fields (colored and barb) and (b) 200 hPa flow and wind speed fields (colored) of the 120 h forecast initiated from 20:00 BT 28 June; (c) 500 hPa geopotential height and 850 hPa wind speed fields and (d) 200hPa flow and wind speed fields of the analysis field at 20:00 BT 3 July 2022 by ECMWF deterministic models

直到 7 月 1 日 20: 00 的实况、分析场及预报场才出现“暹芭”将北行的明显信号, 特别是东侧台风艾利的强度并没有像预期那样加强。从 7 月 1 日 20 时的云导风图 (图略) 可以看出, 台风北侧的高空出流已有与北侧西风急流相连的迹象。从预报场及分析场对比不难看出, 在环流形势的中早期支持预报员做出台风后期将西行的几个关键系统都有变化。7 月 3 日 20: 00 的 500 hPa 分析场显示 (图 8c), “暹芭”北侧大陆上的鞍型场宽度明显很小, 而 850 hPa 的风场也显示东侧台风艾利强度发展不如预期, 同时“暹芭”东侧偏南季风更强, 意味着中低层的引导气流有利于“暹芭”向偏北方向移动; 在 200 hPa 高空流场上 (图 8d), 阻挡“暹芭”北行的南压高压脊线位于台风的西侧, 台风北侧与槽前的西风急流连接, 意味着“暹芭”北行的出流通道已经打开, 有利于其北行。由于预报场的明显调整, 7 月 2 日 08: 00 中央气象台对台风暹芭的长时效 (72~120 h) 预报路径由原来的西折慢行调整为向偏北方向移动。

从形势场分析中可以看出, 影响“暹芭”路径的关键系统可能为 500 hPa 大陆上的鞍型场和 200 hPa 槽前急流, 下文将通过典型集合成员环流形势对比的方式对以上结论进行验证。从 6 月 30 日 20:00 起报的 72 h 集合预报成员中挑选了 2 个有代表性的成员进行对比分析, 其中 22 号成员预报“暹芭”路径是所有集合成员中最偏西的 (图 9a), 43 号成员预报“暹芭”路径与实况最接近 (图 9b)。可以看出, 在 22 号成员 200 hPa 流场预报中, “暹芭”与

其北侧的出流处于分离的状态，而在 500 hPa 高度场预报中，东西两环副热带高压合并，说明集合预报中的 22 号成员对中层的大陆高压预报得偏强，而对高层“暹芭”北侧的高空出流与西风带系统相连估测不足。这两个偏差与前文提到的确定性模式的长时效预报及分析场所得结论一致，说明“暹芭”的路径偏差与北侧高空出流和高压区有明显的联系。另外，也利用 CMA 台风模式不同起报时间的预报结果进行了对比分析（图略），台风艾利、200 hPa 西风急流的位置和大陆上 500 hPa 鞍型场所在位置的预报是调整最大的区域。

在台风的影响系统复杂且多数模式出现预报偏差时，预报员对模式的订正十分困难，但是通过以下三个方面的改进，可以在今后业务中遇到类似情况时提供一些思路：一是积累预报经验，通过天气学分析确定影响台风的关键系统并及时追踪关键系统的预报调整；二是深度挖掘集合预报资料，及时针对集合成员的预报进行检验，通过对不同时刻起报的集合成员的检验，及时调整预报，增加与实况更接近集合成员的权重；三是研发确定关键系统的客观方法。



注:蓝色方框表示台风暹芭与中纬度系统相互作用区域。

图 9 2022 年 6 月 30 日 20:00 起报 ECMWF 集合预报 (a) 22 号和 (b) 43 号成员对台风暹芭和艾利的路径预报 (红色点线)、200 hPa 流场和 500 hPa 位势高度场 (等值线, 单位: dagpm)

Fig.9 Track forecast (red dotted line), 200 hPa flow field and 500 hPa geopotential height field (contours, unit: dagpm) of Typhoon Chaba and Aera by (a) No.22 and (b) No.43 ECMWF ensemble models initialed from 20:00 30 June 2022

3.2 2212 号台风梅花登陆后陆上路径预报难点分析

2212 号台风梅花登陆后陆上路径预报出现明显偏差 (图 10a), 造成偏差出现的原因主要是模式对影响“梅花”路径的引导气流预报偏差所致, 下文将从环流形势演变和引导气流

变化对预报难点进行分析。

台风梅花登陆前一日和登陆当日（9月13—14日），集合和确定性模式预报“梅花”将在登陆后转向偏西方向移动(图10b)，其中CMA集合全部成员均预报“梅花”将在浙江温岭到舟山一带沿海登陆，且登陆后继续向偏西方向深入内陆；ECMWF和NCEP的集合预报的大部分成员的也预报出现西调，只有少部分成员预报了偏北移动的趋势。中央气象台在综合分析后选取了多数模式的预报，认为“梅花”登陆后将转向偏西方向移动，并可能在江苏、安徽等地缓慢移动或长时间滞留，但检验表明主观路径预报明显偏于实况路径西侧。

从环流形势分析可见，“梅花”登陆后的路径预报偏差，多数模式预报“梅花”将在登陆后移入弱引导气流环境，出现长时间回旋或在陆上滞留的可能性比较大。预报员考虑到9月13日500 hPa东亚槽（图11a）将减弱东退，导致大陆高压将与西北太平洋副热带高压合并。根据东侧有热带系统发展有利于西侧热带系统路径西行的预报经验，将“梅花”的预报路径向西做了调整，登陆点调整至宁波象山沿海，登陆后将向西北方向移动，进入弱引导气流区。这导致预报路径偏向实况西侧，出现了较大误差。

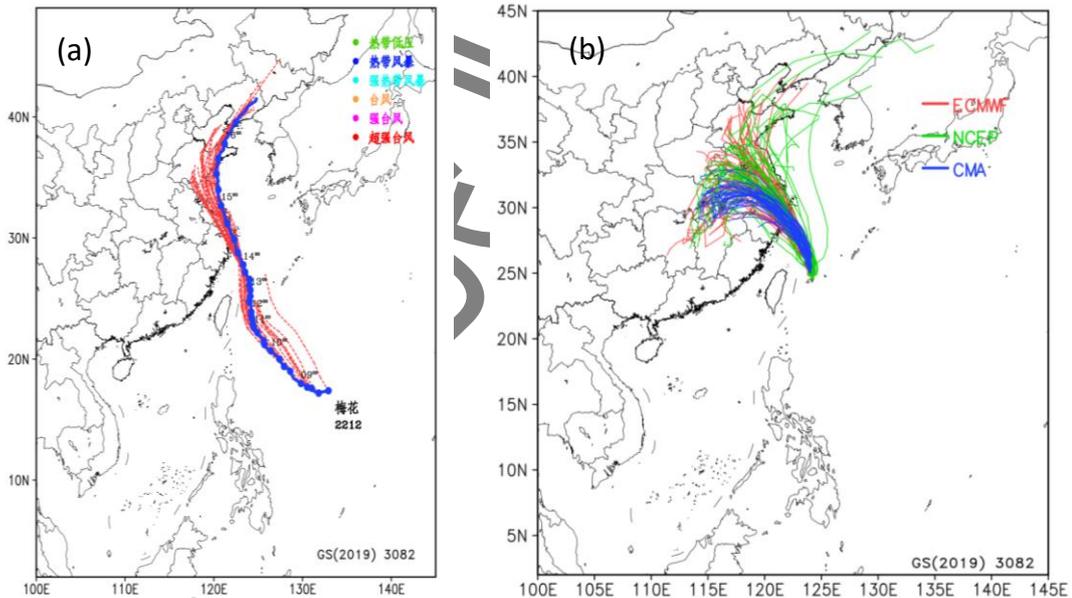


图10 台风梅花 (a) 实况路径 (蓝) 及预报路径 (红) 和 (b) 9月12日20:00起报的CMA、ECMWF、NCEP集合预报路径。

Fig.10 (a) Observed (blue) and forecast (red) tracks of Typhoon Muifa and (b) the ensemble forecast tracks from CMA, ECMWF and NCEP initialed at 20:00 BT 12 September 2022.

根据13日08时500 hPa的形势（图略），模式高度场预报跟实况比较接近，西北太平洋副热带高压较预报略强，副热带高压和大陆高压脊合并加强后比较有利于“梅花”13日

白天转向西北行，但从 500 hPa 的风场来看，“梅花”中心南侧的偏西急流实况较预报偏强 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，亦略强于北侧的偏东急流，这不利于“梅花”出现西行的分量，此外 13 日 08:00 “梅花”上空北侧存在非常强盛的西南急流出流，“梅花”本体附近的偏南引导气流更明显，而在 14 日起“梅花”800 hPa 以上引导气流明显加强，整层平均引导气流更是达到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上，这有利于“梅花”加速北上，并没有出现模式预报的回旋甚至滞留现象。

因此，预报员在预报台风路径时，不仅要关注形势场的演变，同时也需要关注引导气流的强弱，同时结合影响台风路径的关键系统演变对模式的预报方向和速度进行订正，可减小类似的预报偏差。

3.3 2211 号台风轩岚诺的路径和强度预报难点分析

近几十年来，全球各海域热带气旋的路径和强度预报均有所改进。但数值模式对热带气旋在路径和强度中出现突变的预报能力依然不足。路径和强度突变问题对主客观预报都是一个具有挑战性的问题 (Elsberry et al, 2013)。尤其是强度突变，如强度快速加强或快速减弱 (Fei et al, 2020; Wang et al, 2022)，对主观预报具有很大挑战性。2022 年 11 号台风轩岚诺是一个罕见的台风个例，当前台风研究领域的诸多前沿问题在其生命史中均有体现。在其发生发展的不同阶段，“轩岚诺”先后经历了生成初期强度快速增强、路径突变、双涡旋合并、尺度显著增大、强度快速减弱、双眼墙结构、眼壁替换及典型的变性过程 (Wang et al, 2023)，而且“轩岚诺”的路径、强度及结构变化之间存在复杂的相互作用。

“轩岚诺”生成于海表面温度高于 29°C 的广阔暖洋面上，生成初期即开始快速增强，直至发展成为超强台风，在琉球群岛以东达到其极值强度 ($62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 915 hPa)，24 h 内最大加强速率高达 $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，其快速增强过程长达 54 h，在“轩岚诺”达到最大强度的过程中，外层双眼墙逐渐形成，并在 24 h 内完成眼壁替换过程，“轩岚诺”经历眼壁替换后，中国、美国、日本各家主观预报发布的定强结果均表示“轩岚诺”的强度略有下降。

在“轩岚诺”增强及眼壁替换过程中，出现了双涡旋的相互作用和涡旋合并现象。在此过程中，“轩岚诺”的移动速度高达 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，台风尺寸也呈增大趋势，在高速移动过程中尺度增加是比较罕见的现象。8 月 30 日下午至 9 月 1 日，“轩岚诺”和其南侧的热带低压发生互旋合并，导致其出现历史罕见的路径、强度和结构突变。由于“藤原效应”，“轩岚诺”和其南侧的热带低压发生气旋式互旋，2 个系统的距离由 805 km (8 月 30 日 14:00) 减小至 408 km (9 月 1 日 08:00)，最终热带低压并入“轩岚诺”东北方向，丝缕化成为其外围螺旋雨带的一部分 (王靖和董林, 2022)。由图 11 卫星可见光图像可见，“轩岚诺”云系的

直径从 320 km 扩大到约 520 km。根据美国联合台风警报中心发布的台风风圈半径数据，合并后“轩岚诺”的 8 级大风的四象限平均半径都有增加。同时，其 10 级大风半径也都有所增加，即台风内核和外核尺寸在涡旋合并的过程中都有所增大（Wang and Wang, 2013）。

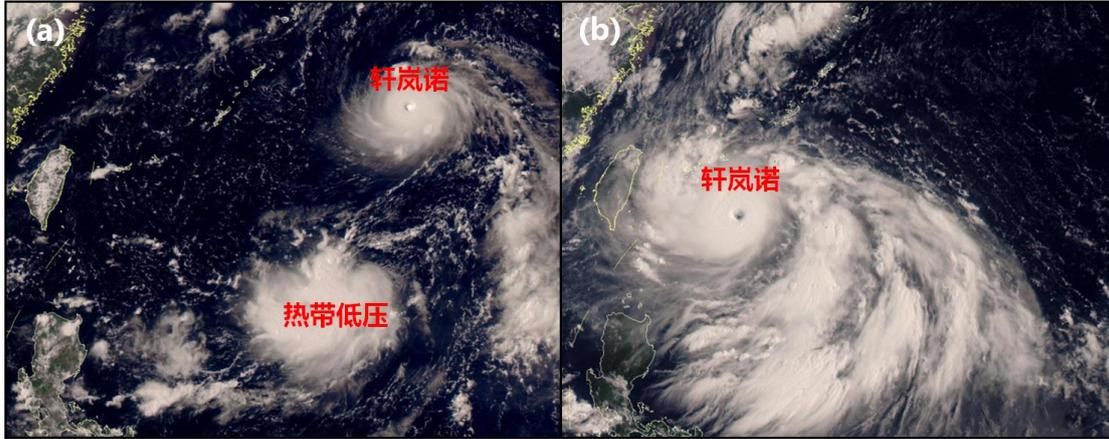
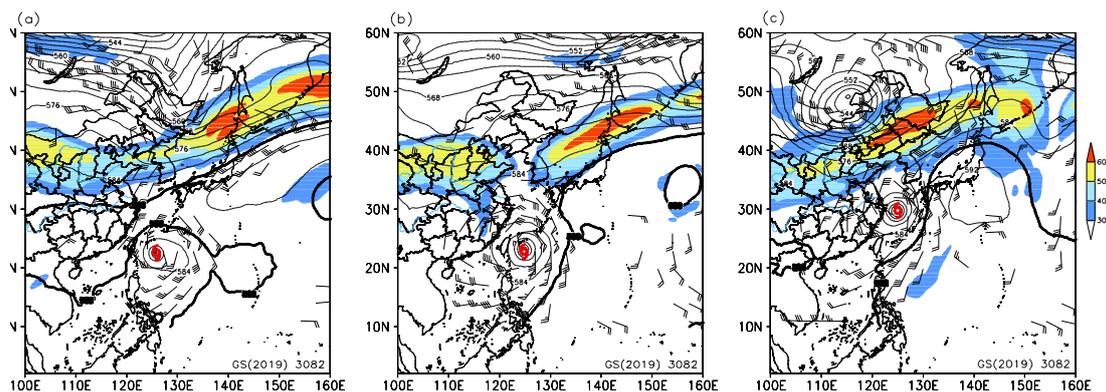


图 11 2022 年 (a) 8 月 31 日 14: 00 和 (b) 9 月 1 日 08: 00FY-4A 卫星可见光云图
Fig. 11 FY-4A visible imagery (0.65 μm) at (a) 14: 00 BT 31 August and (b) 08:00 BT 1 September 2022

在上述涡旋合并后，“轩岚诺”螺旋云带范围扩大，移速逐渐减慢。“轩岚诺”的移动路径呈现西—西偏南—西南—南—北—东北的“V 型”特征，其中 8 月 31 日至 9 月 2 日在台湾以东停滞或回旋，在此阶段“轩岚诺”位于副热带高压内，在巴士海峡以东的海上徘徊（图 12a），并导致其所经海域出现明显的冷尾流（Wang et al, 2023）。吞并南侧的热带低压后，“轩岚诺”强度快速减弱，其中心附近底层最大风速由 $62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ （9 月 1 日 14:00）下降到 $38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ （9 月 2 日 20:00），强度减弱速率为 24 h 减弱 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，是一次强度快速减弱过程。随着副热带高压形态的演变，“轩岚诺”逐渐向偏北方向移动（图 12b），并在我国东海再度加强为超强台风（图 12c），之后在与中纬度系统的相互作用下经历变性过程，最终于 9 月 6 日 20:00 在日本海海面转化为温带气旋。

对于“轩岚诺”复杂的路径和强度变化，中央气象台成功预报了其早期的快速加强、涡旋合并和大“V”型路径转折。但也出现了多处预报偏差，一是对早期快速增强速率的预测偏小，导致快速加强过程中的 24、36、48 h 强度预报出现 -20 、 -27 、 $-34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的负偏差；二是在其眼墙替换的过程中，外眼墙收缩、内眼墙减弱消散造成的强度波动亦未能在预报中很好地体现。从以上分析可以看出，在业务中准确预测台风强度和结构的快速变化依然面临巨大挑战。



注：加粗等值线表示 588 dagpm 等值线。

图 12 2022 年 9 月 (a) 1 日 00: 00, (b) 3 日 00: 00 和 (c) 5 日 00: 00 的 200 hPa 急流 (填色: $> 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、500 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm) 和 850 hPa 风场 (风羽: $> 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 显示)

Fig. 12 The 200 hPa jet (colored, $> 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 500 hPa geopotential height (contours, unit: dagpm), and 850 hPa wind field (barb, $> 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 0000 UTC (a) 1, (b) 3, and (c) 5 September 2022

4 结论与讨论

对 2022 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) 2022 年台风源地整体偏北, 其中有 15 个台风生成于 20° N 以北, 非常罕见; 台风群发性特征明显, 25 个台风中有 20 个均伴有多台风活动。共有 4 个台风登陆我国, 其中 3 个台风登陆广东西部, 1 个台风登陆浙江; 平均登陆强度略强于多年平均, 除 2207 号台风木兰外, 首次登陆强度均达到了台风级及以上; 自 2019 年以来, 已连续四年登陆台风个数偏少。

(2) 预报误差分析表明, 在台风生成初期、台风与西风带结合后转向以及多台风 (低压) 活动期间的路径预报误差较大; 从误差分解上看, 台风移速误差大于移向误差; 从误差方位看, 路径预报总体偏向实况南侧; 主要的强度预报误差来源于强度突变个例, 既包括快速增强也包括快速减弱阶段。

进一步对“暹芭”“梅花”“轩岚诺”3 个台风的预报难点分析发现: ①模式对“暹芭”北侧的大陆高压和高层急流的预报偏差是导致后期路径预报出现调整的主要原因, 可以通过天气分析、实时检验和关键系统识别等多方面的工作推进对预报偏差进行及时订正; ②“梅花”出现登陆后陆上预报偏差是模式对引导气流的预报偏差所致, 预报员不仅要及时分析环流形势的演变和调整, 也需关注引导气流等台风路径和强度诊断量的预报; ③“轩岚诺”的路径和强度变化复杂, 中央气象台在其生成初期快速加强、涡旋合并和大“V”型转折路径

的预报中把握较好,但是对快速加强和快速减弱的速率、结构变化导致的强度波动和尺度变化等方面有预报偏差,这种复杂台风的准确预报依赖于台风机理方面的研究取得进展和数值预报对台风结构的精细预报能力的提升。

此外,2022年台风预报中还存在不少预报难点和科学问题:在路径预报方面,中央气象台对“马鞍”“尼格”等登陆点或影响范围在不同的预报阶段均进行了较大调整;另外,远海转向台风马勒卡、洛克的预报误差较大,本文限于篇幅原因不能逐一开展分析,待未来开展进一步研究。在强度预报方面,虽然预报准确率的提升不大,但近年来越来越多的研究开始关注台风强度突变与其内部结构,以及多尺度相互作用的关系,期待在相关领域取得研究进展并应用于实际预报,以提高对台风的预报和服务能力,减轻灾害损失。

参考文献

- 曹莉, 高嵩, 贺雅楠, 等, 2018. 台风及海洋气象一体化预报平台的开发与应用[J]. 应用气象学报, 29(1): 35-44. Cao L, Gao S, He Y N, et al, 2018. Development and application of typhoon and marine meteorological integrated operational system[J]. J Appl Meteor Sci, 29(1): 35-44 (in Chinese).
- 陈博宇, 代刊, 唐健, 等, 2020. 基于多模式 QPF 融合的台风暴雨预报后处理技术研究及应用试验[J]. 气象, 46(10): 1261-1271. Chen B Y, Dai K, Tang J, et al, 2020. Research and application experiment on post-processing technology of typhoon rainstorm forecast based on multi-model QPF fusion[J]. Meteor Mon, 46(10): 1261-1271 (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).
- 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).
- 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).
- 李泽椿, 张玲, 钱奇峰, 等, 2020. 中央气象台台风预报业务的发展及思考[J]. 大气科学学报, 43(1): 10-19. Li Z C, Zhang L, Qian Q F, et al, 2020. The development and consideration of typhoon forecast operation of National Meteorological Center[J]. Trans Atmos Sci, 43(1): 10-19 (in Chinese).
- 鲁亚斌, 普贵明, 解明恩, 等, 2007. 0604 号强热带风暴碧利斯对云南的影响及维持机制[J]. 气象, 33(11): 49-57. Lu Y B, Pu G M, Xie M E, et al, 2007. The maintaining mechanism of 0604 Severe Tropical Storm Bilis and its influence on Yunnan Province[J]. Meteor Mon, 33(11): 49-57 (in Chinese).
- 吕心艳, 钱奇峰, 王登科, 等, 2022. 基于深度图像目标检测的智能台风涡旋识别技术[J]. 热带气象学报, 38(4): 492-501. Lyu L Y, Qian Q F, Wang D K, et al, 2022. Intelligent technique of typhoon vortex detection based on object detection with deep learning of satellite image[J]. J Trop Meteor, 38(4): 492-501 (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).
- 钱传海, 路秀娟, 陈涛, 2009. 引起“碧利斯”强降水的 MCS 数值模拟研究[J]. 气象, 35(4): 11-19. Qian C H, Lu X J, Chen T, 2009. Numerical simulation of heavy rainfall associated with Severe Tropical Storm Bilis[J]. Meteor Mon, 35(4): 11-19 (in Chinese).
- 任宏昌, 张恒德, 2022. 郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析[J]. 河海大学学报(自

- 然科学版), 50(5): 1-9. Ren H C, Zhang H D, 2022. Refined features and main causes of “7 • 20” rainstorm in Zhengzhou[J]. J Hohai Univ (Nat Sci), 50(5): 1-9 (in Chinese).
- 王靖, 董林, 2022. 2022 年 8 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 48(11): 1487-1496. Wang Q, Dong L, 2022. Analysis of the August 2022 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 48(11): 1487-1496 (in Chinese).
- 王靖, 钱传海, 董林, 等, 2023. 台风“梅花”(2212)的主要特点和路径预报难点分析[J]. 海洋气象学报, 43(1): 52-62. Wang Q, Qian C H, Dong L, et al, 2023. Analysis on main characteristics of Typhoon Muifa (2212) and difficulties in its track forecast[J]. J Mar Meteorol, 43(1): 52-62 (in Chinese).
- 王靖, 许映龙, 董林, 等, 2022. 2012-2021 年中央气象台台风 3~5d 路径预报误差分析[J]. 海洋预报, 39(6): 25-33. Wang Q, Xu Y L, Dong L, et al, 2022. Analysis of typhoon track forecast errors for 3~5 days by Central Meteorological Observatory from 2012 to 2021[J]. Mar Forecasts, 39(6): 25-33 (in Chinese).
- 汪小康, 崔春光, 王婧羽, 等, 2022. “21 • 7” 河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J]. 气象, 48(5): 533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5): 533-544 (in Chinese).
- 向纯怡, 高拴柱, 刘达, 2022a. 2021 年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. 海洋气象学报, 42(1): 39-49. Xiang C Y, Gao S Z, Liu D, 2022a. Overview of typhoon activities over western North Pacific and the South China Sea in 2021[J]. J Mar Meteorol, 42(1): 39-49 (in Chinese).
- 向纯怡, 许映龙, 高拴柱, 等, 2022b. 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, 2022b. 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).
- 岳健, 董林, 陈静, 等, 2023. 基于再分析尺度化因子的集合预报初值扰动对台风烟花(2106)预报的影响[J]. 气象, 49(7): 773-789. Yue J, Dong L, Chen J, et al, 2023. Effect of ensemble initial perturbations with rescaling on the forecast of typhoon In-Fa (2106)[J]. Meteor Mon, 49(7): 773-789 (in Chinese).
- 张恒德, 孔期, 2007. 0604 号强热带风暴碧利斯异常强降水过程的诊断分析[J]. 气象, 33(5): 42-48. Zhang H D, Kong Q, 2007. Diagnostic analysis of Severe Tropical Storm Bilis heavy rain event[J]. Meteor Mon, 33(5): 42-48 (in Chinese).
- 周冠博, 柳龙生, 董林, 等, 2022b. 2020 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 48(4): 504-515. Zhou G B, Liu L S, Dong L, et al, 2022b. The analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs in Western North Pacific in 2020[J]. Meteor Mon, 48(4): 504-515 (in Chinese).
- 周冠博, 钱奇峰, 吕心艳, 等, 2022a. 人工智能在台风监测和预报中的探索与展望[J]. 气象研究与应用, 43(2): 1-8. Zhou G B, Qian Q F, Lv X Y, et al, 2022a. Application and expectation of artificial intelligence in typhoon monitoring and forecasting[J]. J Meteor Res Appl, 43(2): 1-8 (in Chinese).
- Elsberry R L, Chen L S, Davidson J, et al, 2013. Advances in understanding and forecasting rapidly changing phenomena in tropical cyclones[J]. Trop Cyclone Res Rev, 2(1): 13-24.

-
- Fei R, Xu J, Wang Y Q, et al, 2020. Factors affecting the weakening rate of tropical cyclones over the western North Pacific[J]. *Mon Wea Rev*, 148(9): 3693-3712.
- 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 Q, Zhao D J, Duan Y H, et al, 2023. Super Typhoon Hinnamnor (2022) with a record-breaking lifespan over the western North Pacific[J]. *Adv Atmos Sci*, 40(9): 1558-1566.
- Wang Y Q, Wang H, 2013. The inner-core size increase of Typhoon Megi (2010) during its rapid intensification phase[J]. *Trop Cyclone Res Rev*, 2(2): 65-80.
- Wang Y Q, Xu J, Tan Z M, 2022. Contribution of dissipative heating to the intensity dependence of tropical cyclone intensification[J]. *J Atmos Sci*, 79(8): 2169-2180.
- Yamaguchi M, Majumdar S J, 2010. Using TIGGE data to diagnose initial perturbations and their growth for tropical cyclone ensemble forecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 138(9): 3634-3655.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 31(2): 287-301.