

吴胜蓝,漆梁波.基于CMA-REPS的台风“梅花”(2212)路径预报偏差成因分析[J].海洋气象学报,2025,45(1):23-33.  
WU Shenglan, QI Liangbo. Analysis on track forecast deviation in Typhoon Muifa (2212) based on CMA-REPS[J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(1): 23-33. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240701001. (in Chinese)

## 基于CMA-REPS的台风“梅花”(2212)路径预报偏差成因分析

吴胜蓝,漆梁波

(上海中心气象台,上海 200030)

**摘要** 2022年第12号台风“梅花”环流形势复杂,集合路径发散度大,模式各时次预报调整较大,路径预报难度高。利用中国气象局区域集合预报系统(China Meteorological Administration-Regional Ensemble Prediction System, CMA-REPS),对比分析台风“梅花”路径预报偏差较小成员(偏东组)和偏差较大成员(偏西组)的环境流场和台风环流特征。结果显示,偏东组对应副热带高压(以下简称“副高”)位置偏南,与南侧高压合并,偏南引导气流更有利于台风向北移动,路径偏东。副高形态和位置也是不同预报时次起报的集合平均路径摇摆调整的主要原因。另外,偏东组成员对应台风尺度更大,台风本身及周围环流由于 $\beta$ 效应的作用会趋使路径向偏北方向移动。陆地低涡对台风路径的影响较为复杂,低涡系统靠近台风发展有利于“梅花”西移,对台风系统有“吸引”作用,而低涡远离台风是不利于台风向西偏移的,由于距离较远对台风路径没有太多影响。但台风尺度和切断低涡对“梅花”路径的贡献作用是相对偏小的,在实际业务预报中需注意不过分高估高空槽或低涡系统对台风路径的吸引作用。

**关键词** CMA-REPS; 台风“梅花”; 路径预报偏差

**中图分类号**: P456, P457.5 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-3599(2025)01-0023-11

**DOI**: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240701001

### Analysis on track forecast deviation in Typhoon Muifa (2212) based on CMA-REPS

WU Shenglan, QI Liangbo

(Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030, China)

**Abstract** The operational track forecast of Typhoon Muifa (2212) is quite difficult due to the complex circulation, the large dispersion of the ensemble forecast and multiple adjustments of numerical models at different initial times. Based on the CMA-REPS (China Meteorological Administration-Regional Ensemble Prediction System), this paper compares the environmental flow fields and circulation characteristics of the members with small mean track forecast errors verified against the best track (the easterly group) and the members with large mean track errors (the westerly group). It is found that the easterly group corresponds to a southerly subtropical high, which is prone to merging with the high pressure in the southern part. The southerly steering flow is more conducive to the northward and eastward movement of the typhoon. The pattern and position of the subtropical high are also the main reason for the adjustment

收稿日期: 2024-07-01; 修回日期: 2024-10-15

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(19dz1200102); 中国气象局青年创新团队项目(CMA2024QN02)

第一作者简介: 吴胜蓝, 女, 博士, 高级工程师, 主要从事天气预报及相关技术研究, wusl\_nju@outlook.com。

通信作者简介: 漆梁波, 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事天气预报及相关技术研究, qlb1999@hotmail.com。

of the ensemble forecast at different initial times. In addition, the easterly group has larger typhoon size than the westerly group, and the typhoon and its surrounding circulations also contribute to the northward motion as a result of the  $\beta$ -effect propagation. The land vortex has much more complex impact on the typhoon track. The development of the vortex close to the typhoon is beneficial for the westward movement of Muifa and has an “attractive” effect on the typhoon, while the development of the vortex far away from the typhoon is not conducive to the westward movement of the typhoon and has little impact on the track. The contribution of typhoon size and cut-off vortex to the track forecast is relatively small compared with the subtropical high. In operational forecasts, it is important not to overestimate the attraction of high-level troughs or vortices to the typhoon track.

**Keywords** CMA-REPS (China Meteorological Administration-Regional Ensemble Prediction System); Typhoon Muifa; track forecast deviation

## 引言

近海台风路径预报的偏差直接影响风雨预报的精度,因此近海台风路径业务预报的精准性是减轻灾害的关键。环境场引导气流、台风环流的非对称结构和非对称对流系统被认为是影响热带气旋移动路径的3个关键因子<sup>[1]</sup>。引导气流通常指影响热带气旋移动的大尺度环境气流<sup>[2]</sup>,早期台风路径预报研究认为台风主要朝着涡度正变化最大的区域移动,且有学者提出台风移动的方向可以由绝对涡度平流近似估计<sup>[2-3]</sup>。台风能量频散在东南侧形成的反气旋高值系统也会产生引导气流,在这个反气旋高值系统环境场气流的引导下,台风具有偏北方向移动的分量。台风环流的非对称结构也是影响其路径的重要因子,地球自转偏向力随纬度的变化,即 $\beta$ 效应引起的涡旋环流之间存在的通风流会影响涡旋移动。此外,局域热源和地形也可能导致环流非对称结构的形成<sup>[4]</sup>。非对称对流系统在卫星云图上表现为中尺度对流系统,陈联寿等<sup>[5]</sup>通过数值模拟揭示台风周围非对称对流系统会显著影响台风的移动,台风有向内部对流不稳定区域移动的趋势。王新伟等<sup>[6]</sup>也指出台风的热力不对称结构会直接影响台风的移动,倾向发展最旺盛的积雨云团的边缘移动。上述3个台风移动的关键影响因子,为台风路径业务预报提供了理论认识。

随着数值模式的不断发展和预报能力的提高,热带气旋路径预报发展到现在很大程度上依靠数值模式预报,成为天气预报业务的核心支撑<sup>[7]</sup>。近年来,集合预报的业务应用受到重视<sup>[8]</sup>,在台风领域也日益广泛<sup>[9-11]</sup>。尤其是在台风路径方面,王晨稀<sup>[12]</sup>提出台风路径集成预报技术是在现行模式、计算机资源条

件下能获得最优预报效果的有效方法。其中,集合预报敏感性分析方法可以通过各集合成员对初始场扰动的影响,以此分析显著影响预报的敏感区域和可预报性<sup>[13]</sup>,该方法最早由Hakim等<sup>[14]</sup>提出,最近许多研究使用集合敏感性方法深入分析可预报性和不确定性,诊断各极端事件的关键影响因子。如Qian等<sup>[15]</sup>通过集合敏感性方法分析了超强台风“鲛鱼”路径北翘的成因,提出路径转向角度与500 hPa高度场存在密切联系。王毅等<sup>[16]</sup>也利用该方法指出降水对于天气系统的敏感性,认为暴雨天气对高原涡更为敏感。何斌等<sup>[17]</sup>同样使用集合敏感性方法对台风“天鹅”远距离暴雨的不确定性进行研究,揭示高空槽的东移和加深对暴雨量级的显著影响。

2022年第12号台风“梅花”三次登陆华东区域,登陆强度强,风雨影响范围大,持续时间长。路径主观预报较客观预报有明显的预报正技巧,但“梅花”受多低压系统相互作用和复杂环境场影响,9月11日20时—13日20时(北京时,下同)各集合预报模式多次发生摇摆和路径预报调整,直接影响华东区域及上海地区的风雨预报精度。文中基于中国气象局区域集合预报系统(China Meteorological Administration-Regional Ensemble Prediction System, CMA-REPS),通过分析“梅花”的路径预报偏差,重点关注环境流场和台风环流的检验,研究影响集合预报台风路径的关键影响因子,继续加强对数值预报的订正技术分析,为数值模式的业务应用积累经验,持续提升台风业务预报服务水平。

## 1 资料和方法

(1) CMA 热带气旋最佳路径数据集,时间间隔为6 h,登陆台风在登陆前24 h及在我国陆地活动

期间,最佳路径时间频次加密为 3 h 一次 (<https://tcdata.typhoon.org.cn>)<sup>[18-19]</sup>。

(2) 欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) ERA5 资料,时间分辨率为 1 h,水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,共 37 层。

(3) 模式预报资料主要来自 CMA-REPS 的数值预报产品,由 14 个扰动预报和 1 个控制预报组成,水平分辨率为 10 km,共 17 层。提供 84 h 的预报时段,每天 08 时和 20 时两次起报。

(4) 其他模式预报资料包括日本气象厅全球集合预报系统 (Japan Meteorological Agency-Global Ensemble Prediction System, JMA-GEPS)、欧洲中期天气预报中心集合预报系统 (ECMWF-Ensemble Prediction System, ECMWF-EPS)、美国国家环境预报中心全球集合预报系统 (National Centers for Environmental Prediction-Global Ensemble Forecast System, NCEP-GEFS)、加拿大气象局集合预报系统 (Meteorological Service of Canada ENsemble System, MSC-CENS)、英国气象局集合预报系统 (United Kingdom Met Office-Ensemble Prediction System, UKMO-EPS)、上海台风研究所台风集合同化预报系统 (Shanghai Typhoon Institute-Typhoon Ensemble Data Assimilation and Prediction System, STI-TEDAPS) 以及中国气象局全球集合预报系统 (CMA-Global Ensemble Prediction System, CMA-GEPS)、全球同化预报系统 (CMA-Global Forecast System, CMA-GFS)、区域台风数值预报系统 (CMA-Regional Mesoscale Typhoon Numerical Prediction System, 简记为“CMA-TYM”)。

CMA-REPS 集合预报模式中台风中心是通过 850 hPa 高度场的位势最低值进行定位的<sup>[20]</sup>,经过与官方发布路径进行详细比对,集合平均以及集合成员路径均与发布路径接近一致,验证了结果的可靠性(图略)。

集合敏感性分析方法可以从大气动力学角度深入分析显著影响预报的敏感区域和预报不确定性的具体原因<sup>[13-15,17]</sup>。针对  $M$  个集合成员的集合预报,集合预报量  $J$  对于某状态变量  $x$  的敏感性  $S$  计算公式如下。

$$S = \frac{\text{cov}(J_M, x_{iM})}{\sqrt{\text{var}(x_{iM})}} \quad (1)$$

其中: $J_M$  和  $x_{iM}$  分别是预报量  $J$  的  $1 \times M$  集合向量值

和第  $i$  个分析场变量; $\text{cov}$  代表两个参数之间的协方差, $\text{var}$  是变量的方差。经过对集合预报量进行标准化处理后的敏感度,即预报量  $J$  和  $x_i$  的相关系数  $C_c$ 。计算公式如下。

$$C_c = \frac{\text{cov}(J_M, x_{iM})}{\sqrt{\text{var}(x_{iM})} \sqrt{\text{var}(J_M)}} \quad (2)$$

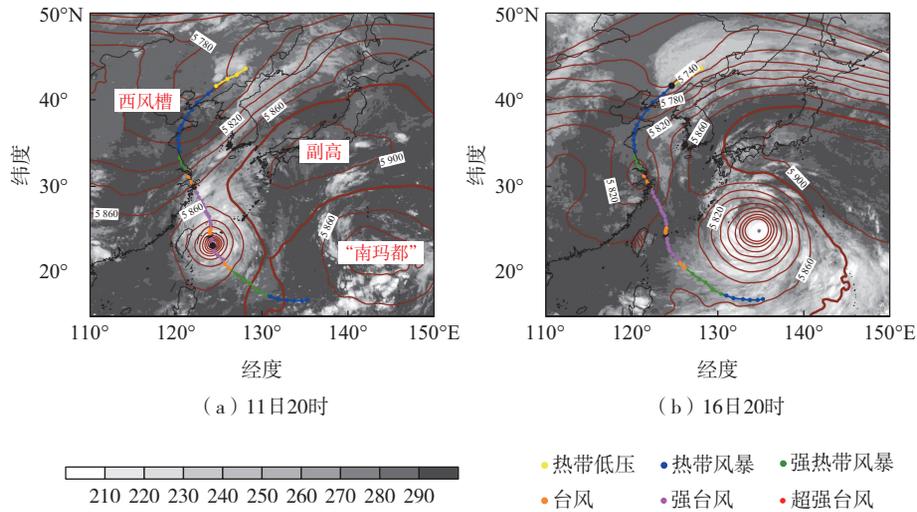
下文的集合敏感性将采用相关系数进行分析。

## 2 台风“梅花”路径概况

2022 年第 12 号台风“梅花”于 9 月 8 日 08 时在西北太平洋洋面上生成,12 日半夜进入东海,进入东海海域后长时间维持强台风强度,14 日 20:30 以强台风级 (14 级,  $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 在我国浙江舟山普陀区沈家门登陆,然后穿过舟山本岛进入杭州湾,15 日 00:30 在上海奉贤沿海再次登陆 (12 级,  $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 台风级),尔后进入黄海,16 日 00 时在山东青岛崂山第三次登陆 (9 级,  $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 热带风暴级),之后穿过渤海海峡,16 日 12:40 在辽宁大连金普新区第四次登陆 (9 级,  $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 热带风暴级)。16 日 20 时与冷空气结合变性为温带气旋,中央气象台对其停止编号 (图 1)。

“梅花”生成后,大气环流异常复杂,台风“苗柏”和“南玛都”先后生成。“梅花”生成后西北行,到台湾东部洋面后,在台湾以东的滞留时间成为预报一大难点,副热带高压 (以下简称“副高”) 和大陆高压的强度及合并与否成为主要影响因素;进入东海后受陆地低涡的影响,多低压相互作用和环境场条件增加了“梅花”路径预报的不确定性和难度 (图 1a)<sup>[21]</sup>。

以 11 日 20 时起报的集合预报平均路径为例,各模式间的预报分歧较大 (图 2a), ECMWF-EPS 集合平均预报“梅花”将登陆浙江,而 NCEP-GEFS 集合平均则预报台风几乎不登陆或者在江苏登陆,登陆不确定性较大。集合预报发散度也很大 (图 2b), 11 日 20 时起报的 CMA-GEPS 大多数成员预报“梅花”是不登陆的, CMA-REPS 成员预报路径大幅偏西。而 12 日 20 时起报的所有数值模式均出现明显西折调整, 登陆浙江后深入内陆 (图 2c、d), 与此时“梅花”东侧热带系统 (即“南玛都”前身) 发展有紧密联系 (图 1a), 但新时次的路径向西调整对比 CMA 最佳路径是一次不成功的调整 (图 2)。在面临各时次预报调整较大、集合发散度大的情形下,主观路径预报比较困难。



等值线—500 hPa位势高度，单位为gpm；色阶—红外云图亮温，单位为K；  
 黑色圆点—当前时次台风中心位置。

图1 2212号台风“梅花”路径图  
 Fig.1 Track of Typhoon Muifa (2212)

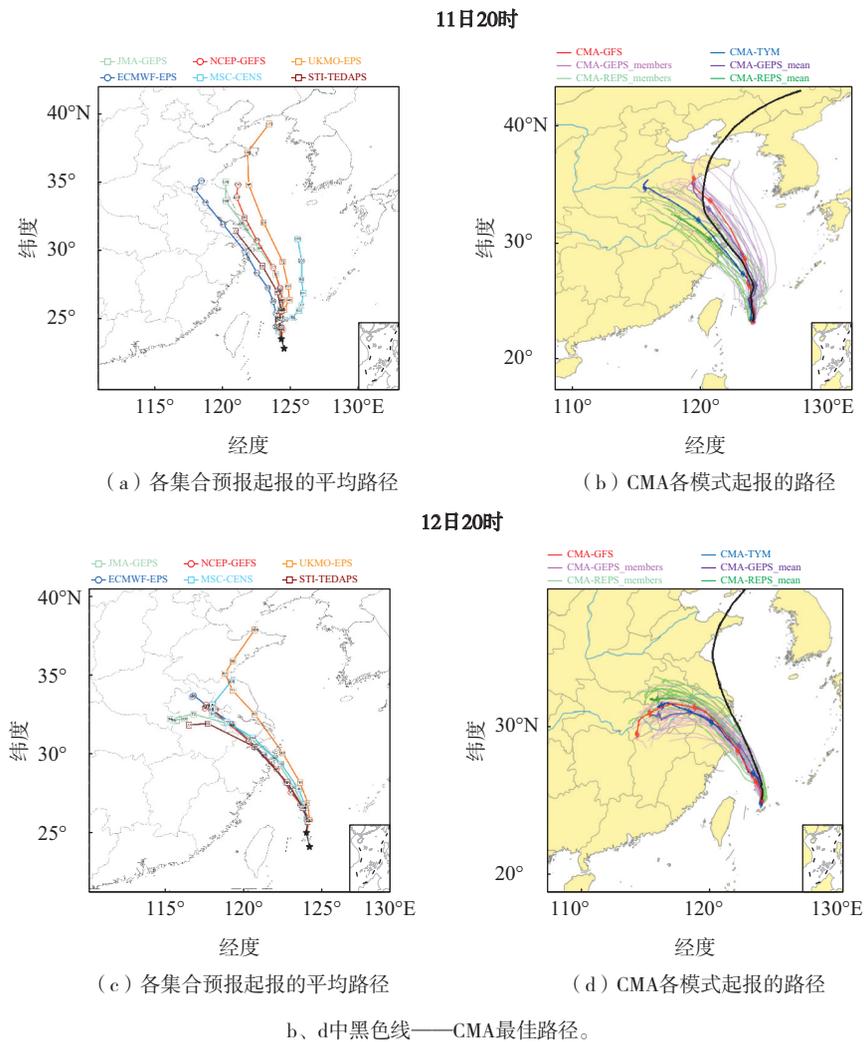


图2 各集合预报平均和CMA各模式起报的路径

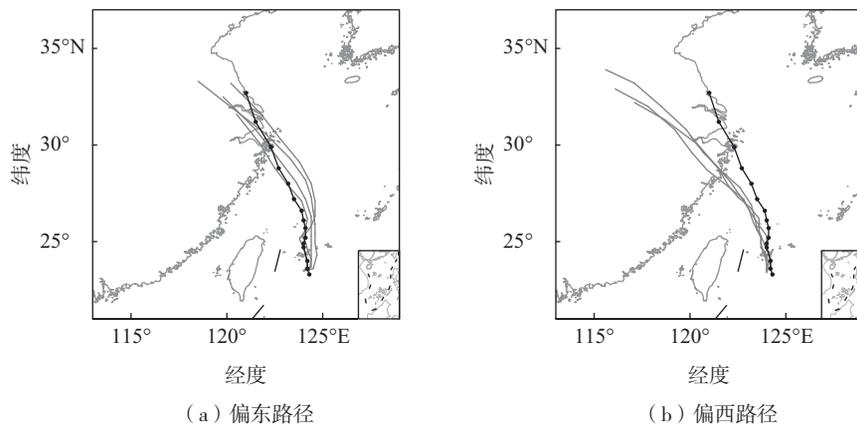
Fig.2 Averaged track forecasts by ensemble models and track forecasts by CMA models

### 3 “梅花”路径预报偏差的可能成因

#### 3.1 环境场特征对比

为了具体分析造成台风“梅花”路径偏差的环流形势演变特征,将 11 日 20 时起报的 CMA-REPS 集合预报路径分为偏东组(图 3a)和偏西组(图 3b),分别

包括对“梅花”路径预报误差较小和路径明显偏西的 4 个成员。集合成员大部分预报路径偏西,深入内地,只有 4 个成员与实况较为接近,移向为北偏西方向,登陆地点偏东在浙江舟山和上海奉贤一带(图 3a)。通过对偏东组和偏西组的环境场特征进行对比,分析“梅花”路径预报偏差的可能原因。



黑色线—CMA最佳路径;灰色线—偏东和偏西路径。

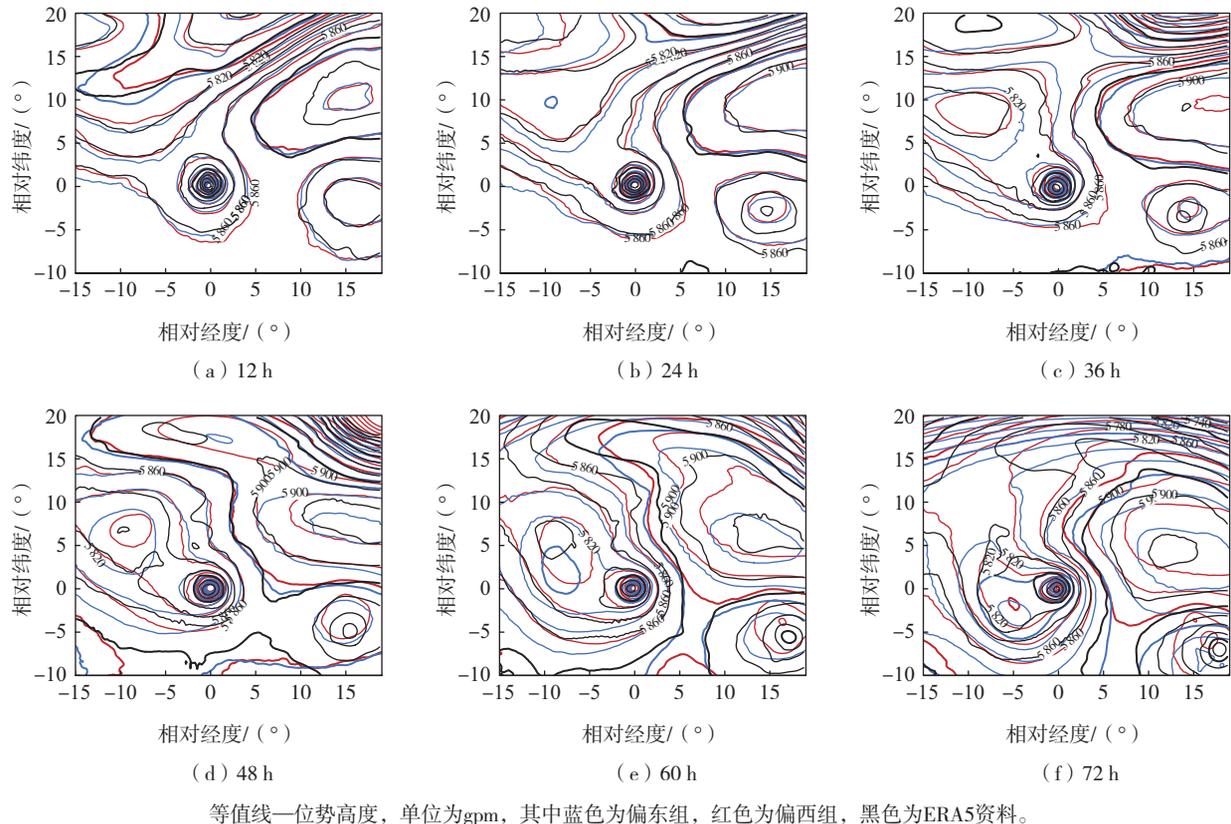
图 3 CMA-REPS 集合预报在 11 日 20 时起报的 4 条偏东路径和偏西路径以及 CMA 最佳路径  
Fig.3 Track forecasts by 4 easterly and 4 westerly members from CMA-REPS ensemble forecast initialized at 20:00 BJT 11 September 2022, and the observed best track by CMA

图 4 为偏东组(蓝色线)和偏西组(红色线)成员合成 12~72 h 的 500 hPa 位势高度预报场(以移动的涡旋中心为坐标原点)。可以看到 12 h(12 日 08 时),偏东组台风西北侧的西风槽已经较西行组偏强(图 4a),随着西风槽的发展加强,两组切断低涡的强度和位置在 60 h(14 日 08 时)出现显著差距(图 4b—e),即较强和位置偏南的大陆低涡对应台风路径偏东,而偏弱和位置偏北的低涡反而会使得台风西行。联系到以往研究<sup>[15,22-25]</sup>中低涡系统对台风路径的吸引作用,将在后面分析转向角度相关系数时进行详细讨论。而同时次 ERA5 资料的切断低涡位置和强度反而与偏西组更为接近,因此在“梅花”个例中,大陆低涡的强度位置似乎并不起到至关重要的作用。

同时,两组副高(5 880 gpm)的位置也在 48 h(13 日 20 时)出现差异,偏东组的副高位置更偏南,距离“梅花”更近(图 4d),即副高位置偏南对应台风路径偏东,而副高位置偏北对应台风路径偏西。以往许多研究<sup>[26]</sup>都指出副高的强度对台风的移动有重大影响。一般认为路径北折与赤道高压加强和副高南落相关联<sup>[2]</sup>,台风“鲶鱼”(2010)就是因为越

赤道气流北上导致赤道缓冲带北进与副高合并而造成路径北翘<sup>[27-28]</sup>。由图 4e 可以看到,60 h(14 日 08 时)两组副高的强度已有显著差距,偏东组的副高与南侧高压合并,两者打通形成一个“通道”,偏南引导气流更有利于“梅花”向北移动,路径偏东;而偏西组的副高位置偏北,直至 72 h(14 日 20 时)仍没有与南侧高压合并,副高南侧偏东气流继续(错误地)引导台风向西移动(图 4f)。

其实,两组成员副高强度的差异在 48 h 之前并不明显,但却最终引起台风路径出现显著差异,当然这其中也有其他影响系统或台风本身的作用,但不可否认的是,早期副高的细微差别可能造成后期预测路径分叉的巨大差异。就像大西洋飓风“艾克”(Ike),集合预报成员间路径离散度较大,但早期副高强度也是差异不明显<sup>[29]</sup>。尽管位于不同大洋,两个台风个例间的相似之处都突显出早期副高细微差异对于预测路径的强烈敏感性。而同时次 ERA5 资料的副高位置也再次证实了这一点,60 h(14 日 08 时)ERA5 资料的副高形态与偏东组极为相似,甚至在更早的时候(36 h,13 日 08 时)就表现出比偏东组位置更偏南的副高形态。



等值线一位势高度, 单位为gpm, 其中蓝色为偏东组, 红色为偏西组, 黑色为ERA5资料。

图4 偏东组和偏西组成员合成的500 hPa位势高度预报场

Fig.4 Composites of 500-hPa geopotential heights by easterly members and westerly members

### 3.2 台风尺度对比

由图4同时可以看到两组台风的尺度大小有所差异,特别是在60 h(14日08时)以后,偏东组的台风尺度明显偏大。为了进一步比较台风尺度对路径移动的影响,图5给出了两组近海(地)面10 m高度七级风圈等值线(以移动的涡旋中心为坐标原点),台风尺度定义为台风中心到东、西、南、北4个方向七级风圈( $13.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )距离的平均。右下角给出的对应台风尺度与中央气象台台风报文七级风圈较为接近(220~260 km)。前12 h(12日08时),两组台风尺度几乎相同(图5a),到24 h(12日20时)偏东组的台风较偏西组已有所偏大,特别是在西侧受西风槽影响的象限(图5b)。两组间的差距随时间逐渐加大,在72 h(14日20时)达到最大(图5c—f),偏东组七级风圈较偏西组偏大约60 km。

台风本身尺度可以通过与周围环境引导气流相互作用从而影响台风的移动。由于 $\beta$ 效应,较大尺度台风环流会引起额外的平流贡献,即对称涡旋的非线性平流是由 $\beta$ 效应在台风中心区域准均匀流引起的较弱一波不对称所造成的<sup>[30-31]</sup>。 $\beta$ 效应传播的大小

基本取决于台风外围的风场结构,较大的外围环流可能对应更大的向北运动分量,这就部分解释了偏东组较大台风尺度对应更大的向北分量。

另外,Fang等<sup>[32]</sup>的研究表示 $\beta$ 效应会随着高度和时间变化,进一步影响台风的移动和不同阶段的垂直风切变情况。即使没有环境引导流的影响, $\beta$ 效应也可能先引起台风涡旋向西北方向前进,但最终会向北然后向东北方向移动<sup>[32]</sup>。 $\beta$ 效应对台风移动的贡献一般都是小于引导气流的,通过同时次ERA5资料的比较也可以看到,台风尺度在72 h均与偏西组更为接近,实况中“梅花”并没有因为尺度原因而减少向北移动的分量,因此台风尺度和 $\beta$ 效应对“梅花”向北移动的相对贡献似乎是小于其他机制的。

### 3.3 路径转向角度的集合敏感性分析

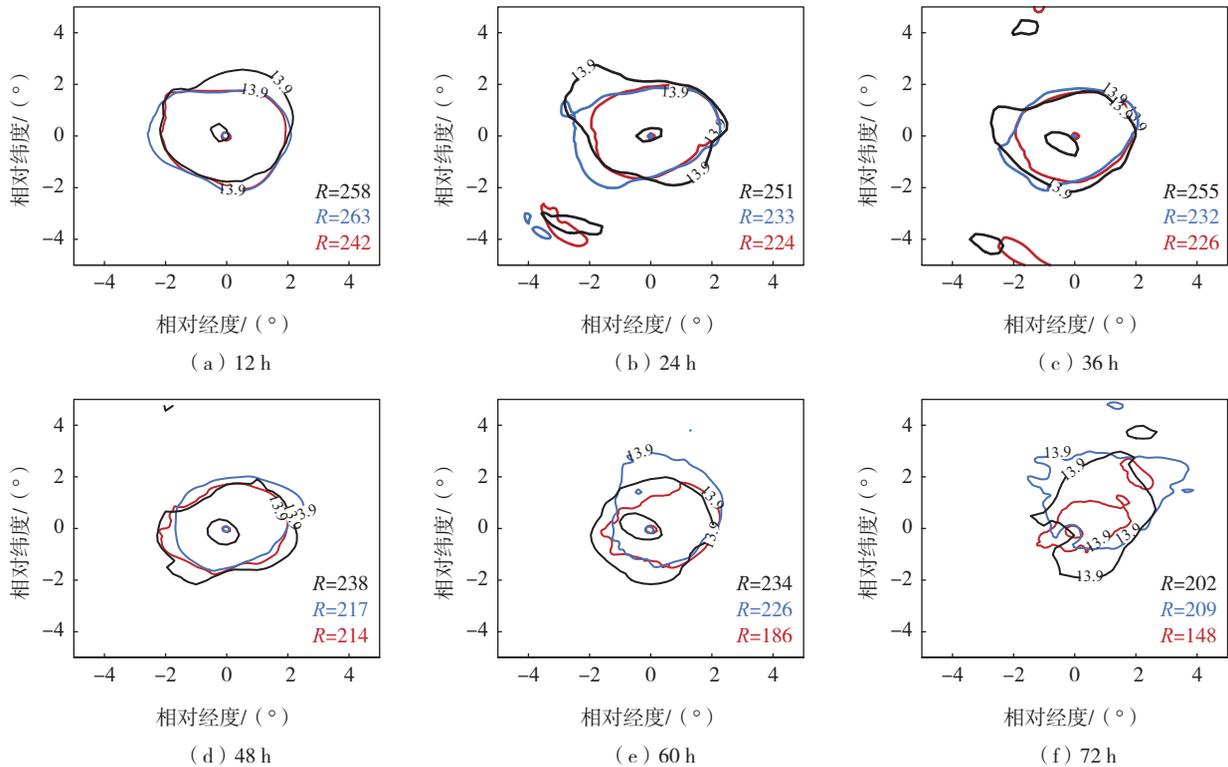
路径的角度与环境流场和台风自身环流有着紧密联系,为了验证这之间的可能联系,定义转向角度 $\alpha$ (图6)<sup>[15]</sup>如下。

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\varphi_0 - \varphi_1}\right) \quad (3)$$

其中: $\lambda$ 和 $\varphi$ 对应起报时次(下标0)和预报时次(下

标 1) 台风中心的经、纬度。对于给定的集合预报成员,  $\alpha$  越大, 对应路径越向西行。图 7 给出了集成员转向角度  $\alpha$  与 11 日 20 时起报的 500 hPa 位势高

度预报场(以移动的涡旋中心为坐标原点) 12~72 h 的相关系数, 以及集合平均的 500 hPa 位势高度预报场。



等值线—风速, 单位为  $m \cdot s^{-1}$ , 其中蓝色为偏东组, 红色为偏西组, 黑色为 ERA5 资料;  $R$ —对应的台风尺度, 即台风中心到东、西、南、北 4 个方向七级风圈距离的平均, 单位为 km。

图 5 偏东组和偏西组成员合成的近海(地)面 10 m 高度七级风圈等值线 ( $13.9 m \cdot s^{-1}$ )

Fig.5 Composites of wind radii of  $13.9 m \cdot s^{-1}$  at the height of 10 m by easterly members and westerly members

可以看到, 在前 24 h (图 7a, b), 台风环流周围区域正负相关有所交替, 靠近西风槽的西北象限以正相关居多, 而台风南侧多为负相关。36 h 以后, 台风环流周围区域均为负相关, 台风南侧区域通过 95% 的显著性检验 (图 7c—f), 即台风本身及周围环流会趋使路径向偏北方向移动, 与前面讨论的偏东组台风对应更大尺度较为一致。台风外围环流表现出与台风路径角度较大相关性, 具有统计意义, 再次证实台风尺度对路径角度偏差的影响。

同时, “梅花”西北侧的西风槽逐渐发展加强为切断低涡并向台风方向移动。与西风槽或切断低涡系统有关的相关区域始终维持在西风槽或切断低涡系统的西北侧, 而低涡东侧的区域为负相关, 低涡系统的西北侧和东侧区域均通过 95% 的显著性检验。相关系数的分布和切断低涡的演变显示, 低涡系统靠

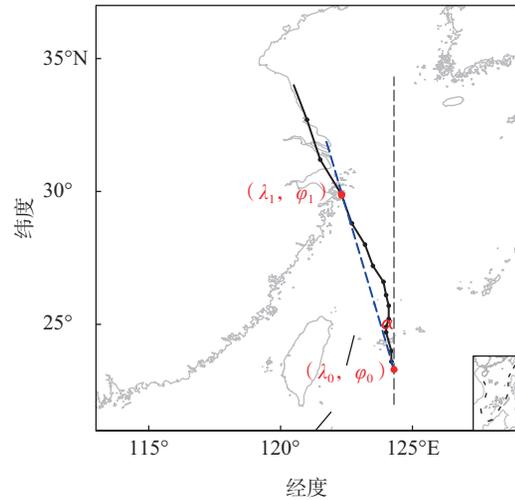
近台风发展有利于“梅花”西移(对应较大的  $\alpha$ ), 对台风系统有“吸引”作用, 而低涡远离台风不利于台风向西偏移(对应较小的  $\alpha$ ), 由于距离较远对台风路径没有太多影响。这与以往研究<sup>[15, 22-25]</sup>中由于低涡与台风间相互涡旋, 或通过减少台风与低涡系统间的气压梯度力, 低涡系统对台风具有吸引作用较为一致。但同时次 ERA5 资料的切断低涡位置和强度反而与偏西组更为接近, 也就是说在“梅花”个例中, 大陆低涡对台风的吸引效应(相对于副高)并没有产生较大作用。在实际业务预报中, 业务人员往往将模式预报台风路径向西调整归结于副高的位置调整或大陆低涡的吸引作用, 其实应用中需注意不过分高估高层槽或低涡系统对台风的吸引作用。

另外, 副高南侧和另一台风“南玛都”西侧区域也始终存在较强的正相关关系, 且通过 95% 的显著

性检验,再次印证了越赤道气流的重要影响(图7),副高与南侧高压合并“通道”靠近台风,偏南的引导气流有利于台风向北移动(对应较小的 $\alpha$ ),而副高远离不利于“梅花”北上(对应较大的 $\alpha$ )。

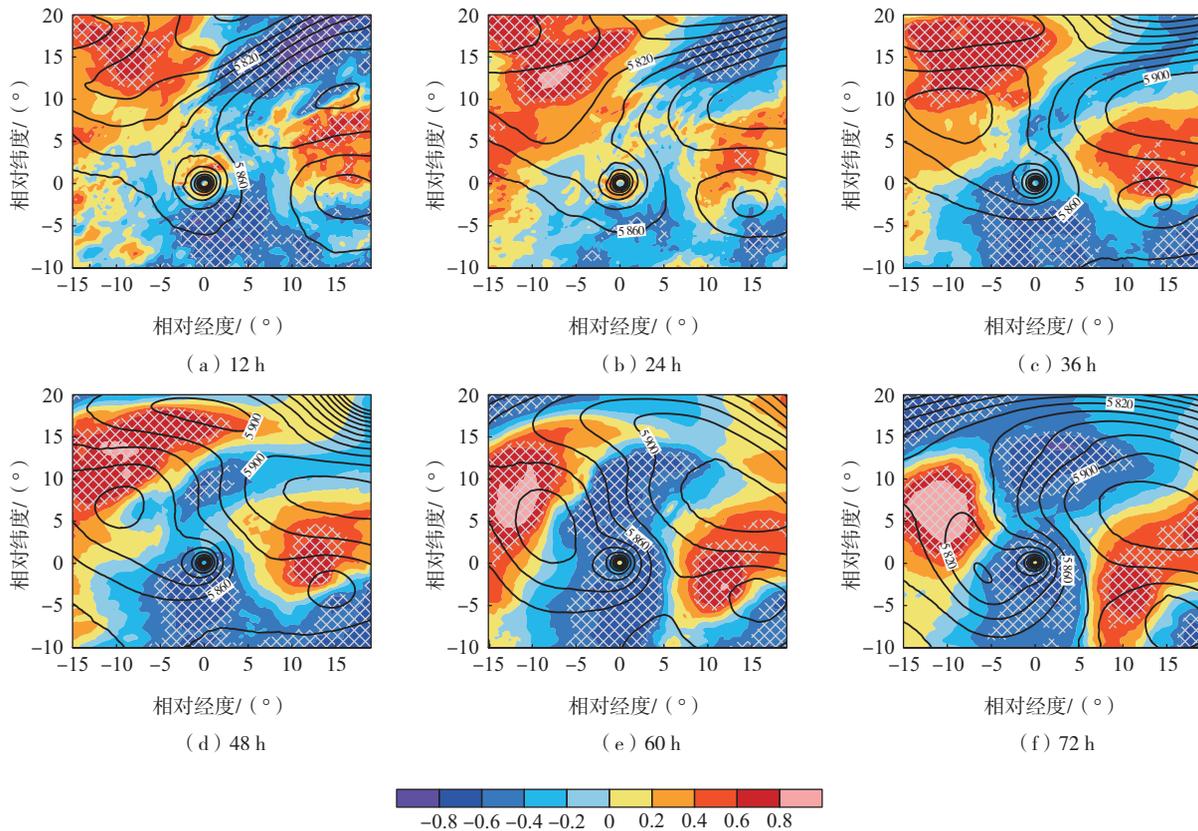
### 3.4 各预报时次的调整

关键预报时次的集合平均路径是摇摆调整的,虽然路径和登陆地点的调整整体不算很大,但“梅花”尺度较小(七级风圈半径为220~260 km),小幅度的路径预报调整也会对风雨预报产生很大影响。图8给出了CMA-REPS集合预报在2022年9月11日20时、12日20时、13日20时3个预报时次起报的集合平均路径以及与CMA最佳路径的对比,可以发现各集合平均预报路径登陆地点都较实况偏西,路径分叉大致从14日14时开始,且3个预报时次集合平均路径存在小幅度调整,11日20时起报的登陆地点在浙江象山附近,在上海金山到浙江平湖一带再次登陆(绿色线),而12日20时起报的台风路径向西进行了调整(橙色线),到13日20时起报的最新路径又较11日20时更偏东(紫色线),路径调整具有摇摆的趋势。



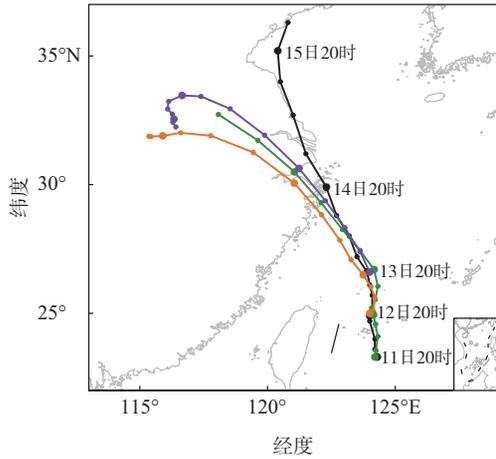
黑色实线—11日20时至15日08时“梅花”CMA最佳路径;  
红色圆点—分别对应公式(3)中起报时次(下标0)  
和预报时次(下标1)台风中心的经、纬度;灰色  
虚线—起报时次台风中心等经度线;蓝色虚  
线—起报时次和预报时次台风中心连线。

图6 转向角度 $\alpha$ 示意图(西北行 $\alpha$ 为正,东北行 $\alpha$ 为负)  
Fig.6 Schematic diagram of turning angle  $\alpha$  (positive toward the northwest and negative toward the northeast)



黑色等值线—集合平均的500 hPa位势高度预报场,单位为gpm;色阶—相关系数;白色阴影区域—通过95%显著性检验的区域。

图7 各集合成员转向角度 $\alpha$ 和11日20时起报的500 hPa位势高度场的相关系数  
Fig.7 Correlation coefficients between  $\alpha$  of various ensemble members and 500-hPa geopotential heights initialized at 20:00 BJT 11 September



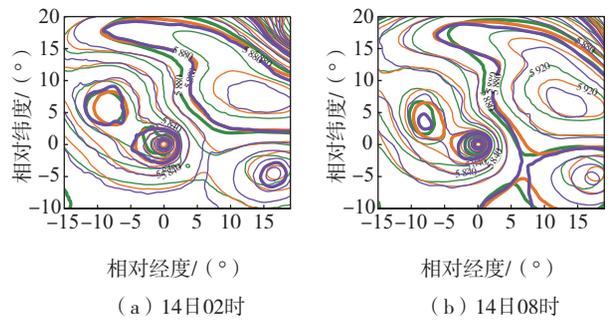
绿色线一起报时次为11日20时; 橙色线一起报时次为12日20时; 紫色线一起报时次为13日20时; 黑色线—CMA最佳路径。

图 8 CMA-REPS 集合预报在 3 个预报时次起报的集合平均路径以及 CMA 最佳路径

Fig.8 Averaged track forecasts by CMA-REPS initialized at 20:00 BJT 11, 20:00 BJT 12 and 20:00 BJT 13, and the observed best track by CMA

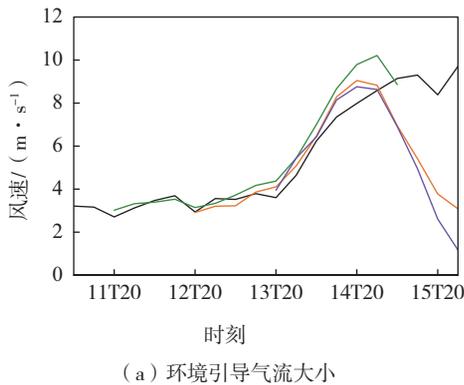
图 9 给出了 3 个预报时次集合平均的 14 日 02 时和 14 日 08 时 500 hPa 位势高度预报场(以移动的涡旋中心为坐标原点)。11 日 20 时—12 日 20 时起报的路径调整是向西调的, 预报 14 日 02 时的形势场差别主要出现在副高强度(5 880 gpm)上, 12 日 20 时起报的副高较 11 日 20 时是向北向东调整的, 与 3.1 节中副高位置偏北对应台风路径偏西较为一致。同时由于高压向北向东调整, 台风低压尺度也相应有所扩大, 至 14 日 08 时, 台风与低压切断系统的距离更加靠近, 对路径西行调整也起到一定作用。

而 12 日 20 时—13 日 20 时起报的路径调整是向东调的, 两次预报的切断低压和台风尺度其实更为接近, 但台风路径差异却是最大的, 最大的调整其实还是副高的不同, 13 日 20 时起报的副高和南侧高压早早合并(图 9a)。图 10 比较了 3 个预报时次集合平均和 ERA5 资料的引导气流, 具体选用 850~200 hPa 垂直层平均以及半径为 300~500 km 环状区域的平均。可以发现副高的调整对台风东侧引导气流的影响改变还是较大的, 13 日 20 时起报的台风引导气流与 ERA5 资料较为接近, 14 日 02—08 时方向更偏南, 与 3.1 节中副高与南侧高压合并形成的“通道”偏南引导气流对应台风向北移动较为一致。所以由不同预报时次路径的调整也可以看出, 副高对于预测路径的强烈敏感性, 相应台风尺度也会因此受到影响, 反而大陆低涡系统在不同预报时次的整体调整不大。

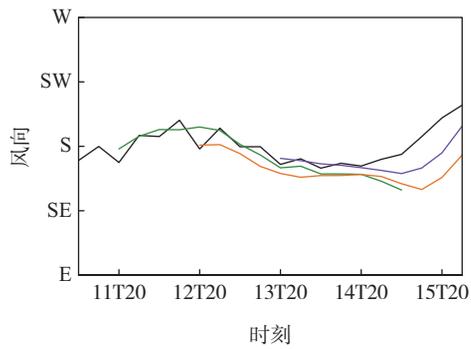


等值线—位势高度, 单位为gpm, 其中绿色线对应起报时次为11日20时, 橙色线对应起报时次为12日20时, 紫色线对应起报时次为13日20时。

图 9 3 个预报时次起报集合平均的 500 hPa 位势高度预报场  
Fig.9 Averaged forecasts of 500-hPa geopotential heights initialized at 20:00 BJT 11, 20:00 BJT 12 and 20:00 BJT 13



(a) 环境引导气流大小



(b) 环境引导气流方向

绿色线一起报时次为11日20时; 橙色线一起报时次为12日20时; 紫色线一起报时次为13日20时; 黑色线—ERA5资料。

图 10 环境引导气流大小和方向

Fig.10 Amplitude and direction of environmental steering flow

#### 4 结语与讨论

文中利用 CMA-REPS 集合预报成员分析了台风“梅花”路径预报的不确定性和偏差。CMA-REPS 集合预报成员大部分预报路径偏西,深入内地,只有少数成员与实况较为接近,移向为北偏西方向,登陆地点偏东在浙江舟山和上海奉贤一带。

“梅花”路径在登陆前后向北偏折应该是台风本身与周围环境场相互作用的结果。因此,为了具体分析造成台风“梅花”路径偏差的可能原因,文中将集合预报路径分为偏东组(路径预报误差较小)和偏西组(路径预报明显偏西)进行对比。结果显示,偏东组成员对应副高位置偏南,与南侧高压合并,偏南引导气流更有利于台风向北移动,路径偏东。同时,偏东组成员也对应大陆低涡位置偏南强度更强,台风尺度更大。

为了进一步验证路径的角度与环境流场和台风自身环流之间的可能联系,具体分析了转向角度  $\alpha$  与 500 hPa 位势高度预报场(以移动的涡旋中心为坐标原点)的相关系数。可以发现台风本身及周围环流会趋使路径向偏北方向移动,与前面偏东组台风对应更大尺度较为一致。台风外围环流表现出与台风路径角度较大相关性,具有统计意义,再次证实台风尺度对路径角度偏差的影响。但同时次 ERA5 资料的台风尺度与偏西组更接近,因此  $\beta$  效应对“梅花”向北移动的相对贡献似乎是小于其他机制的。

而陆地低涡对台风路径的影响较为复杂,低涡系统靠近台风发展有利于“梅花”西移,对台风系统有“吸引”作用,而低涡远离台风不利于台风向西偏移,距离较远对台风路径没有太多影响。但同样 ERA5 资料的切断低涡位置和强度与偏西组更为接近,在“梅花”个例中,大陆低涡并没有起到至关重要的作用,在实际业务预报中也需注意不过分高估高空槽或低涡系统对台风的吸引作用。

不同预报时次起报的集合平均路径存在小幅度调整,虽然路径和登陆地点的调整整体不算很大,但“梅花”尺度较小,小幅度的路径预报调整也会对风雨预报产生很大影响。集合平均路径先向西又向东进行了调整,路径调整具有摇摆的趋势。形势场差别主要出现在副高位置上,副高先向北向东调整,后又与南侧高压早早合并,对于改变台风周围引导气流和路

径调整起到较大影响。由不同预报时次路径的调整也可以看出,副高对于预测路径的强烈敏感性,相应台风尺度也会因此受到影响,反而陆地低涡系统在不同预报时次的整体调整不大。而南半球越赤道气流和赤道缓冲带北上与副热带高压脊的合并现象不易在常规天气图分析中被关注,因此业务预报中也需要重视其他非常规气象观测资料的分析与应用。

针对台风“梅花”的区域集合预报检验显示,模式对台风主要影响系统的长时效预报存在一定偏差,针对模式的及时检验和订正对预报调整非常重要。另外,业务预报中虽对数值模式具有一定的主观订正能力,但各类数值预报产品繁多,且在模式出现调整及较大变化阶段,缺乏技术支撑改进思路。需要在日常业务工作中继续加强对数值预报的订正技术分析并积累经验,为台风的路径预报提供技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] ELSBERRY R L. Global perspectives on tropical cyclones [R]. Geneva: WMO, 1995.
- [2] 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社,1979.
- [3] CHAN J C L, GRAY W M. Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships [J]. Mon Wea Rev, 1982, 110(10): 1354-1374.
- [4] 文永仁,戴高菊,龚月婷,等.我国台风路径突变研究进展[J].气象科技,2017,45(6): 1027-1035.
- [5] 陈联寿,徐祥德,解以扬,等.台风异常运动及其外区热力不稳定非对称结构的影响效应[J].大气科学,1997, 21(1): 83-90.
- [6] 王新伟,罗哲贤,马革兰,等.热带气旋 Meranti (2010) 异常路径的成因分析[J].大气科学学报,2015, 38(1): 37-45.
- [7] 沈学顺,李兴良,陈春刚,等.下一代大气模式中的数值方法综述[J].海洋气象学报,2022,42(3): 1-12.
- [8] 杜钧.集合预报的现状和前景[J].应用气象学报, 2002, 13(1): 16-28.
- [9] 涂小萍,姚日升,张春花,等.西北太平洋(含南海)热带气旋路径集成预报分析[J].热带气象学报,2012, 28(2): 204-210.
- [10] 钱奇峰,张长安,高拴柱,等.台风路径集合预报的实时订正技术研究[J].热带气象学报,2014, 30(5): 905-910.
- [11] 张涵斌,智协飞,王亚男,等.基于 TIGGE 资料的西太

- 平洋热带气旋多模式集成预报方法比较[J].气象,2015,41(9):1058-1067.
- [12] 王晨稀.热带气旋集合预报研究进展[J].热带气象学报,2013,29(4):698-704.
- [13] ANCELL B, HAKIM G J. Comparing adjoint- and ensemble-sensitivity analysis with applications to observation targeting[J]. Mon Wea Rev,2007,135(12):4117-4134.
- [14] HAKIM G J, TORN R D. Ensemble synoptic analysis [M]//BOSART L F, BLUESTEIN H B. Synoptic-dynamic meteorology and weather analysis and forecasting. Boston, MA: American Meteorological Society,2008:147-162.
- [15] QIAN C H, ZHANG F Q, GREEN B W, et al. Probabilistic evaluation of the dynamics and prediction of Supertyphoon Megi (2010)[J]. Wea Forecasting,2013,28(6):1562-1577.
- [16] 王毅,何立富,代刊,等.集合敏感性方法在高原涡和西南涡引发暴雨过程中的应用[J].高原气象,2017,36(5):1245-1256.
- [17] 何斌,楼茂园,李海军,等.集合预报对台风天鹅(2015)远距离暴雨的不确定性研究[J].气象,2020,46(1):15-28.
- [18] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. J Atmos Oceanic Technol,2014,31(2):287-301.
- [19] LU X Q, YU H, YING M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. Adv Atmos Sci,2021,38(4):690-699.
- [20] YU H, HUANG W, DUAN Y H, et al. A simulation study on pre-landfall erratic track of Typhoon Haitang (2005)[J]. Meteor Atmos Phys,2007,97(1):189-206.
- [21] 王靖,钱传海,董林,等.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,2023,43(1):52-62.
- [22] LI Y, GUO L X, XU Y L, et al. Impacts of upper-level cold vortex on the rapid change of intensity and motion of typhoon Meranti (2010)[J]. J Trop Meteor,2012,18(2):207-219.
- [23] 刘爱鸣,高珊.0908号台风“莫拉克”异常路径及其对台湾海峡两岸强降水的影响[J].台湾海峡,2011,30(2):151-157.
- [24] 梁军,李英,张胜军,等.黄海西移台风的环流特征及其对辽东半岛降水影响的对比分析[J].热带气象学报,2012,28(6):861-872.
- [25] 王海平,董林,许映龙,等.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,2022,42(1):83-91.
- [26] COLBERT A J, SODEN B J. Climatological variations in North Atlantic tropical cyclone tracks[J]. J Climate,2012,25(2):657-673.
- [27] 许映龙.超强台风鲑鱼路径北翘预报分析[J].气象,2011,37(7):821-826.
- [28] 郭旭,麻素红,吴俞,等.基于TIGGE资料的台风“鲑鱼”路径北翘成因分析[J].热带气象学报,2014,30(1):55-63.
- [29] BRENNAN M J, MAJUMDAR S J. An examination of model track forecast errors for Hurricane Ike (2008) in the Gulf of Mexico[J]. Wea Forecasting,2011,26(6):848-867.
- [30] CHAN J C L, WILLIAMS R T. Analytical and numerical studies of the beta-effect in tropical cyclone motion. Part I: zero mean flow[J]. J Atmos Sci,1987,44(9):1257-1265.
- [31] FIORINO M, ELSBERRY R L. Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion[J]. J Atmos Sci,1989,46(7):975-990.
- [32] FANG J, ZHANG F Q. Effect of beta shear on simulated tropical cyclones[J]. Mon Wea Rev,2012,140(10):3327-3346.