

吴胜蓝,漆梁波,余晖,2025. 登陆台风热力不对称结构对路径偏折的影响[J]. 气象,51(6):675-685. Wu S L, Qi L B, Yu H, 2025. Influence of thermal asymmetry structure on the deflection of landfall typhoon track[J]. Meteor Mon, 51(6): 675-685 (in Chinese).

登陆台风热力不对称结构对路径偏折的影响*

吴胜蓝¹ 漆梁波¹ 余晖²

1 上海中心气象台,上海 200030

2 中国气象局上海台风研究所,上海 200030

提 要: 利用中国气象局热带气旋最佳路径数据集和欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料,对 1950—2022 年影响华东北部沿海地区的台风路径相对于引导气流的偏折特征进行统计分析。结果表明:54 个登陆台风中,85.2% 在临近登陆时刻台风实际移动路径相对引导气流出现左偏(偏折角度大于 5°),沿海地形对于台风移动偏离引导气流平均会产生约 6°~7° 的偏折角度。临近登陆时刻台风实际移动路径与引导气流之间的偏折角度与热力不对称参数有较好对应关系。热力结构接近对称的气旋一般对应较小的偏折角度,而明显的热力不对称结构,会使得台风实际移动路径与引导气流之间的偏折角度在临近登陆前偏大的可能性增加。沿海地形在临近登陆时刻易激发气旋前进方向左侧不对称对流活动,对流层低层厚度的增加影响热力结构分布,从而引起台风实际移动路径往引导气流方向左偏。但登陆台风左侧对流发展,有时也可使原本不对称性较大的台风趋于对称,实际业务应用中不能仅仅简单地依据不对称性的判断路径偏折角度,而应该更关注临近登陆时刻不对称性的变化,做出更准确的判断决策。

关键词: 台风路径偏折,热力不对称,引导气流

中图分类号: P433, P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.020101

Influence of Thermal Asymmetry Structure on the Deflection of Landfall Typhoon Track

WU Shenglan¹ QI Liangbo¹ YU Hui²

1 Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

2 Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

Abstract: A statistical analysis of the characteristic of typhoon track deflection relative to the steering flow in East China is conducted with the CMA tropical cyclone best track dataset and the ECMWF ERA5 reanalysis data from 1950 to 2022. The results show that 85.2% of 54 landfall typhoons' tracks deviate to the left of the steering flow at the time of landfall, and the coastal terrain can produce an averaged deflection angle of about 6°–7° from the steering flow. The deflection angle between the typhoon tracks and the steering flow at the landfall time has a good correspondence with the thermal asymmetry parameters. Generally, a cyclone with a nearly thermal symmetric structure at the time of landfall corresponds to a smaller deflection angle, while the obvious thermal asymmetric structure would increase the possibility of a large deflection angle. The coastal terrain is prone to triggering asymmetric convection on the left side of the cyclone near the landfall, affecting the distribution of thermal structure and causing the typhoon tracks to deviate to the left of the steering flow. The development of convection on the left side of the cyclone can

* 国家自然科学基金项目(U2142206)和中国气象局青年创新团队(CMA2024QN02)共同资助

2023 年 8 月 11 日收稿; 2025 年 4 月 3 日收修定稿

第一作者:吴胜蓝,主要从事天气预报及相关技术研究. E-mail: wus_lnju@outlook.com

通讯作者:漆梁波,主要从事天气预报及相关技术研究. E-mail: qlb1999@hotmail.com

sometimes decrease the thermal asymmetry parameter at the time of landfall. So, more attention should be paid to the evolution of thermal asymmetry near the landfall instead of the asymmetry itself for more accurate prediction of typhoon track deflection.

Key words: typhoon track deflection, thermal asymmetry, steering flow

引 言

台风引起的主要灾害往往是在登陆前后造成的,而台风近海路径的偏折会直接影响风雨预报的精度,较准确地预报台风路径是减轻灾害的关键因素之一。对台风运动物理机制的探讨,一直是国内外台风研究者关注的问题。其中,环境引导气流被认为是影响台风移动路径的关键因子。引导气流指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由绝对涡度平流近似估计得出(陈联寿和丁一汇,1979; Chan and Gray, 1982)。在业务应用中,引导气流方法预报效果好,特别是对于正常路径的预报。考虑中纬度斜压大气的情况, Wu and Wang(2000)和 Chan et al(2002)提出了一个更加普遍适用的诊断台风路径的动力学框架——用位涡来诊断预测台风的移动,即涡旋会朝着位涡趋势的一波分量最大的区域移动,其本质也是环境场的“引导”作用。

实际上台风移动路径通常与引导气流存在较大差异,在影响台风移动路径的关键因子中,除了引导气流,最引人关注的就是台风结构。在弱引导环境中,台风内部的不对称环流是引起台风移向偏离引导气流的重要因素(陈联寿等,2002)。Chen and Luo(1995)指出,当台风环流内部强风速带出现在东北象限时,台风往往保持向西和西北方向移动趋势,不发生转向。当该强风速带移到台风西南象限时,可能是台风转向运动的强信号。Chen and Luo(1998)研究表明,涡度平流会使台风不对称结构均匀化,东西方向风速结构的不对称度越大,向西的运动分量也越大,这一结果在实际预报中有较高实用价值。姜丽萍等(2008)发现第 0601 号台风“珍珠”风场结构中不对称强风速区的转移对其北翘有预示作用。李霞等(2014)研究指出,第 1208 号台风“韦森特”快速偏西行后突然停滞长时间打转主要与副热带高压减退导致的引导气流减弱、台风风场不对称分布以及强风速区呈逆时针转移等因子有关。袁敏等(2018)利用多种资料对 2011 年第 9 号台风“梅

花”的两次路径转折过程进行诊断分析和数值模拟,发现内部不对称结构与外部大尺度环境流场均对转向有重要影响。

台风不对称对流系统也被认为在台风移动中起重要作用,早有学者基于卫星图像提出台风会倾向在发展最旺盛的积雨云团的边缘移动(距离台风中心 200~600 km 处)。如陈联寿等(1997)通过数值模拟揭示台风周围不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。李天然等(2006)指出“珍珠”热力不对称结构的演变对其西行北翘路径影响明显。王新伟等(2015)也指出台风的热力不对称结构会直接影响台风的移动,倾向往发展最旺盛的积雨云团的边缘移动。不对称对流系统在位涡诊断方程中表现为非绝热加热作用。Chan et al(2002)指出位涡趋势一波分量主要是由水平平流项和非绝热加热过程起到重要贡献,水平平流项会在平稳移动的台风或者方向、速度没有太大变化的台风中起主导作用,而非绝热加热在缓慢移动、转向或者轨迹突变的台风中则非常关键。在业务应用方面, Yu et al(2007)基于中国气象局全球区域同化预报系统台风模式,指出与非绝热加热有关的位相锁定被认为是位涡强迫及第 2005 号台风“海棠”在台湾登陆前回旋和转折的主要贡献因子。吴胜蓝等(2023)也通过位涡倾向方程的非绝热加热项证实了台风的热力不对称结构会影响台风的移动,台风有向对流不稳定区域移动的趋势。

随着气象大模型在台风路径预测方面的应用,对天气尺度系统和环境场引导气流的把握更为精准,而台风环流的不对称结构和不对称对流系统的影响具有多样性和不确定性(陈涛等,2021;黄燕燕等,2023;梁军等,2024),同时台风内核(0~350 km)也被证实是影响路径预测初始误差和可预报性最为显著的区域(Feng et al,2024)。尤其是在台风登陆前后其结构变化最为剧烈的阶段,经过下垫面其运动速度和方向会发生偏折。本文利用 1950—2022 年中国气象局热带气旋最佳路径数据集和再分析资料,分析影响华东北部沿海地区(浙江、上海及江苏)台风登陆前后路径的偏折情况,及

路径偏折与台风不对称动力、热力结构间的关系。

1 资料和方法

(1) 中国气象局热带气旋最佳路径数据集, 时间间隔为 6 h, 2017 年以后登陆台风在登陆前 24 h 时段内加密为 3 h (https://tcdata.typhoon.org.cn; Ying et al, 2014; Lu et al, 2021)。

(2) 欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料 (以下简称 ERA5), 时间分辨率为 1 h, 水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 共 37 层。

利用 Galarneau and Davis (2013) 提出的最优环境引导气流方法, 具体为在给定时刻选用不同垂直层平均与合适的半径组合计算多个引导气流, 比较每个候选引导气流与实际台风移动之间矢量差。最优环境引导气流就定义为给定时刻与实际台风移动最小矢量差的半径和垂直层组合的结果。该方法在分析诊断时可以最大程度地贴近不同强度、尺度台风实际的环境场气流。具体方法为: 分别选用 850~200、850~300 和 850~400 hPa 垂直层风场平均, 以及半径 200~400、300~500 和 400~600 km 环状区域的平均, 垂直层次使用的是平均标准等压面资料。

热力不对称参数 (B) 是反映热带气旋逐渐变性成为温带气旋的“相空间”法 (Hart, 2003; 郭蓉等, 2011) 中包含的一个指标参数, 表征气旋在对流层低层的热力不对称结构, 通过气旋前进方向两侧 900~600 hPa 的厚度差在台风中心范围平均计算而得:

$$B = \left| \overline{Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}}} \right|_{\text{L}} - \left| \overline{Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}}} \right|_{\text{R}} \quad (1)$$

式中: Z 为等压面高度, R 和 L 分别指示气旋当前位置前进方向的右侧和左侧。 $B=0$ m 表示台风前进方向左右两侧完全对称, 实际中几乎不存在这种情况; 当 B 达到一定的阈值, 即气旋有明显的热力不对称结构出现。 Hart (2003) 统计了大西洋的变性台风, 认为该阈值在 10 m 左右, 也就是说 $B > 10$ m 时, 有冷空气侵入台风, 台风变性过程开始发生。

参考该参数定义了动力不对称参数 (E) 用于表征气旋在对流层低层的动力不对称结构, 用气旋前进方向两侧 900~600 hPa 垂直层平均风速差计算而得:

$$E = \left| \overline{V_{600 \sim 900}} \right|_{\text{L}} - \left| \overline{V_{600 \sim 900}} \right|_{\text{R}} \quad (2)$$

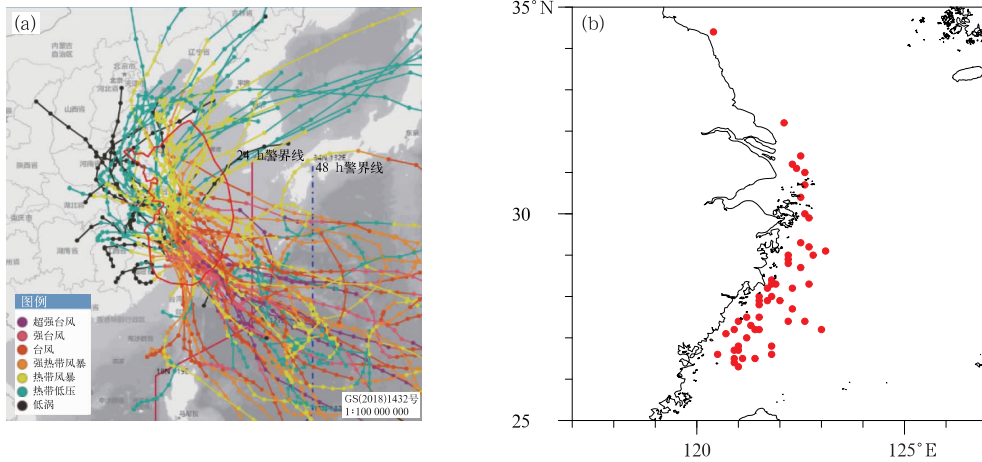
式中 V 为风速。当动力不对称参数达到一定的阈值, 气旋对流层低层风场会出现明显的不对称结构。两个参数均以台风中心为中心, 对最外围闭合等压线半径 (the radius of the outermost closed isobar, ROCI; 牛海祯, 2021) 区域进行平均。ROCI 为从台风中心到东、西、南、北四个方向闭合等压线最大距离的平均, 等压线间隔为 1 hPa。

分析影响华东北部 (浙江、上海及江苏) 台风登陆前后的路径相对于引导气流的偏折情况。临近登陆时刻定义为最佳路径数据集台风登陆前一记录时刻的对应时刻。

2 登陆台风路径偏折特征

1950—2022 年共 54 个台风登陆华东北部 (浙江、上海及江苏), 年均 0.74 个, 最多年为 2018 年 (4 个), 图 1 展示了登陆华东北部沿海地区的台风路径和临近登陆时刻位置。统计这 54 个台风登陆时刻, 影响月份集中在夏季, 8 月最多, 占比为 48.1%, 秋季个数较少 (图 2a)。53.8% 的登陆强度为强热带风暴及以上级别, 其中 9.3% 属于台风级别, 1.9% 属于强台风级别 (图 2b)。临近登陆前后移动方向最多为西北行 (40.7%), 西西北次之 (25.9%), 北行、西行和北西北占比分别为 13.0%、11.1% 和 9.3% (图 2c)。临近登陆前后移速大部分集中在 $10.0 \sim 39.9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (96.3%, 图 2d), 移速最慢的个例为 1989 年第 9 号台风, 临近登陆时刻移速为 $11.2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; 最快的为 2012 年第 10 号台风“达维” ($45.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)。

计算台风实际移动路径与最优环境引导气流之间的偏折情况。最优环境引导气流不同于以往固定范围和高度平均的引导气流计算方法, 可以在分析诊断时最大程度地贴近不同强度、尺度台风实际的环境场气流, 且在模式检验应用中误差最小, 该方法被许多学者广泛引用 (Qian et al, 2014; Peng et al, 2017; Rios-Berrios and Torn, 2017; Dai et al, 2022; Wang et al, 2023)。图 3 为台风路径及其最优环境引导气流 (红色箭头) 个例示意, 大部分时刻的最优环境引导气流能与实际台风路径较好匹配, 但也有些时刻二者之间会出现差异。将台风实际移动路径往引导气流方向左侧移动认为是左偏, 反之则认为



注：台风路径查询摘自中国气象局上海台风研究所西北太平洋热带气旋检索系统，
图 a 中闭合红线区域为检索区域，即距离华东北部海岸线 300 km 以内影响范围。

图 1 1950—2022 年登陆华东北部的台风(a)路径,(b)临近登陆时刻位置

Fig. 1 (a) Track of landfall typhoon and (b) the location of typhoon at the landfall time in northern East China from 1950 to 2022

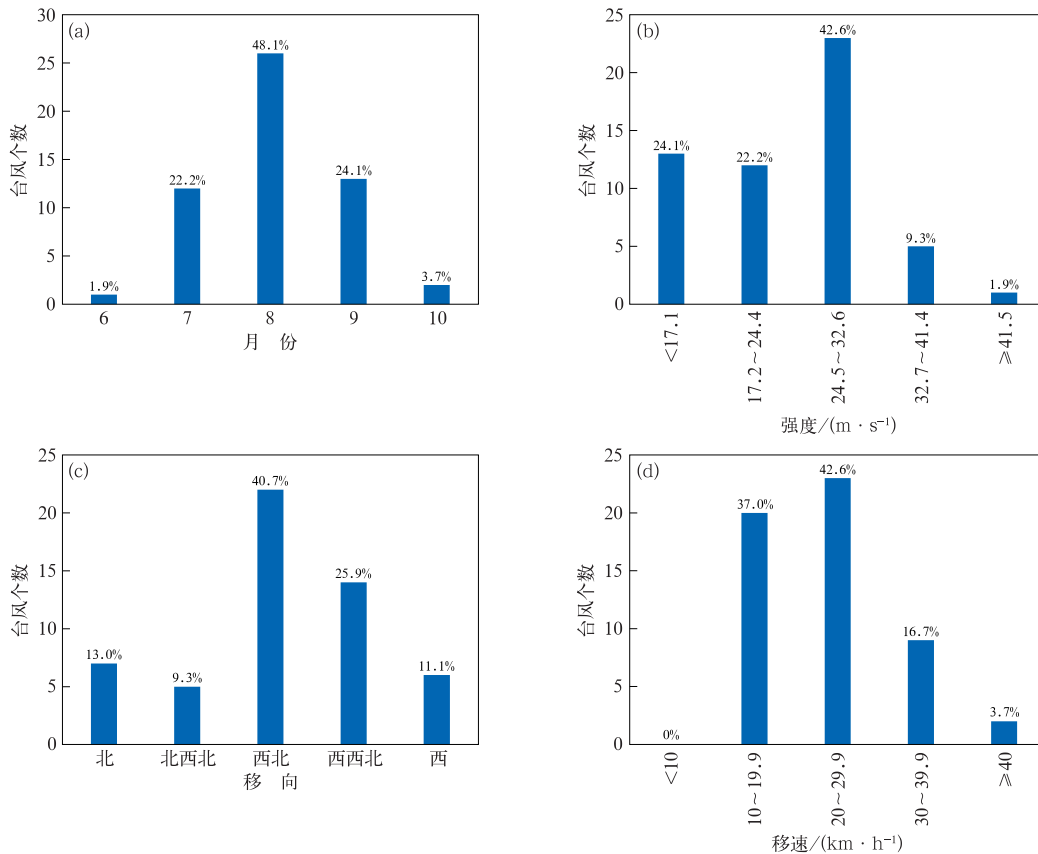
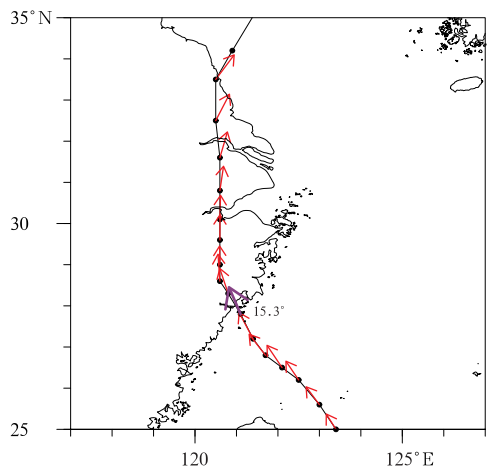


图 2 1950—2022 年登陆华东北部的台风统计特征

(a) 登陆月份, (b) 登陆强度, (c) 临近登陆时刻移向, (d) 临近登陆时刻移速

Fig. 2 Statistical characteristics of landfall typhoons in northern East China from 1950 to 2022

(a) landfall month, (b) landfall strength, (c) typhoon moving direction near the landfall time, (d) typhoon moving speed near the landfall time



注:紫色箭头为临近登陆时刻最优环境引导气流,与台风实际移动路径偏折角度为 15.3°。

图 3 2020 年第 4 号台风“黑格比”路径(黑色点线)及其最优环境引导气流(红色箭头)
Fig. 3 Track of Typhoon Hagupit (black dot line) and its optimal environmental steering flow (red arrow) in 2020

是右偏,偏折角度小于 5°(占比低于 85%)认为没有太大偏差。如图 3 所示,2020 年第 4 号台风“黑格比”在临近登陆时刻为左偏(紫色箭头),台风实际移动路径往引导气流方向左侧移动,偏折角度为 15.3°。

经统计,在 54 个登陆台风中,46 个(85.2%)在临近登陆时刻出现左偏,其中 2 个是先偏左后偏右,即 2018 年第 12 号台风“云雀”和同年第 18 号台风“温比亚”,也一起归算在左偏结果中。这与张灵杰(2020)统计的 2007—2016 年登陆台湾岛后的台风移动路径发生左偏折最多的结果是较为一致的,但只关注实际路径的偏折(未使用引导气流作为参考)。其余 18 个在登陆时刻与引导气流没有太大偏差。临近登陆时刻台风移动路径左偏主要与下垫面粗糙度的不连续导致涡旋朝着陆地方向前行有关。下垫面通过改变低层风场分布,产生不对称的对流活动以及涡度分布,一对 β 涡旋中心的通风流矢量使得涡旋朝着陆地方向前行(孟智勇等,1998;Wong and Chan,2006)。也有研究指出下垫面会影响对流活动和热力结构分布,从而激发不对称对流活动,迎风坡辐合抬升引起的不均匀非绝热加热作用使得路径发生偏折(Yeh and Elsberry, 1993a; 1993b; Li et al,2014)。

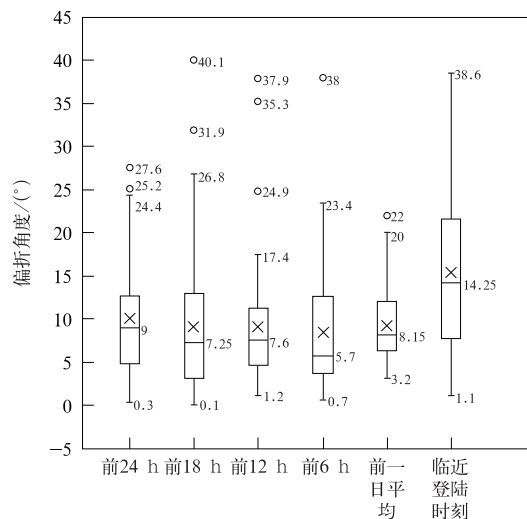
除了考虑台风实际移动路径与引导气流的偏折方向,还计算了登陆前一日平均和临近登陆时刻的

偏折角度(如无数据则按实际情况缩短平均时次)。由图 4 可见,登陆前 24 h 与登陆前一日平均的偏折角度均差异较小,临近登陆时刻的偏折角度中值为 14.25°,远高于登陆前一日平均的中值(8.15°),由此可见下垫面对于台风移动偏离引导气流的影响是较大的,临近登陆时刻平均会产生 6°~7°的偏折角度,这可能与沿海地形引起的不对称环流结构,以及被激发的不对称对流活动有关,下文将着重讨论登陆偏折角度与两者的关系。

业务预报中还关注不同移向台风临近登陆时刻的平均偏折角度,有助于提升实际预报效果。其中,北西北和西西北移向的平均偏折角度较大,分别为 19.68°和 17.44°,北行和西行的平均偏折角度偏小,分别为 9.94°和 11.42°,西北行则为 15.98°(图略)。

3 登陆路径偏折与不对称结构的关系

简单起见,在讨论登陆路径偏折角度与热力不对称参数关系时,仅考虑气旋前进方向左右两侧厚度差值的绝对值。54 个登陆台风临近登陆时刻热力不对称参数的平均值为 5.7 m,也就是说热力



注:箱体横线从上到下分别为第 75%、50%、25%分位数,上、下两端分别为最大值和最小值,圆点和叉号分别为异常值和平均值。

图 4 1950—2022 年登陆华东北部台风登陆前和临近登陆时刻的实际移动路径与引导气流之间的偏折角度箱线图
Fig. 4 Box plot of deflection angles between typhoon tracks and steering flows before landfall and near the landfall time of landfall typhoons in northern East China from 1950 to 2022

不对称参数 >5.7 m 认为是热力较不对称,而 ≤ 5.7 m 则认为热力结构趋于对称。其最小值出现在 1994 年第 17 号台风,为 0.5 m;如图 5a 所示台风在临近登陆时刻对流层低层左右两侧是接近对称的,红圈为台风此刻 ROCI(即计算 900~600 hPa 厚度差时的区域平均)。其最大值出现在 2021 年第 6 号台风,为 11.9 m,从图 5b 可以看到台风在临近登陆时刻,其前进方向左右两侧 900~600 hPa 的厚度是有较大差异的,左侧可能由于沿海地形摩擦或辐合作用,对流更为活跃,引起低层等压面厚度变大,热力不对称结构较为明显。

图 6a 给出了临近登陆时刻台风实际移动路径与引导气流之间的偏折角度,以及热力不对称参数绝对值间的对应关系,相关系数为 0.45,通过了 0.05 的显著性水平检验。也就是说临近登陆时刻偏折角度与热力不对称结构有较高的相关性,热力结构接近对称的气旋一般对应较小的偏折角度,而明显的热力不对称结构会使得台风实际移动路径与引导气流之间的偏折角度在登陆前偏大的可能性增加。临近登陆时刻的热力不对称结构可能是受下垫面的影响,由被激发的不对称对流活动所致。

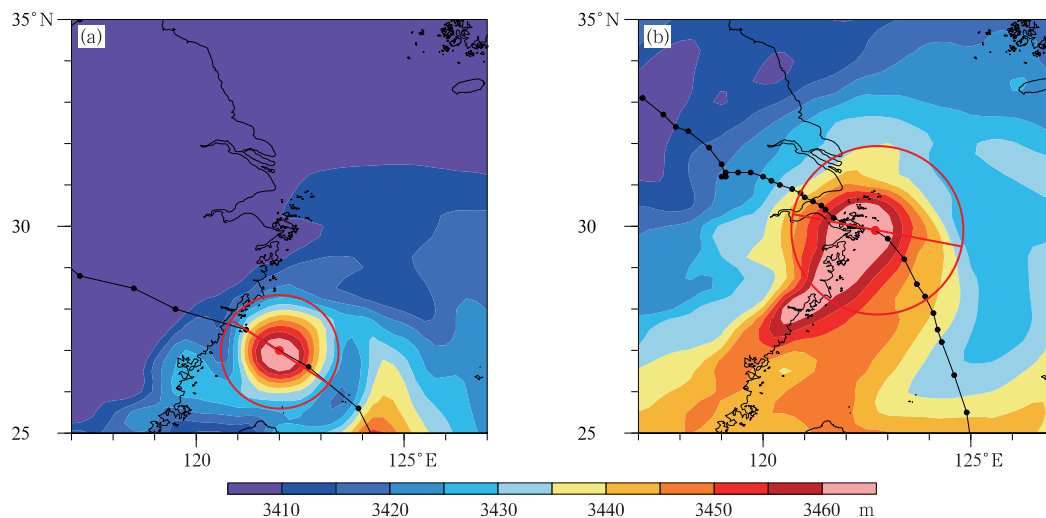
在临近登陆时刻,所有台风均为左侧风力较大,动力不对称参数均为正值,其均值为 $7.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,即动力不对称参数 $>7.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 认为是动力较不对称,而 $\leq 7.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 则认为动力结构趋于对称。动力不对称参数最小值出现在 1966 年第 11 号台风,

为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;最大值出现在 1990 年第 5 号台风,为 $14.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。计算偏折角度与动力不对称参数的对应关系,相关系数为 0.16,未通过显著性水平检验(图 6b),即临近登陆时刻台风实际移动路径与引导气流之间的偏折与动力不对称结构关系不明显。

除了热力、动力不对称影响外,临近登陆时刻台风移速与偏折角度间的相关系数为 0.19,也未通过显著性水平检验(图 6c)。但可以看出,移速与动力不对称参数的分布与图 6a 较为类似,两者的相关系数为 0.52,通过了 0.05 的显著性水平检验(图 6d)。也就是说不对称风场结构与台风移速有较高相关性,统计结果显示台风左右两侧不对称风场结构越强,对应台风移速相应越快;反之台风越接近轴对称结构,移速会相对偏慢。台风的移速不仅取决于引导气流的强度,也与台风的不对称结构密切相关,这也说明了引导气流和台风不对称结构之间存在复杂的相互作用(罗哲贤和平凡,2012;Luo and Ping, 2012)。但不同方位、不同半径范围的动力不对称,对台风移速的影响有较大的差别(余晖,1999)。本文仅讨论台风左右两侧不对称风场结构,而实际由动力不对称引起的台风移速变化在不同象限表现较为不同。

4 登陆时刻热力不对称参数的变化特征

上文分析了临近登陆时刻偏折角度与热力不对

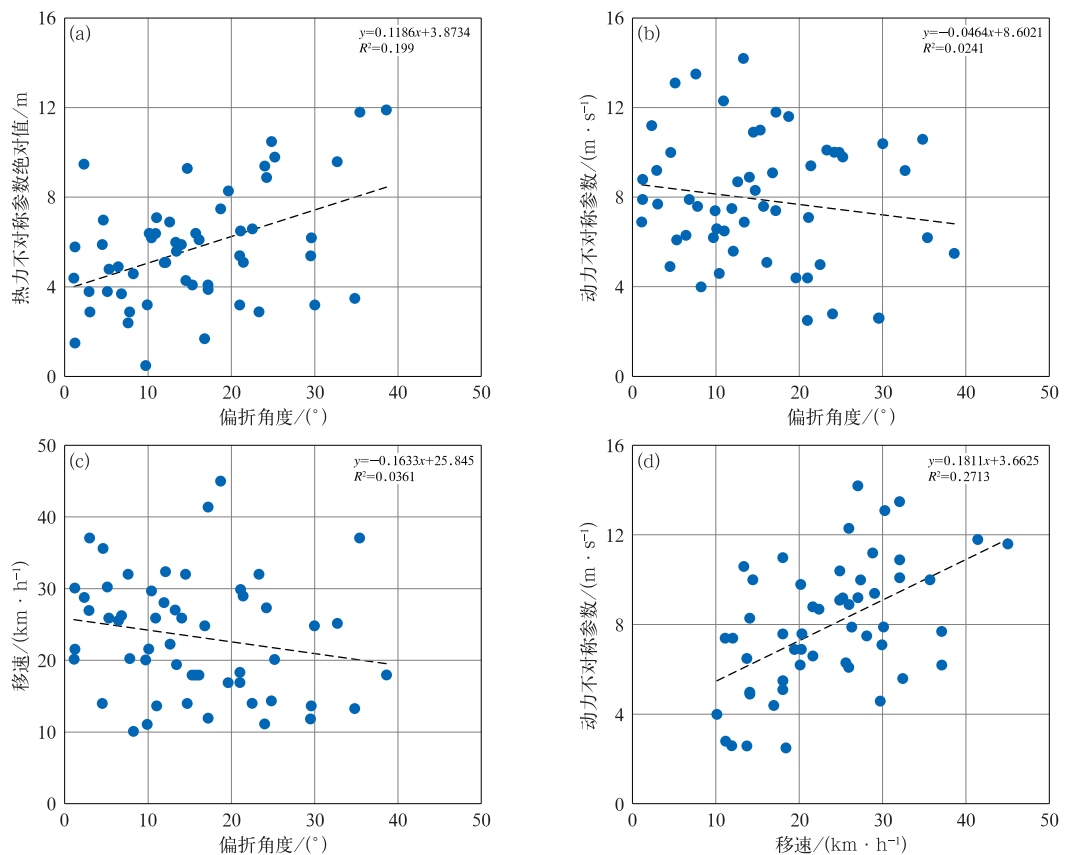


注:红圈代表台风此刻 ROCI,红线为台风当前位置与前进方向的连线,黑色点线为台风路径,红色点为台风临近登陆时刻位置。

图 5 (a)1994 年第 17 号台风“Fred”和(b)2021 年第 6 号台风“烟花”的 900~600 hPa 厚度差(填色)

Fig. 5 Distribution of thickness (colored) between 900 hPa and 600 hPa of

(a) Typhoon Fred in 1994 and (b) Typhoon In-fa in 2021



注:虚线为线性拟合趋势线。

图 6 1950—2022 年登陆华东北部台风临近登陆时刻(a)热力不对称参数绝对值与偏折角度,(b)动力不对称参数与偏折角度,(c)移速与偏折角度,(d)动力不对称参数与移速的散点图

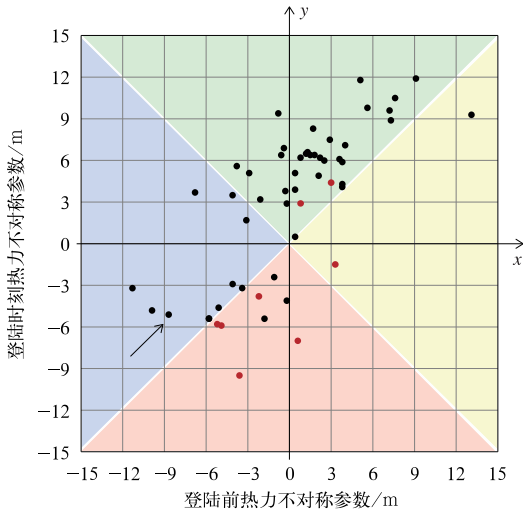
Fig. 6 Scatter plots of (a) thermal asymmetry parameter and deflection angle, (b) dynamic asymmetry parameter and deflection angle, (c) moving speed and deflection angle, and (d) dynamic asymmetry parameter and moving speed near the landfall time of landfall typhoons in northern East China from 1950 to 2022

称参数存在较好的对应关系,但具体热力结构的分布及其影响机制还不清楚,下文通过临近登陆前后热力结构的演变,解释临近登陆时刻台风实际移动路径向引导气流方向左偏的可能原因。

仅分析热力不对称参数的绝对值不足以很好解释临近登陆时刻偏折角度与热力不对称参数之间的关系。对应热力不对称参数的定义,图 7 具体分析了气旋前进方向左右两侧厚度的相对变化,图中散点展示了登陆前与临近登陆时刻热力不对称参数的对应关系,登陆前选用临近登陆时刻前一日的平均。四个不同颜色区域的划分代表了临近登陆时刻气旋前进方向左(右)侧厚度的改变以及热力不对称参数的变化。对比临近登陆时刻,登陆前平均的热力不对称参数为 3.6 m,与临近登陆时刻 5.7 m 的均值

差异通过了 0.05 的显著性水平检验。也就是说临近登陆时刻热力不对称参数是明显增大的,沿海地形对热力结构的分布有显著影响。其中,42 个在临近登陆时刻不对称性增加,分布在绿色和红色区域,12 个不对称性减小,对应图中蓝色和黄色区域(图 7)。

对应热力不对称参数的定义,通过图 7 可以发现,约五分之四的个例(44 个,分布在绿色和蓝色区域)临近登陆时刻是气旋前进方向左(右)侧厚度增加(减少)的,即约 80% 的个例都如图 5b 所示的台风“烟花”,在临近登陆时刻沿海一带对流层低层厚度明显增加,这可能与沿海地形激发的气旋前进方向左侧不对称对流活动有关。由于气旋移动路径与沿海地形间的角度问题,约 80% 的个例在临近登陆时刻是气旋前进方向左侧厚度增加较右侧更为明



注:绿色区域代表气旋前进方向左(右)侧厚度增加(减少)且热力不对称参数增大的分布($y > |x|$),红色区域代表气旋前进方向左(右)侧厚度减少(增加)且热力不对称参数增大的分布($y < -|x|$),蓝色区域代表气旋前进方向左(右)侧厚度增加(减少)且热力不对称参数减小的分布($x < -|y|$),黄色区域代表气旋前进方向左(右)侧厚度减少(增加)且热力不对称参数减小的分布($x > |y|$);红色散点表示登陆台风组中与最优环境引导气流方向没有太大偏折的个例(小于 5°);箭头为示意个例。

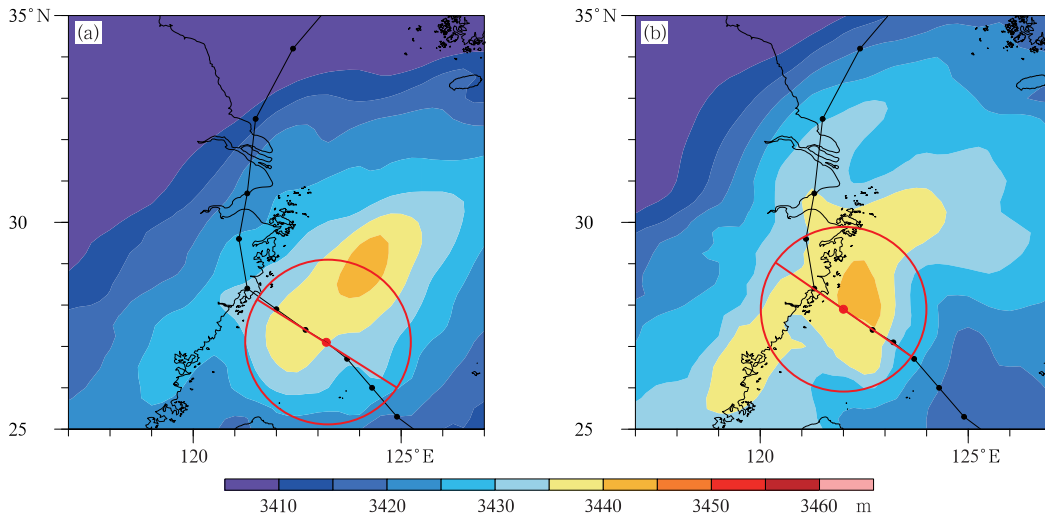
图 7 1950—2022 年登陆华东北部台风登陆前与临近登陆时刻热力不对称参数散点图

Fig. 7 Scatter plot of thermal asymmetry parameters before landfall and near the landfall time of landfall typhoons in northern East China from 1950 to 2022

显,而对流活动潜热释放引起的非绝热加热项是对流层低层厚度发生变化的主要因子。而台风的热力不对称结构会影响台风的移动,台风有向对流不稳定区域移动的趋势,位涡倾向方程的非绝热加热项也证实了这一观点(吴胜蓝等,2023),这就可以解释大部分个例在临近登陆时刻台风实际移动路径出现向引导气流方向左偏的问题。

沿海地形激发的不对称对流活动影响热力结构的分布,但不意味着热力不对称参数临近登陆时刻都会增大,也有趋于更加对称的情况(图 7 蓝色区域),这取决于登陆前的热力不对称分布。图 8 给出了 1995 年第 7 号台风“Janis”在临近登陆前后的 900~600 hPa 厚度差变化(对应图 7 箭头所示个例),到登陆前(1995 年 8 月 24 日 06 时,世界时;图 8a)气旋前进方向右侧的对流层低层厚度较左侧偏厚,登陆前一日平均热力不对称参数为 -4.1 m ;在临近登陆时次(8 月 24 日 18 时,图 8b)气旋前进方向左侧由于沿海地形激发的不对称导致对流低层厚度有所增加,右侧也有所增加,但相较登陆前一日变化不显著,此时热力不对称参数为 -2.9 m ,绝对值减小,热力结构在临近登陆时刻趋于更加对称,而“Janis”临近登陆时刻仍左偏了 12.1° 。

图 7 中还有约五分之一个例(10 个,分布在黄色和红色区域)临近登陆时刻是气旋前进方向左



注:红圈代表台风此刻 ROCI,红线为台风当前位置与前进方向的连线,黑色点线为台风路径,红色点为台风临近登陆时刻位置。

图 8 1995 年 8 月 24 日(a)06 时,(b)18 时第 7 号台风“Janis”的 900~600 hPa 厚度差(填色)
Fig. 8 Distribution of thickness (colored) between 900 hPa and 600 hPa of Typhoon Janis at (a) 06:00 UTC and (b) 18:00 UTC 24 August 1995

(右)侧厚度减少(增加),不能与大部分个例左偏的结果很好对应。其中6个与最优环境引导气流方向偏折角在 5° 以内(红色散点),有3个强度非常弱,其登陆时刻的中心海平面气压均在990 hPa左右,沿海地形引起对流导致气旋前进方向左右侧厚度差异变化并不显著。

上述分析表明,临近登陆时刻沿海地形导致台风左侧对流活动更容易发展(约80%),并引起其路径左偏。但登陆台风左侧对流发展,也可以使原本不对称性较大的台风趋于对称,因此,在实际业务应用中不能仅仅简单地依据不对称性的大小(热力不对称参数绝对值)判断路径偏折的可能角度,而应该更关注临近登陆时刻不对称性的变化,做出更准确的判断决策。

5 结论与讨论

利用中国气象局最佳路径数据集和欧洲中心ERA5再分析资料,对1950—2022年登陆华东北部(浙江、上海及江苏)的台风路径相对于引导气流的偏折特征进行了统计分析,主要得出以下结论:

(1)在54个登陆台风中,85.2%在临近登陆时刻台风实际移动路径相对引导气流出现左偏(偏折角度大于 5°),临近登陆时刻的偏折角度中值为 14.25° ,登陆前一日平均的偏折角度中值为 8.15° ,临近登陆时刻沿海地形对于台风移动偏离引导气流平均会产生 $6^{\circ}\sim 7^{\circ}$ 的偏折角度。

(2)临近登陆时刻台风实际移动路径与引导气流之间的偏折角度与热力不对称参数有较好对应关系。热力结构接近对称的气旋一般对应较小的偏折角度,而明显的热力不对称结构,会使得台风实际移动路径与引导气流之间的偏折角度在临近登陆前偏大的可能性增加。

(3)沿海地形在临近登陆时刻易激发气旋前进方向左侧不对称对流活动,对流层低层厚度的增加影响热力结构分布,引起台风实际移动路径往引导气流方向左偏。但登陆台风左侧对流发展,也可使原本不对称性较大的台风趋于对称,取决于登陆前的热力不对称分布。

多因子影响台风路径的动力学极其复杂,特别是在临近登陆时刻。最优环境引导气流在大部分时

间均与实际台风移动路径较好吻合,为分析临近登陆时刻路径偏差以及其与不对称热力结构的关系提供了较好帮助。同时热力不对称参数能较好地表征气旋在对流层低层的热力不对称结构,以及受下垫面影响激发的对流活动,且时空演变上较为平稳,受平均范围的影响较小。

但动力不对称结构与路径偏离引导气流角度的关系并不紧密,研究也尝试了多种不同的动力不对称参数定义方法,例如更低层的900 hPa风场在引导气流前进方向左右两侧的差值,涡度场在引导气流前进方向左右两侧的差值,900~600 hPa平均风场在地理位置左右两侧的差值,西北与东南象限差值,东北和西南象限差值,均没有找到各种不同定义方法下的动力不对称参数与临近登陆时刻偏折角度较好的对应关系,可能是临近登陆时刻低层风场具体分布会更为复杂,需要更深入的机制方面的探究。关于不对称环流和不对称热力结构演变对台风移动路径的影响也有待于通过数值试验进一步深入研究。

参考文献

- 陈联寿,丁一汇,1979.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社:211-213. Chen L S, Ding Y H, 1979. Introduction to Typhoons in the Western Pacific[M]. Beijing: Science Press: 211-213 (in Chinese).
- 陈联寿,徐祥德,罗哲贤,等,2002.热带气旋动力学引论[M].北京:气象出版社:143-144. Chen L S, Xu X D, Luo Z X, et al, 2002. Introduction to the Dynamics of Tropical Cyclones[M]. Beijing: China Meteorological Press: 143-144 (in Chinese).
- 陈联寿,徐祥德,解以扬,等,1997.台风异常运动及其外区热力不稳定不对称结构的影响效应[J].大气科学,21(1):83-90. Chen L S, Xu X D, Xie Y Y, et al, 1997. The effect of tropical cyclone asymmetric thermodynamic structure on its unusual motion[J]. Sci Atmos Sin, 21(1): 83-90 (in Chinese).
- 陈涛,董林,罗玲,等,2021.台风利奇马登陆期间的对流结构特征及对强降雨影响[J].气象,47(12):1433-1443. Chen T, Dong L, Luo L, et al, 2021. Convection structure and impact on severe precipitation during landing of Typhoon Lekima [J]. Meteor Mon, 47(12): 1433-1443 (in Chinese).
- 郭蓉,雷小途,郭品文,2011.“相空间”方法判断西北太平洋热带气旋变性适用性研究[J].热带气象学报,27(2):257-263. Guo R, Lei X T, Guo P W, 2011. A study on the criterion of extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones [J]. J Trop Meteor, 27(2): 257-263 (in Chinese).
- 黄燕燕,蒙伟光,冯业荣,等,2023.华南登陆台风降水不对称性及持

- 续性问题[J]. 气象, 49(4): 385-399. Huang Y Y, Meng W G, Feng Y R, et al, 2023. Problems in asymmetry and sustainability of landfalling typhoon precipitation over South China[J]. Meteor Mon, 49(4): 385-399(in Chinese).
- 姜丽萍, 夏冠聪, 尤红, 等, 2008. “珍珠”台风强度及路径异常的分析[J]. 台湾海峡, 27(1): 124-128. Jiang L P, Xia G C, You H, et al, 2008. Analysis on the abnormal intention and track of Typhoon “Chanchu”[J]. J Oceanogr Taiwan Strait, 27(1): 124-128(in Chinese).
- 李天然, 吴婉萍, 林良勋, 2006. 强台风“珍珠”异常路径的特点、成因及预报[J]. 广东气象, (3): 18-22. Li T R, Wu W P, Lin L X, 2006. Analysis and prediction on the abnormal track of Strong Typhoon “Chanchu”[J]. Guangdong Meteor, (3): 18-22(in Chinese).
- 李霞, 何如意, 段朝霞, 等, 2014. 台风“韦森特”路径突变和近海加强的成因分析[J]. 热带气象学报, 30(3): 533-541. Li X, He R Y, Duan Z X, et al, 2014. Analysis on the unusual track and intensification of Typhoon “Vicente”[J]. J Trop Meteor, 30(3): 533-541(in Chinese).
- 梁军, 张胜军, 贾旭轩, 等, 2024. 登陆北上台风结构变化及其引发的辽东半岛强降水分析[J]. 气象, 50(11): 1306-1316. Liang J, Zhang S J, Jia X X, et al, 2024. Analysis on structure changes of landfall northbound typhoons and the heavy precipitation in Liaodong Peninsula induced by them[J]. Meteor Mon, 50(11): 1306-1316(in Chinese).
- 罗哲贤, 平凡, 2012. 眉状中尺度涡影响热带气旋路径的机理研究[J]. 中国科学: 地球科学, 42(2): 290-300. Luo Z X, Ping F, 2012. Mechanism for initial brows-like meso-scale vortex effects on tropical cyclone track[J]. Sci China Earth Sci, 42(2): 290-300(in Chinese).
- 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿, 1998. 台湾岛地形诱发次级环流系统对热带气旋异常运动的影响机制[J]. 大气科学, 22(2): 156-168. Meng Z Y, Xu X D, Chen L S, 1998. Mechanism of the impact of the cyclone system induced by the Taiwan Island topography on tropical cyclone unusual motion[J]. Sci Atmos Sin, 22(2): 156-168(in Chinese).
- 王海祯, 2021. 西北太平洋台风尺度与强度变化之间关系初探[J]. 气象与减灾研究, 44(4): 274-279. Niu H Z, 2021. A preliminary study on the relationship between tropical cyclone size and intensity over the Northwest Pacific[J]. Meteor Dis Reduct Res, 44(4): 274-279(in Chinese).
- 王新伟, 罗哲贤, 马革兰, 等, 2015. 热带气旋 Meranti(2010)异常路径的成因分析[J]. 大气科学学报, 38(1): 37-45. Wang X W, Luo Z X, Ma G L, et al, 2015. Cause analysis on abnormal track of Tropical Cyclone Meranti (2010)[J]. Trans Atmos Sci, 38(1): 37-45(in Chinese).
- 吴胜蓝, 漆梁波, 邹兰军, 2023. 台风灿都路径预报中的非绝热加热因子分析[J]. 气象, 49(7): 805-818. Wu S L, Qi L B, Zou L J, 2023. Analysis of diabatic heating factor in track forecast of Typhoon Chanthu[J]. Meteor Mon, 49(7): 805-818(in Chinese).
- 余晖, 1999. 斜压大气中环流不对称结构与台风移速关系的数值研究[J]. 气象学报, 57(6): 694-704. Yu H, 1999. A numerical study on the relationship between the asymmetric structure and moving velocity of typhoon in baroclinic atmosphere[J]. Acta Meteor Sin, 57(6): 694-704(in Chinese).
- 袁敏, 平凡, 李国平, 2018. 台风“梅花”路径转折期间的结构特征分析与模拟[J]. 大气科学, 42(5): 1000-1012. Yuan M, Ping F, Li G P, et al, 2018. Diagnostic study and numerical simulation on the structure of Typhoon “Muifa” during its two recurving processes[J]. Chin J Atmos Sci, 42(5): 1000-1012(in Chinese).
- 张灵杰, 2020. 近年来台风登陆台湾岛后路径偏折的若干统计特征[J]. 浙江气象, 41(1): 15-19, 38. Zhang L J, 2020. Statistical characteristics of typhoon track deflection after landfall in Taiwan in recent years[J]. J Zhejiang Meteor, 41(1): 15-19, 38(in Chinese).
- Chan J C L, Gray W M, 1982. Tropical cyclone motion and surrounding flow relationships[J]. Mon Wea Rev, 110(10): 1354-1374.
- Chan J C L, Ko F M F, Lei Y M, 2002. Relationship between potential vorticity tendency and tropical cyclone motion[J]. J Atmos Sci, 59(8): 1317-1336.
- Chen L S, Luo Z X, 1995. Some relations between asymmetric structure and motion of typhoons[J]. Acta Meteor Sin, 9(4): 412-419.
- Chen L S, Luo Z X, 1998. Numerical study on functions affecting tropical cyclone structure and motion[J]. Acta Meteor Sin, 12(4): 504-512.
- Dai Y F, Li Q Q, Wang L J, et al, 2022. Examining asymmetric outer-core CAPE in sheared tropical cyclones based on the FNL data set[J]. Front Earth Sci, 16(3): 734-743.
- Feng J, Judt F, Zhang J, et al, 2024. Influence of region-dependent error growth on the predictability of track and intensity of Typhoon Chan-hom (2020) in high-resolution HWRP ensembles[J]. Atmos Res, 308: 107536.
- Galarneau T J, Davis C A, 2013. Diagnosing forecast errors in tropical cyclone motion[J]. Mon Wea Rev, 141(2): 405-430.
- Hart R E, 2003. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry[J]. Mon Wea Rev, 131(4): 585-616.
- Li Y B, Cheung K K W, Chan J C L, 2014. Numerical study on the development of asymmetric convection and vertical wind shear during tropical cyclone landfall[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 140(683): 1866-1877.
- Lu X Q, Yu H, Ying M, et al, 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. Adv Atmos Sci, 38(4): 690-699.
- Luo Z X, Ping F, 2012. Mechanism for initial brows-like meso-scale vortex effects on tropical cyclone track[J]. Sci China Earth Sci, 55(4): 611-621.

- Peng X D, Fei J F, Huang X G, et al, 2017. Evaluation and error analysis of official forecasts of tropical cyclones during 2005-14 over the Western North Pacific. Part I: storm tracks[J]. *Wea Forecasting*, 32(2): 689-712.
- Qian W H, Shan X L, Liang H Y, et al, 2014. A generalized beta-advection model to improve unusual typhoon track prediction by decomposing total flow into climatic and anomalous flows[J]. *J Geophys Res*, 119(3): 1097-1117.
- Rios-Berrios R, Torn R D, 2017. Climatological analysis of tropical cyclone intensity changes under moderate vertical wind shear [J]. *Mon Wea Rev*, 145(5): 1717-1738.
- 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.
- Wong M L M, Chan J C L, 2006. Tropical cyclone motion in response to land surface friction[J]. *J Atmos Sci*, 63(4): 1324-1337.
- Wu L G, Wang B, 2000. A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion[J]. *Mon Wea Rev*, 128(6): 1899-1911.
- Yeh T C, Elsberry R L, 1993a. Interaction of typhoon with the Taiwan orography. Part I: upstream track deflections[J]. *Mon Wea Rev*, 121(12): 3193-3212.
- Yeh T C, Elsberry R L, 1993b. Interaction of typhoons with the Taiwan orography. Part II: continuous and discontinuous tracks across the Island[J]. *Mon Wea Rev*, 121(12): 3213-3233.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 31(2): 287-301.
- Yu H, Huang W, Duan Y H, et al, 2007. A simulation study on pre-landfall erratic track of Typhoon Haitang (2005) [J]. *Meteor Atmos Phys*, 97(1): 189-206.

(本文责编:何晓欢)