

台风海葵（2311）的主要特点和预报难点分析

王海平¹ 张玲¹ 董林¹ 向纯怡¹ 许映龙^{1,2} 聂高臻¹

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国科学院大学, 北京 100049

提 要: 2023 年第 11 号台风海葵在西偏北移动过程中, 多次出现摆动, 形成曲折的蛇形路径, 其在登陆台湾岛前加强为超强台风级, 进入台湾海峡后移动速度缓慢, 再次登陆减弱后残涡维持时间长, 降水持续时间长, 累计雨量大。不同模式以及集合预报的不同成员对“海葵”的登陆点和登陆强度的预报也存在较大的误差和不确定性, 给预报订正带来极大挑战。本文使用 ECMWF、NCEP 及 CMA 确定性和集合预报资料分析了“海葵”的主要特点和预报过程中出现的主要难点: 当模式对台风路径的预报在我国近海出现较大误差和分歧时, 由于路径预报的不确定性也会影响极值强度预报, 此时订正出现极大困难; 台风穿越台湾岛进入台湾海峡后, 如何定量估计受弱引导气流和地形影响所导致的缓慢移动的时间; 台风登陆并减弱后, 其残余环流维持时间、移动路径和降水影响的定量估计。

关键词: 台风海葵, 近海加强, 缓慢移动, 集合预报

Analysis of Main Characteristics and Difficulties in Typhoon Haikui (2311) Forecast

WANG Haiping¹ ZHANG Ling¹ DONG Lin¹ XIANG Chunyi¹ XU Yinglong^{1,2} NIE Gaozhen¹

1 National Meteorological Center, Beijing 100081

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Typhoon Haikui(2311) moved west-northwestward, repeatedly wobbled and forming a serpentine path. It strengthened into super typhoon category before landing on Taiwan Island, then moved slowly after entering the Taiwan Strait. After landing again, the residual vortex sustained for about 5 days, and the precipitation duration and accumulated rainfall were large. Different models and different members of ensemble forecast also have large errors and uncertainties in forecasting the landing position and landfall intensity of Haikui, which brings great challenges to forecast correction. In this paper, ECMWF, NCEP and CMA determinate and ensemble

2024 年 4 月 2 日收稿; 2024 年 9 月 13 日收修订稿

国家重点研发计划项目 (2023YFC3107902) 资助

第一作者: 王海平, 主要从事台风与海洋气象预报研究。E-mail: wanghp@cma.gov.cn

forecast dataset is used to analyse the main characteristics of Haikui and important difficulties in the process of operational forecast: There are large errors and differences in the forecast of typhoon track in the offshore waters of China, and the operational correction problems in the intensity forecast are affected by the uncertainty of the track forecast. The quantitative estimation of slow moving time caused by weak steering flow and terrain influence after typhoon crossing Taiwan Island and entering Taiwan Strait. Quantitative estimation of typhoon residual circulation maintenance time, track and precipitation influence after landfall weakening.

Key words: Typhoon Haikui; intensified offshore; moving slowly; ensemble forecast

引言

随着现代数值预报模式对四维变分同化等技术改进和分辨率的不断提高 (Jones and Wang, 2023; Bauer et al, 2015), 集合预报系统的持续改进 (Kay and Wang, 2020), 集合模式订正客观方法的发展 (Qi et al, 2014), 以及近年来迅速发展起来的人工智能大模型方法应用 (Chase et al, 2023) 等, 台风的客观预报能力逐步增强。在此基础上, 对台风发生发展科学问题的研究也更加深入, 促进了台风路径和强度综合预报水平的不断提高, 随之对台风引发的大风、暴雨、风暴潮等灾害的预报能力也逐步提高, 为防灾减灾的决策部署工作提供了更加坚实的基础。然而, 目前国内外台风预报仍共同面临许多需要着力研究和解决的难点问题。近年来在全球气候异常变化的背景下, 极端天气事件频发, 台风活动特征也随之发生变化。例如: 台风的群发特征明显, 多台风相互作用使得影响台风移动和强度变化的因素增多, 从而更加难以把握; 生成位置更加偏北偏西, 对我国东部和北部沿海的影响更加明显; 登陆我国的台风数量出现了个数偏少但强度偏强的现象等 (钱奇峰等, 2023)。

为了实现台风预报准确率的稳定提升, 中央气象台多年来持续不断地对疑难台风个例的预报难点问题开展分析总结和科学研究 (高拴柱等, 2018; 董林等, 2020; 吕心艳等, 2021; 王海平等, 2022; 周冠博等, 2022; 向纯怡等, 2022; 钱奇峰等, 2023)。通过对近年来多个台风的复盘总结发现, 对于台风的路径预报易出现较大偏差主要是在 72 h 以上的中长期时效。多个台风路径预报出现较大偏差都与多涡旋的活动有关, 如 2023 年的台风杜苏芮 (刘达等, 2023)、2022 年的台风梅花 (王靖等, 2023)、2021 年的台风烟花 (王海平等, 2022) 等。台风在向东北转向后的变性过程中移动速度加快, 模式对移速的预报也往往出现较大偏差, 如 2022 年的台风梅花等。台风强度预报出现较大误差则大多与快速增强阶段的预报有

关。高拴柱（2023）研究表明，有利于台风增强的动力和热力条件（如海面温度高，较强的水汽输送和对流不稳定，较小的环境风垂直切变和较强的台风高层出流等）一般可以达到，但台风从一般增强到快速增强的转变过程中，有时上述因子并未发生显著变化或突变，甚至有些快速增强过程伴随了不利的环境因子。另外，受分辨率等因素的影响，目前数值模式对台风结构的描述和预报仍较为困难，也难以预报双眼墙结构的演变过程（刘涛等，2021）。由上可见，预报台风快速增强仍存在诸多难点。台风预报中的疑难问题还包括，对台风登陆后的水汽输送和地形影响等用于判断台风能否长期维持的因素的预报（李英等，2005），对高空冷涡发展和西风带槽脊移动速度的预报往往存在较大偏差（王海平，2023），且各家模式和集合成员间常有较大误差和分歧。

2023年第11号台风海葵移动方向和速度变化复杂，靠近台湾岛前加强为超强台风，模式对其路径和强度预报出现较大偏差，因此本文将通过分析其主要特点和预报难点，对数值模式的性能做进一步讨论和研究，为模式改进和预报中模式的订正提供依据。

1 数据资料和方法

研究中所用数据资料包括：国家气象信息中心提供的国家级自动气象观测站风雨观测资料；中央气象台、日本气象厅（JMA）和美国联合台风警报中心（JTWC）的官方主观分析和实时预报资料；模式预报资料主要来自中国气象局全球数值预报系统（CMA-GFS）和区域中尺度台风数值预报系统（CMA-TYM）、欧洲中期天气预报中心（ECMWF）和美国环境预报中心（NCEP）的台风确定性数值预报和集合预报产品；逐小时、空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的ERA5再分析数据。台风路径和强度的主、客观预报误差计算统一采用中国气象局台风最佳路径资料。

2 台风海葵概况

2023年第11号台风海葵于8月28日08:00在西北太平洋洋面上生成，之后向西偏北方向移动，强度逐渐增强；9月3日10:00加强为超强台风级（ $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ），3日15:30前后在台湾省台东市沿海登陆，登陆时中心附近最大风力为15级（ $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，强台风级）；之后穿过台湾岛南部在其西南沿岸海域回旋打转，随后进入台湾海峡，强度逐渐减弱；9月5日早晨先后在福建东山和广东饶平沿海再次登陆（热带风暴级，8级）；5日08:00减弱为热带低压；中央气象台于9月6日17:00对其停止编号（图1a）。

“海葵”移动路径的主要特点是在偏西行过程中，多次出现摆动，形成曲折的蛇形路径，

进入台湾海峡后移动速度缓慢。强度变化的主要特点是在登陆台湾岛前近海增强至超强台风级。

“海葵”及其残余环流造成了严重的降水影响，从9月3日白天开始至14日白天，持续时间长达12 d，且累计降水量大、夜间降水特点突出、极端性强。台湾花莲局地累计降水量超过1100 mm；福建过程降水强度为2005年以来历史第二，仅次于2006年的台风碧利斯。广东过程降水强度为2003年以来第二强；广西有47个乡镇24 h降水量破纪录；香港天文台录得最大1 h降水量为158.1 mm，为1884年有记录以来最高纪录（图1b）。

“海葵”造成的大风影响相对较小。9月3—6日，台湾中东部和南部、福建中东部沿海等地出现了8~10级阵风，台湾东部沿海和福建福州、莆田、泉州等沿海局地达12~14级；7—8日，广东中东部及香港、澳门等地出现6~8级阵风，深圳东南部沿海局地达9~10级（图1c）。

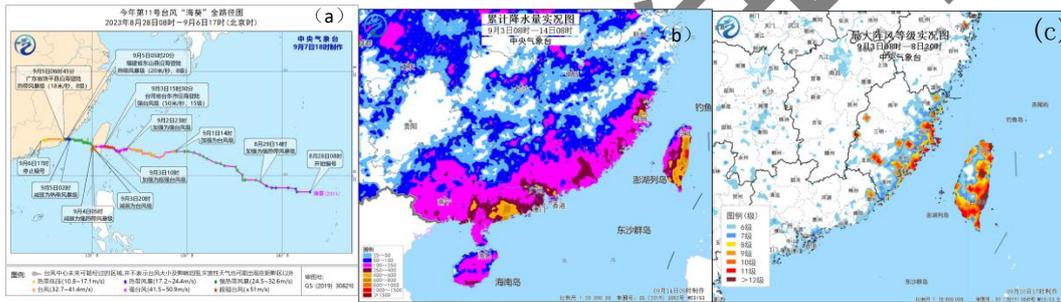


图1 台风海葵 (a) 全路径, (b) 降水量实况, (c) 最大阵风实况

Fig.1 (a)Track of Typhoon Haikui, (b) precipitation and(c) maximum gust during typhoon period

3 主观和客观路径预报误差对比

对比中国、日本和美国官方综合预报对台风海葵的路径同样本预报误差（图2a），各时效误差相近，其中日本预报误差相对较大，其次是中国，美国预报误差相对较小。误差值相比西北太平洋多年平均的路径预报误差明显偏大，其中，中央气象台对“海葵”的24 h路径平均预报误差为100 km，明显大于2023年的62 km。将路径的位置预报误差分解为沿着路径移动方向的误差（ATE）和垂直于路径移动方向的位置误差（CTE），三家主观预报的路径误差都与其CTE相近，而ATE均较小。说明“海葵”的主观路径预报误差都主要来自对其移动方向预报出现严重偏差，且都偏向台风移动方向的右侧。主观预报对“海葵”移动速度的预报偏差较小，但对长时效的移动速度预报较实况偏慢。

分析主流数值模式路径预报平均误差（图2b）发现，ECMWF和CMA-GFS确定性预报误差较大，而CMA-TYM和NCEP预报误差相对较小。同样分解为ATE和CTE可以看

到, ECMWF 和 CMA-GFS 误差较大的原因是“海葵”移动方向的预报误差偏大,也是明显偏向实况路径的右侧。CMA-TYM 和 NCEP 的移动方向平均偏差非常小,而移动速度预报较实况略偏慢。

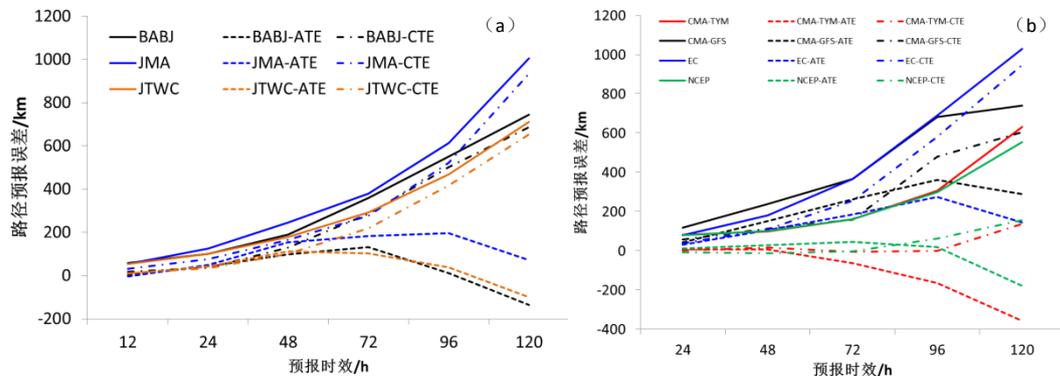


图2 (a) 中国、日本、美国官方, (b) 各数值模式预报台风海葵路径误差

Fig.2 Comparison of track errors for Typhoon Haikui in (a) official forecasts of China, Japan and the United States and (b) numerical model

根据“海葵”强度预报误差检验结果(图3),中国的24 h预报误差与日本相当,小于美国。中国的48~72 h预报误差与美国相当,大于日本。日本的96~120 h预报误差大于中国和美国。从模式检验结果来看,CMA-TYM在各预报时效的误差小于CMA-GFS和ECMWF,NCEP预报误差除24 h略大于CMA-TYM外,其余预报时效都小于CMA-TYM。

从上述对数值模式的预报误差对比发现,ECMWF确定性模式对“海葵”的路径和强度预报误差相对其他模式均偏大。而在以往的模式性能检验结果中,通常ECMWF预报效果优于其他模式。因此,分析该模式在“海葵”个例中对不同路径和强度调整阶段出现较大预报误差的原因有利于更好地了解其预报性能,并为模式订正方法研究提供依据。

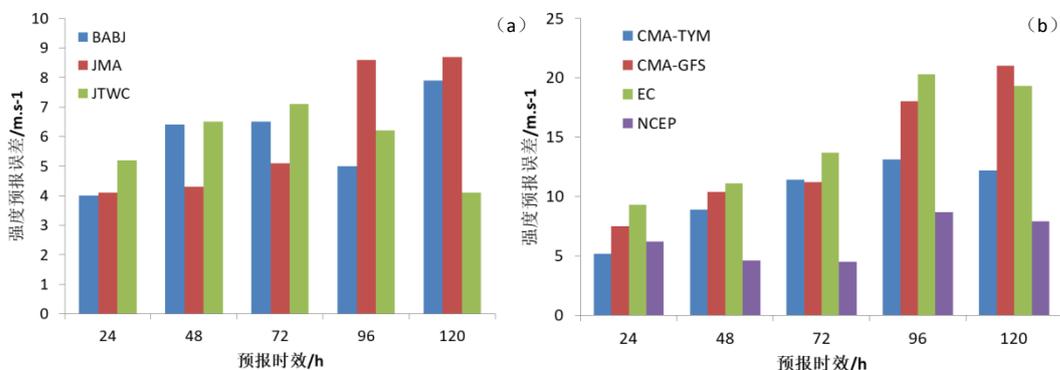


图3 (a) 中国、日本、美国官方, (b) 各数值模式预报台风海葵强度误差

Fig.3 Comparison of intensity errors for Typhoon Haikui in (a) official forecasts of China, Japan and the United States and (b) numerical model

4 预报难点分析

在台风海葵的预报中，数值模式预报分歧大，各家主观预报也出现较大误差，出现了四个较为突出的预报难点问题：(1)将首次登陆预报位置从浙江沿海向南调整至台湾南部沿海，(2)登陆台湾岛前的台风快速增强预报，(3)在台湾海峡长时间打转的原因，(4)“海葵”登陆减弱后的残涡影响预报。以下将主要针对这四个预报难点问题进行具体分析。

4.1 登陆位置预报偏差原因分析

“海葵”生成初期，三家官方机构均预报其将在浙江附近沿海登陆，之后登陆位置预报出现逐渐向南的调整，直至调整至台湾岛东南部沿海（图4）。同时，大部分的数值模式确定性预报或是集合预报产品也表现出了这样的调整（图略）。导致主、客观的中长时效（72~120 h）路径预报出现较大误差，例如，120 h 主观路径预报误差达到 700~1000 km，且误差主要来自对移动方向的预报偏差。

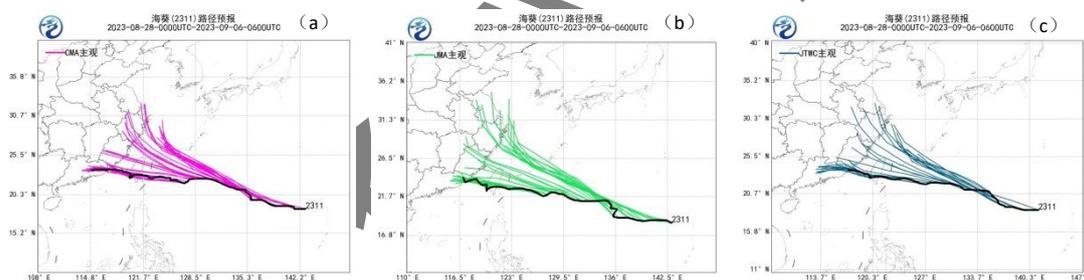


图4 (a)中国、(b)日本、(c)美国对台风海葵路径预报的调整

Fig.4 The adjustments to the track forecast of Typhoon Haikui made by CMA(a)、JMA(b) and JTWC(c)

对比 CMA-TYM、CMA-GFS 以及 ECMWF、NCEP 确定性路径预报发现，CMA-TYM 与 NCEP 误差相对较小。CMA-TYM 移向预报偏差小，但移速预报明显偏慢；ECMWF 和 CMA-GFS 稳定性较好，但误差偏大；NCEP 预报误差较小，但预报调整幅度较大，模式的预报稳定性相对较差（图略）。

从各家模式的确定性预报在 8 月 29 日 20:00 起报的 9 月 1 日 08:00（即“海葵”登陆台湾岛东南部沿海前大约 36 h）500 hPa 位势高度场（图 5）可见，均预报出了“海葵”北侧的副热带高压（以下简称副高）和“海葵”东西两侧另外两个气旋的活动，但对这些影

响“海葵”移动的重要系统，预报的强度和位置存在较大差异。模式对副高预报普遍偏弱，对多涡旋活动的预报性能也较差。CMA-GFS和ECMWF对“海葵”强度预报偏弱，受多涡旋活动的相互影响弱，“海葵”受副高引导向西北方向移动。CMA-TYM对“海葵”的强度预报误差相对较小，对其西侧“苏拉”的位置预报偏北，对其东侧的“鸿雁”预报偏强，“海葵”受多涡旋影响移动缓慢。NCEP对副高和“海葵”的强度预报都偏弱，预报其将向西偏北方向移动，路径相对最接近实况，其原因并非是对副高的预报更接近实况，而是在这一起报时刻对辐合带内的三个涡旋的位置和强度预报相对较好，后期也仍出现了较大调整，路径预报误差在不同起报时次存在较大波动。说明目前模式对带状副高及其南侧辐合带内多涡旋结构（包括尺度和强度）及其相互作用仍普遍难以把握。

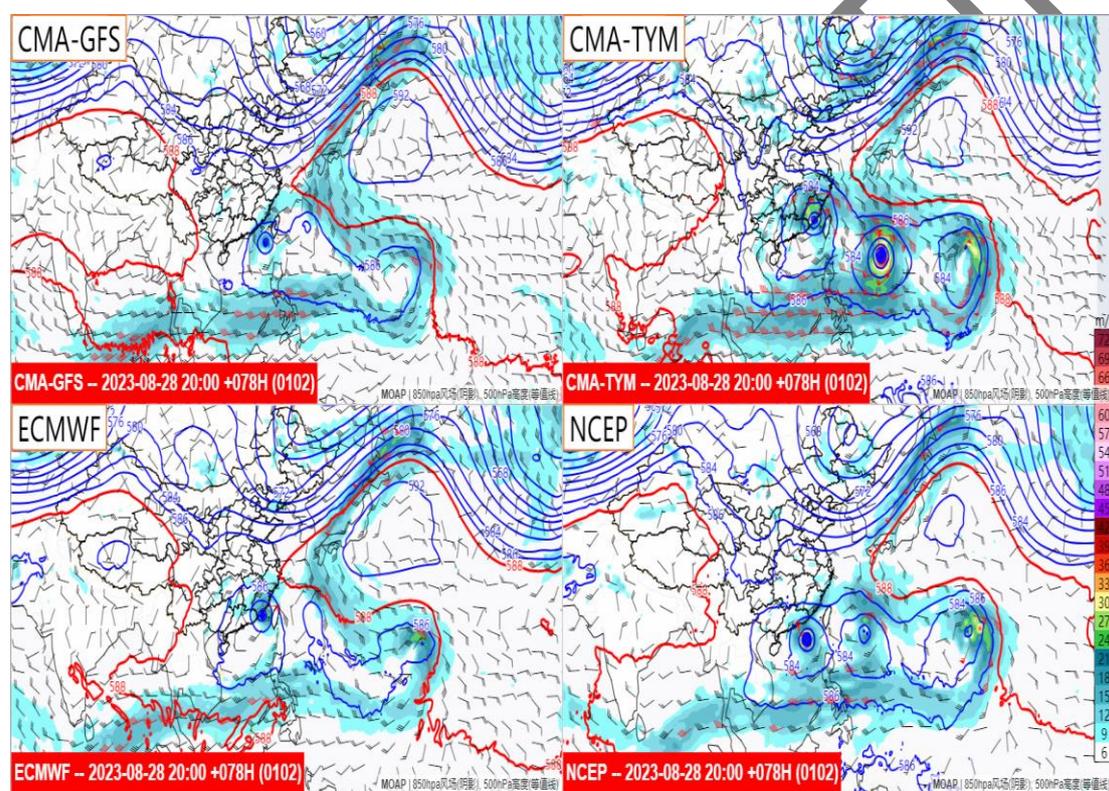


图 5 2023 年 8 月 29 日 20:00 模式确定性起报的 9 月 1 日 08:00 500 hPa 位势高度场（等值线，单位：dagpm）、850 hPa 风场（风羽）和风速（填色，单位： $m \cdot s^{-1}$ ）

Fig.5 Model deterministic forecast 500 hPa geopotential height field (contour, unit: dagpm) and 850 hPa wind field (barb) and wind speed (colored, unit: $m \cdot s^{-1}$) at 20:00 BT 29 August to 08:00 BT 1 September 2023

从模式集合预报表现来看（图略），CMA-GEPS 集合预报成员发散度明显偏低，且所有成员的路径预报都偏向实况路径的右侧，并未包含路径的所有可能性。分析其对流层高低层

形势场和流场（图略），CMA-GEPS 各集合成员对“海葵”强度的预报均明显偏弱，“海葵”在中低层副高西侧气流的引导下向西北方向移动，而未受到高层西偏南方向的气流引导，因此，路径预报普遍偏北。NCEP 集合预报有成员预报了西偏北登陆台湾岛东南沿海的路径，较为接近实况，但成员发散度大，虽然整体的集合平均路径预报误差相对较小，但在不同起报时刻的集合平均路径存在较大差异，稳定性差。ECMWF 在 8 月 29 日 20:00 起报的大多数成员预报路径相对实况明显偏北，但仍有成员预报了与实况较为接近的西偏北行，并在台湾岛东南沿海登陆的路径。此后，ECMWF 各集合成员向南调整和汇聚。至 9 月 1 日 20:00，集合预报成员对登陆台湾岛前的位置预报已经全部聚集至实况位置周围约 50 km 以内，此时集合成员平均误差小且不确定性小，预报质量较好。因此，ECMWF 集合预报虽然平均误差大，但稳定性相对较高，路径调整的跳跃性相对 NCEP 集合更小。

从 ECMWF 在 8 月 29 日 20:00 起报的对 9 月 3 日 20:00 的 500 hPa 位势高度场预报（图 6）可见，不同集合成员对西风槽、副高以及多涡旋的活动预报分歧较大。例如，控制预报为“海葵”将向北偏西方向移动，进入西风槽，而后折向黄海海域且强度减弱至热带低压；成员 16 预报“海葵”将向西北方向移动，在浙江附近沿海登陆，强度为热带风暴级；成员 35 预报“海葵”将向西偏北方向移动，在台湾岛东部沿海登陆，强度为台风级，最为接近实况；成员 12 预报“海葵”将向西偏南方向移动至菲律宾以东洋面，北侧为带状副高。“海葵”强度可达强台风级。由上可见，预报“海葵”强度越强的成员，预报其路径越偏南。Colby（2015）、Velden and Leslie（1991）对墨西哥湾热带风暴 Debby 移动路径的分析也发现，由于不同模式或集合成员对气旋强度的预报不同，使得引导气流厚度出现差异，从而导致对路径的预报也会有所不同。因此，模式预报中对于台风强度的预报与其路径预报的相关关系也是值得进一步研究的问题。

从图 7 中对上述 4 个集合成员的 200 hPa 和 850 hPa 流场分析及引导气流的计算结果中可以看到，各成员的低层流场对于“海葵”的引导都指向西偏北或西北方向，而高层流场对“海葵”的引导则指向西偏南或西南方向，也就是说，对“海葵”预报较强的成员，更容易受到高层气流的引导，从而导致其路径存在更大偏南方向的分量，反之，对“海葵”预报较弱的成员，则倾向于仅受到中底层引导气流的影响，从而出现更大的偏北移动分量。然而，目前的数值模式预报对台风强度的预报准确率仍远低于路径预报，因此，在实际预报中，考虑给予在集合预报中对强度的预报较为接近预报员综合预报强度的预报成员更高的权重，这能是提高路径预报准确率的有效途径之一，也是研究改进集合预报应用方法和订正技术的重要途径之一。

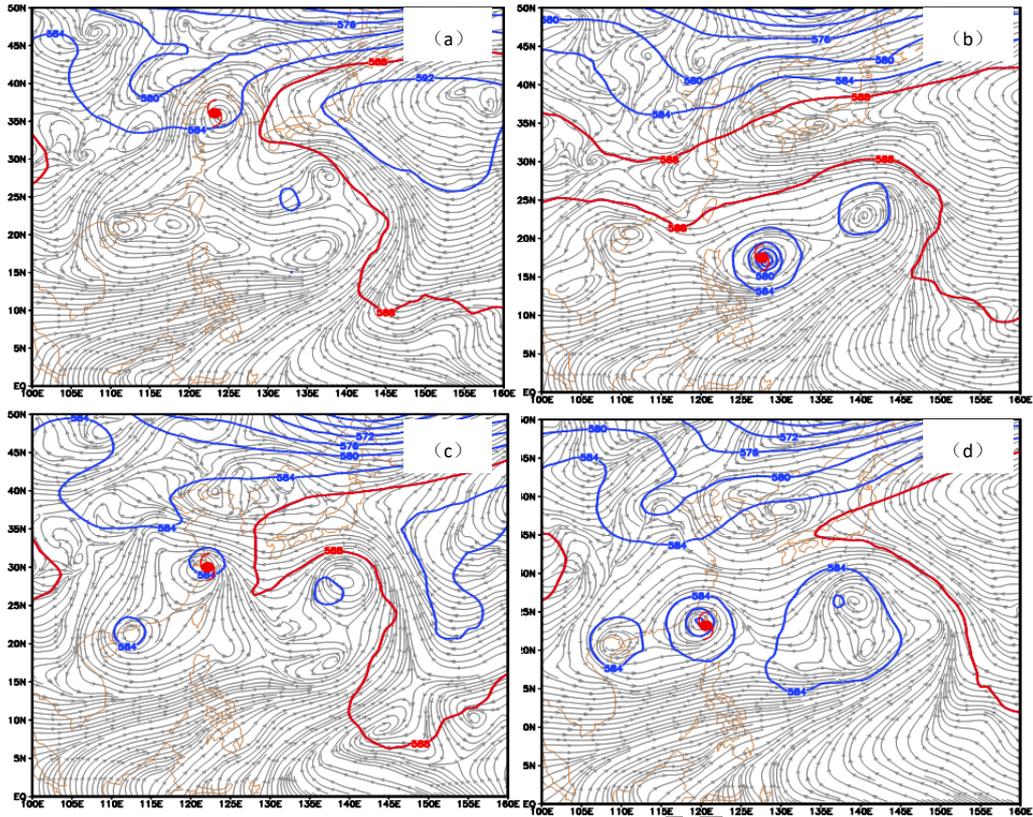
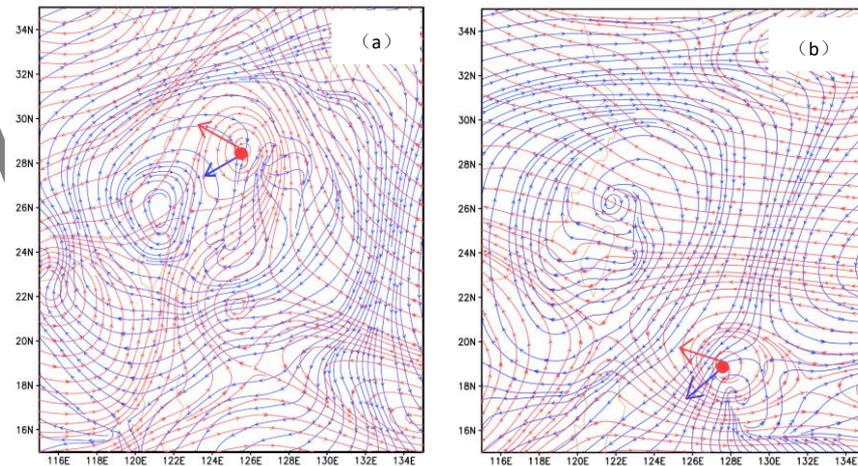


图 6 2023 年 8 月 29 日 20:00 ECMWF 集成员起报的 108 h 时效的 500 hPa 位势高度场(等值线, 单位: dagpm) 和 850 hPa 流场(流线)

(a) 控制成员, (b) 成员 16, (c) 成员 35, (d) 成员 12

Fig.6 500 hPa geopotential height field (contour, unit: dagpm) and 850 hPa wind stream field forecast for 108 h from 20:00 BT 29 August by ECMWF ensemble model (control member(a), member 16(b), member 35(c), member 12(d))



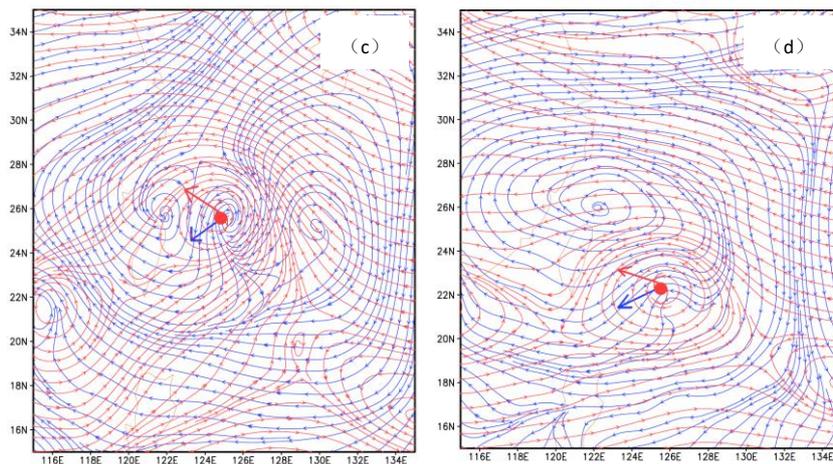


图 7 2023 年 8 月 29 日 20:00 ECMWF 集合预报成员起报 108 h 时效的 200 hPa 流场（蓝色流线）和引导气流（蓝色箭头），850 hPa 流场（红色流线）和引导气流（红色箭头）（a）控制成员，（b）成员 16，（c）成员 35，（d）成员 12 Fig.7 Same ensemble member order as Fig 6 but for 200 hPa(blue stream) and 850 hPa(red stream) wind stream field and steering flow(arrow) forecast for 108 h from 20:00 BT 29 August by ECMWF ensemble model

另外，张晓慧等（2019）通过敏感性试验发现，东侧台风的存在常使西侧北上台风移速减慢，移动方向更偏西，并且东测台风越强，纬度越高高于西测台风，则互旋作用越明显，使得西测台风路径更加偏西或偏南。

因此，从对上述集合成员的不同预报结果的分析来看，导致“海葵”的路径预报出现较大偏差的原因主要是不同成员在以下三个方面存在分歧：（1）集合成员对“海葵”东面的新生台风是否能够发展产生极大分歧，（2）集合成员对三个台风产生怎样的相互作用存在极大分歧，（3）对引导“海葵”移动的主要影响系统（副高、西风槽等）和影响“海葵”强度的主要影响系统的预报存在较大差异。

为进一步查找 ECMWF 集合成员对 500 hPa 形势场预报产生较大分歧和预报误差的原因，对高层流场的预报进行了对比。研究发现，对“海葵”的预报位置越偏北的集合成员，其预报的高层副热带西风急流越强，而对副高东侧的高空冷涡预报越弱（图略）。杨莲梅和张庆云（2007）研究表明，副热带西风急流的强弱反映了急流中心南北温差的大小，一般夏季的南北温差相对较小，急流较弱，位置较偏北。从集合成员的表现来看，也是较强急流带的位置相对较为偏北，相应的其南侧副高脊线的位置也较偏北，从而也有利于“海葵”向较为偏北的方向移动。高空冷涡位于副高东侧，从集合成员预报来看，其强度越强（弱），则位置越偏北（南），距离副热带西风急流轴的距离越近（远），副高的经向度越弱（强），“海葵”位置也越偏南（北）。

4.2 登陆台湾岛前快速加强原因分析

台风海葵在登陆台湾岛前的强度达到了超强台风级 ($52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)，三家官方机构对“海葵”在登陆台湾岛前的极值强度预报在 9 月 2 日之前均偏弱，在达到极值强度前大约 36 h 将预报强度调整至超强台风级。

三家官方机构中，中国的强度主观预报误差基本处于美国和日本之间。CMA-TYM 误差大于 NCEP，小于 CMA-GFS 和 ECMWF (图略)。区域模式 CMA-TYM 预报偏强，全球确定性模式预报均偏弱，随着预报时效的临近，对登陆前强度的预报逐渐调整增强。ECMWF 和 NCEP 的确定性和集合平均预报在 8 月 29 日 20:00 起报的极值强度约为 $20\sim 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；到 9 月 1 日 20:00，起报的极值强度调整到了 $52\sim 55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，与实况接近。可见，在“海葵”生成前期，数值模式对极值强度的预报普遍偏弱，且各国的官方预报也普遍未作出较为成功的强度预报订正。

从“海葵”登陆台湾岛前大约 60 h 的热力和动力条件来看，大多有利于其强度的增强。台风所经海域海面温度持续升高，达到约 $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 8a)，与 2014 年登陆海南前快速增强的超强台风“威马逊”相比，所经海域的海表温度更高(程正泉等, 2017)。距离台风中心 2.5 ° 半径平均的 300 hPa 温度和 500 hPa 相对湿度在此期间整体呈现升高趋势，但仍存在较大波动，特别是相对湿度在 1 日夜间至 2 日白天(对应“海葵”登陆台湾岛前强度变化不大的阶段)和 3 日夜间(对应于“海葵”在台湾岛西南沿海回旋打转和强度减弱阶段)均出现了较为明显的相对湿度减小的情况。而 2 日夜间至 3 日白天的相对湿度明显持续增加阶段对应了“海葵”在登陆台湾岛前的快速增强阶段(图 8b)。从 850 hPa 水汽通量(图 9c)上也可见，来自孟加拉湾的一支季风辐合带，为“海葵”提供了充足的水汽输送。从动力条件来看，在对流层上层 150 hPa 流场和风速场中，“海葵”上空的西北侧和南侧都存在明显的高空出流通道；而在“海葵”加强为超强台风级之前，中上层的垂直风切变持续减小(图略)。

从确定性模式和多数集合成员对影响“海葵”强度预报的热力和动力因子的预报来看，8 月 29 日前后至“海葵”登陆台湾岛前，不同模式对海面温度的预报差异不大，也都是接近实况的(图略)。从 8 月 29 日 20:00 不同集合成员起报的 9 月 3 日 08:00 的 850 hPa 水汽通量(图 9a, 9b)可见，预报“海葵”将北上的成员对水汽通量强度的预报偏弱，而预报向西偏北方向移动的成员对水汽通量强度的预报则较强，但与实况(图 9c)相比，都对位于南海中南部的西南季风水汽输送带的位置和强度有较好的表现。可见，模式对“海葵”活动期间的热力因子预报并未产生明显的误差，造成强度预报产生严重偏弱的重要原因之一

可能是对影响台风强度和移动位置的动力因子预报产生了较大的偏差,导致路径预报的方向出现了明显的偏北,且预报的移动速度也偏快,从而使得预报路径所经海域的海面温度相对台湾以东洋面明显偏低,且难以得到西南季风所带来的水汽供应。

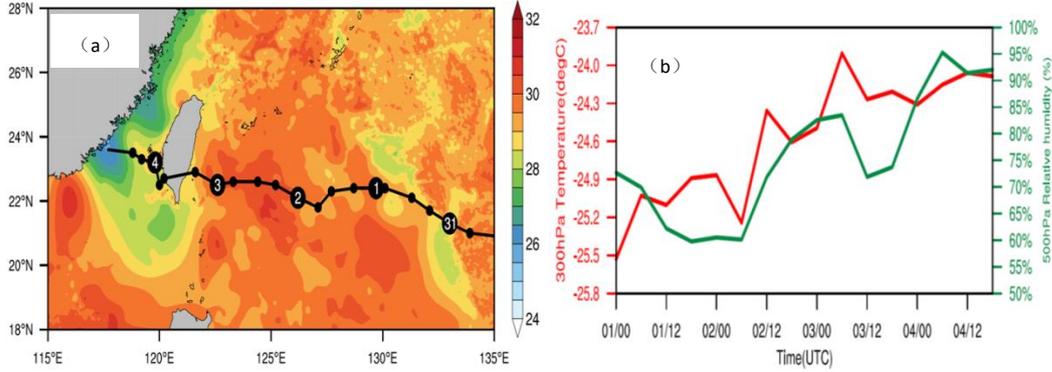


图 8 2023 年 (a) 8 月 29 日 20: 00 海面温度 (填色) 和“海葵”实况路径, (b) 9 月 1—4 日距离“海葵”中心 2.5° 半径平均的中层 300 hPa 温度 (红线) 和 500 hPa 相对湿度 (绿线)

Fig. 8 (a) SST and the track of Haikui at 20:00 BT on August 29, (b) the average mid-level temperature of 300 hPa (red line) and 500 hPa relative humidity (green line) from the center of Haikui from 1 to 4 September

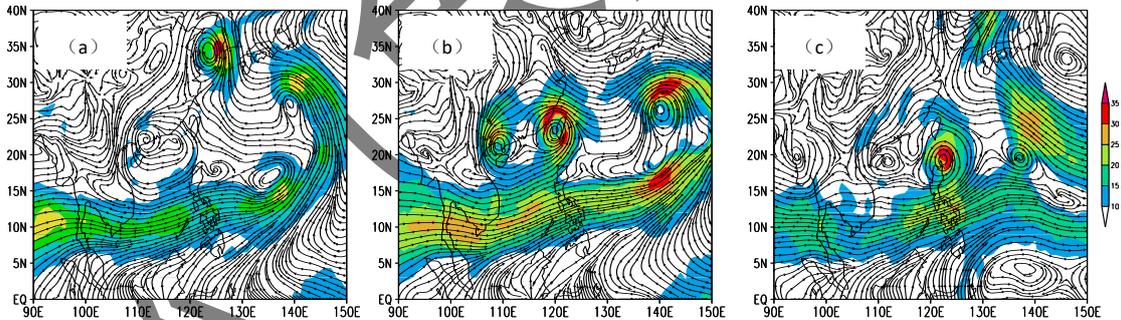


图 9 2023 年 (a, b) 8 月 29 日 20: 00 不同集合成员起报的 9 月 3 日 08:00 850 hPa 水汽通量预报和 (c) 9 月 3 日 08: 00 水汽通量 ERA5 再分析场 (单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 9 The 850 hPa water vapor flux forecast (a, b) of different ensemble members from 20:00 BT 29 August to 08:00 BT 3 September and the ERA5 reanalysis water vapor flux field (c) at 08:00 BT 3 September (unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

4.3 台湾海峡打转原因分析

台风海葵穿过台湾岛南部沿海后进入台湾海峡,在台湾岛西南沿海长时间打转,造成 9 月 5—7 日福建东部、台湾东部和南部出现极端强降水。根据龚月婷等(2018)统计,台风过台

湾岛的平均耗时约为 5 h，过台湾海峡的平均耗时约为 9 h，若台风中心穿过台湾岛及台湾海峡的时间超过 15 h，可认为其在该区域移动缓慢。2016 年第 1 号台风尼伯特在登陆台湾台东后进入台湾海峡，耗时 32 h 后在福建石狮登陆。台风海葵在登陆台湾台东后同样进入台湾海峡，耗时长达 39 h 后在福建东山登陆，超过历史统计耗时最长台风尼伯特。郭弘等(2019)分析“尼伯特”缓慢移动的主要原因包括其移入鞍型场中后引导气流弱，以及登陆台湾岛后受地形影响结构松散且难以重组等。在“海葵”缓慢移动期间，也处于东侧海上副高和大陆高压间的鞍型场中，引导气流弱，且过台湾岛后的台风结构也是极为松散的，这些是与“尼伯特”情形相似导致其移动缓慢的重要因子（图略）。此外，“海葵”在通过台湾岛之前，在台湾岛西南沿岸海域存在背风低涡，导致“海葵”高层环流先过岛，并与原先低层的背风低压结合，低层环流中心过岛后路径的回旋是过岛过程中台风结构重新整合的结果（图 10）。而模式预报和主观订正都未对“海葵”的这一过程有较为准确的预报，导致对过岛后回旋打转时间估计不足。在“海葵”登陆浙闽交界处之前约 30 h，主观和模式预报都对登陆位置和强度调整到比较接近实况，但对登陆福建的时间预报仍略偏早。从数值模式预报检验来看，对“海葵”过岛后缓慢移动持续时间的低估是造成这一时段路径移速预报偏快，从而产生较大误差的主要原因。“海葵”在靠近及穿过台湾岛期间的降水主要在台湾岛东部和南部。在穿过台湾海峡过程中，降水出现在台湾岛和福建沿海，对“海葵”缓慢移动持续时间的低估也造成了对这一阶段暴雨出现时间、落区及强度的预报偏差。

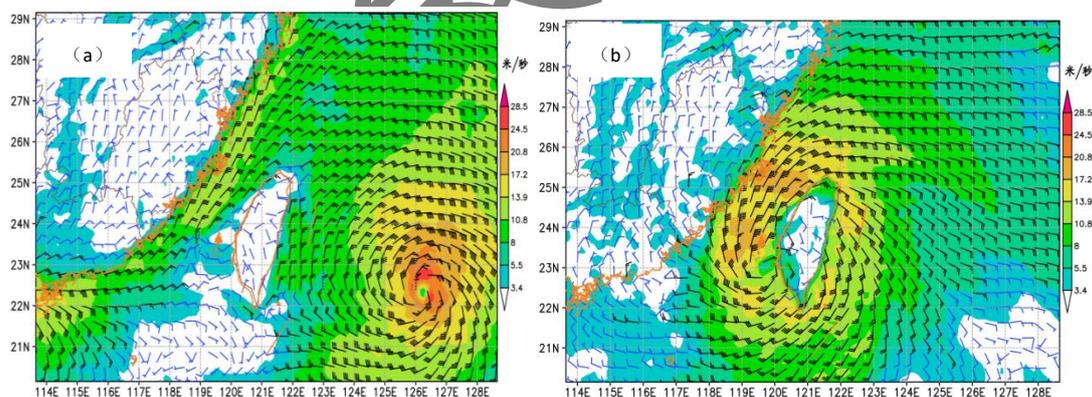


图 10 2023 年 9 月 (a) 2 日 08: 00 和 (b) 4 日 08: 00 10 m 风场 (填色和风羽)
 Fig. 10 10 m wind field (colored and barb) at (a) 08:00 BT 2 September and (b) 08:00 BT 4 September 2023

4.4 减弱后残涡影响及业务规范

台风海葵于 9 月 5 日在福建东山登陆后，强度快速减弱为热带低压，中心附近最大风力

减弱为 6~7 级，中央气象台对其停止编号。随后风力继续减小，但减弱后的残余环流仍长时间维持，至 11 日早晨，仍可在卫星云图中观测到残涡中心南侧有较强的对流活动（图 11a）。该残涡的活动给广东、广西、香港等地带来了长时间的强降水过程，其中，香港录得最大 1 h 降水量突破有记录以来最高纪录。

采用地面观测风场资料，并参考 ERA5 资料的 925 hPa 风场对该残涡的环流中心进行定位后，可得到 9 月 7—11 日“海葵”残余环流路径（图 11b）。台风残余环流长时间维持并造成严重降水影响的原因较为复杂。根据陈联寿和许映龙（2017）研究，当季风涌并入台风或其残涡环流时，将为台风提供大量水汽输送，使台风维持时间长，降水显著增强，雨区扩大。2006 年台风碧利斯由台湾海峡北部海域进入福建后，其残余环流向西偏南转西南方向移动，进入福建、广东、广西、云南境内，受其与并入的季风涌系统共同影响，给所经地区带来了严重的降水影响。从“海葵”登陆时 850 hPa 水汽通量（图 12）可见，也有较强的季风涌携带大量水汽从西南方向进入台风外围环流，这是导致其残余环流长时间维持和发生强降水过程的主要原因。

为了更好地把握台风减弱后残余环流的移动方向和维持时间，从而为其所带来的风雨影响预报提供依据，未来有必要在业务上建立相应的规范或标准，也有利于进一步就该科学问题开展研究工作。

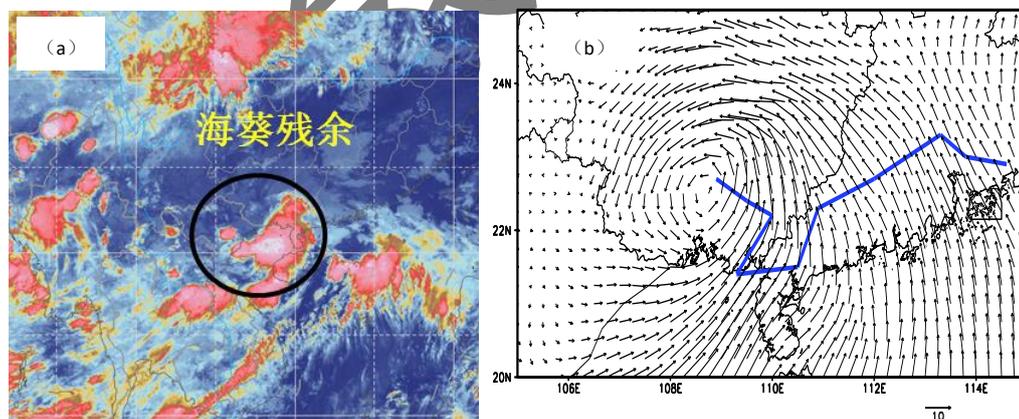


图 11 2023 年 9 月 (a) 11 日 08: 00 风云 4A 卫星云图，(b) 7—11 日“海葵”停止编号后残余环流的移动路径（蓝色线）和风场（风矢）

Fig. 11 (a) FY4A satellite cloud image at 08:00 BT 11 and (b) the track (blue line) of Haikui residual circulation and wind field (wind vector) during 7–11 September 2023

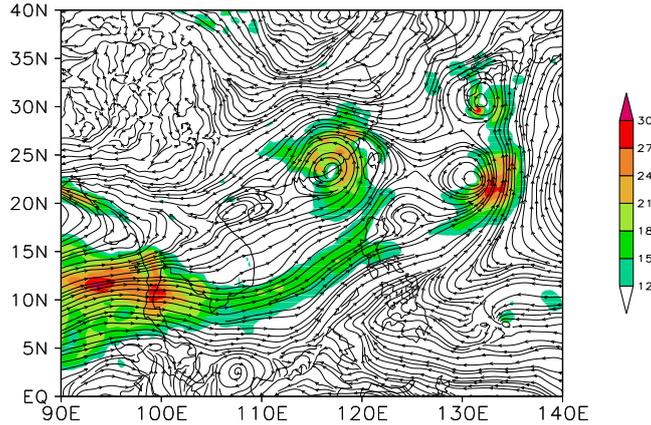


图 12 2023 年 9 月 5 日台风海葵 850 hPa 水汽通量场（填色，单位： $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ）
和 wind 场（流线）

Fig.12 850 hPa water vapor flux field (colored, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind stream field
of Haikui 5 September

5 结论

应用中国、日本、美国官方综合预报和多家模式预报资料对 2023 年第 11 号台风海葵的主要特点和预报难点进行了分析和研究。“海葵”的主要特点是：移动缓慢、登陆台湾岛前达到超强台风级、存在多涡旋共存活动现象、登陆后残余环流长时间维持，这些特点导致受影响地区的过程累计降水量大，降水持续时间长，灾害损失严重。本文通过分析“海葵”活动过程中主观和数值模式的预报偏差得出以下主要预报难点：

(1) 数值模式对台风北侧的带状副高及其南侧的季风辐合带内多涡旋活动的预报性能尚存在较大的预报误差，集合预报成员发散度较大，存在较大不确定性，给主观综合预报带来极大挑战，找到对该类型背景场的模式预报订正方法是关键问题之一。

(2) 由于前期数值模式对“海葵”的强度预报偏弱，导致其主要受中下层引导气流的影响，路径预报普遍明显较实况偏北，主、客观预报产品均产生较大误差。主观预报中较长时效的北上路径预报，反过来导致强度预报因北方海域海温较低而偏弱更加明显。直到登陆台湾岛前约 48 h 才调整为偏西行路径，且将强度预报调整到超强台风级。由此可见，台风的强度预报困难是与其路径预报的分歧和不确定性密切相关的，两者的不确定性会导致台风登陆点和登陆强度的预报存在较大误差。因此，两者关键预报因子的确定和相关性仍是预报难点之一。

(3) “海葵”登陆后，虽然强度快速减弱，大风影响趋于结束，但由于季风涌并入台风减弱后的残涡系统，导致该残余环流长时间维持并严重影响降水预报。对台风残涡维持时间、

移动路径及其降水影响开展定量研究和模式订正也是重要的难点。

参考文献:

- 陈联寿, 许映龙, 2017. 中国台风特大暴雨综述[J]. 气象与环境科学, 40(1): 3-10. Chen L S, Xu Y L, 2017. Review of typhoon very heavy rainfall in China[J]. Meteor Environ Sci, 40(1): 3-10 (in Chinese).
- 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).
- 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).
- 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, 2023. 台风快速增强爆发前后的背景环流和热力动力条件的演变[J]. 气象学报, 81(5): 702-716. Gao S Z, Lü X Y, 2023. Evolution of environmental circulation and dynamic and thermodynamic conditions before and after the onset of typhoon rapid intensification. Acta Meteor Sin, 81(5): 702-716 (in Chinese).
- 龚月婷, 李英, 高迎新, 等, 2018. 台风“莫拉克”(0908)过台湾岛缓慢西行成因分析[J]. 大气科学, 42(6): 1208-1218. Gong Y T, Li Y, Gao Y X, et al, 2018. Mechanism analysis for slow westward movement of Typhoon Morakot (0908) across the islands of Taiwan[J]. Chin J Atmos Sci, 42(6): 1208-1218 (in Chinese).
- 郭弘, 林小红, 刘爱鸣, 2019. “尼伯特”台风过台湾岛及台湾海峡耗时长长的原因分析[J]. 海峡科学, 155(11): 9-13. Guo H, Lin X H, Liu A M, 2019. The reason for the prolonged duration of Typhoon Nepartak over Taiwan Island and the Taiwan Strait[J]. Strait Sci, 155(11): 9-13 (in Chinese).
- 李英, 陈联寿, 王继志, 2005. 热带气旋登陆维持和迅速消亡的诊断研究[J]. 大气科学, 29(3): 482-490. Li Y, Chen L S, Wang J Z, 2005. Diagnostic study of the sustaining and decaying of tropical cyclones after landfall[J]. Chin J Atmos Sci, 29(3): 482-490 (in Chinese).
- 刘达, 向纯怡, 张玲, 等, 2023. 台风“杜苏芮”(2305)的主要特点及路径和强度预报难点分析[J]. 海洋气象学报, 43(4): 1-10. Liu D, Xiang C Y, Zhang L, et al, 2023. Analysis on main characteristics of Typhoon Doksuri (2305) and difficulties in its track and intensity forecast[J]. J Mar Meteor, 43(4): 1-10 (in Chinese).
- 刘涛, 端义宏, 冯佳宁, 等, 2021. 台风利奇马(1909)双眼墙特征及长时间维持机制[J]. 应用

-
- 气象学报, 32(3): 289-301. Liu T, Duan Y H, Feng J N, et al, 2021. Characteristics and mechanisms of long-lived concentric eyewalls in Typhoon Lekima in 2019[J]. *J Appl Meteor Sci*, 32(3): 289-301 (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).
- 钱奇峰, 董林, 许映龙, 等, 2023. 2022年西北太平洋和南海台风活动特征和预报难点分析[J]. *气象*, 49(10): 1254-1266. Qian Q F, Dong L, Xu Y L, et al, 2023. Analysis on the characteristics and forecast difficulties of the typhoons over the Northwest Pacific and the South China Sea in 2022[J]. *Meteor Mon*, 49(10): 1254-1266 (in Chinese).
- 王海平, 2023. 高空冷涡对台风烟花(2106)路径的影响[J]. *应用气象学报*, 34(5): 586-597. Wang H P, 2023. Impacts of upper tropospheric cold low on the track of Typhoon In-fa in 2021[J]. *J Appl Meteor Sci*, 34(5): 586-597 (in Chinese).
- 王海平, 董林, 许映龙, 等, 2022. 台风“烟花”的主要特点和路径预报难点分析[J]. *海洋气象学报*, 42(1): 83-91. Wang H P, Dong L, Xu Y L, et al, 2022. Analysis on main characteristics of Typhoon In-fa and difficulties in its track forecast[J]. *J Mar Meteor*, 42(1): 83-91 (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 Meteor*, 43(1): 52-62 (in Chinese).
- 向纯怡, 许映龙, 高拴柱, 等, 2022. 2021年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. *气象*, 48(9): 1195-1208. Xiang C Y, Xu Y L, Gao S Z, et al, 2022. Analysis of the characteristics and forecast difficulties of typhoon over the western North Pacific in 2021[J]. *Meteor Mon*, 48(9): 1195-1208 (in Chinese).
- 杨莲梅, 张庆云, 2007. 夏季东亚西风急流扰动异常与副热带高压关系研究[J]. *应用气象学报*, 18(4): 452-459. Yang L M, Zhang Q Y, 2007. Relationships between perturbation kinetic energy anomaly along East Asian westerly jet and subtropical high in summer[J]. *J Appl Meteor Sci*, 18(4): 452-459 (in Chinese).
- 张晓慧, 张立凤, 周海申, 等, 2019. 双台风相互作用及其影响[J]. *应用气象学报*, 30(4): 456-466. Zhang X H, Zhang L F, Zhou H S, et al, 2019. Interaction and influence of binary Typhoons[J]. *J Appl Meteor Sci*, 30(4): 456-466 (in Chinese).
- 周冠博, 柳龙生, 董林, 等, 2022. 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, 2022. The analysis of characteristics and forecast difficulties of TCS in western North Pacific in 2020[J]. *Meteor Mon*, 48(4): 504-515 (in Chinese).
- Bauer P, Thorpe A, Brunet G, 2015. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. *Nature*, 525(7567): 47-55.

-
- Chase R J, Harrison D R, Lackmann G M, et al, 2023. A machine learning tutorial for operational meteorology. Part II: neural networks and deep learning[J]. *Wea Forecasting*, 38(8): 1271-1293.
- Colby Jr F P, 2015. Global ensemble forecast tracks for tropical storm Debby[J]. *Wea Forecasting*, 30(3): 668-682.
- Jones E A, Wang X G, 2023. A multiresolution ensemble hybrid 4DEnVar with variable ensemble sizes to improve global and tropical cyclone track numerical prediction[J]. *Mon Wea Rev*, 151(5): 1145-1166.
- Kay J, Wang X G, 2020. A multiresolution ensemble hybrid 4DEnVar for global numerical prediction[J]. *Mon Wea Rev*, 148(2): 825-847.
- 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.
- 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.