

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).

台风灿都路径预报中的非绝热加热因子分析*

吴胜蓝 漆梁波 邹兰军

上海中心气象台, 上海 200030

提 要: 依据欧洲中期天气预报中心集合预报系统(EC-EPS)预报产品, 采用位涡趋势诊断方法, 对比分析了台风灿都路径预报差异较大的两个集合成员各物理因子的贡献。结果表明两个集合成员的台风中心均朝位涡趋势一波分量最大的位置移动, 且大多数时刻水平平流项的贡献是最大的, 其次是非绝热加热项, 垂直平流项的贡献相对较小。两个成员路径分叉时刻的位涡趋势差异主要由非绝热加热项引起, 而分叉之后位涡趋势仍主要由水平平流项(即引导气流)主导。在路径分叉时刻, 两个集合成员预报的非对称对流活动也表现出不一样的分布, 且都与诊断的非绝热加热项方向较为一致, 即非对称对流结构和加热率的水平梯度在引导气流偏弱时对台风移动可能起到关键作用。非对称对流活动出现主要受水汽、潜在不稳定条件以及低层急流等环境因子的影响。分析表明, 在近海台风路径预报中, 尤其是引导气流偏弱的情况下, 加强对非绝热加热过程(对流活动发展趋势及非对称结构)的分析, 有助于做出更精准的路径预报。

关键词: 台风路径, 业务预报, 位涡趋势诊断, 非对称对流

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.122201

Analysis of Diabatic Heating Factor in Track Forecast of Typhoon Chanthu

WU Shenglan QI Liangbo ZOU Lanjun

Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

Abstract: Based on the ECMWF ensemble prediction system (EC-EPS) and the potential vorticity tendency (PVT) diagnosis, this paper examines the contributions of physical factors to track forecast of Typhoon Chanthu (2114) by comparing two distinct ensemble members. It is found that the typhoon centers of two ensembles both move towards the area with the largest wave number one component (WN1) of PVT. The contribution of the horizontal advection term is dominant most of the time, followed by the diabatic heating term, and the contribution of the vertical advection term is relatively small. The PVT discrepancy of the two members at bifurcation time is mainly attributed to the diabatic heating term, while that after the bifurcation time is still dominated by the horizontal advection term (i. e., steering flow). The asymmetric convective activities of two ensemble members also show different distributions at bifurcation time, which is consistent with the direction of diabatic heating, that is, the asymmetric convective structure and the vertical gradient of diabatic heating may play a key role in the movement of typhoon when the steering flow is weak, which is largely affected by the environmental factors such as water vapor, potential instability, and low-level jet. This research emphasizes the impact of diabatic heating processes (including development and asymmetric structure of convective activities) in typhoon track forecast for more accurate prediction when steering flow is weak.

* 长三角科技创新共同体领域项目(21002410200)、中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-043)共同资助

2022 年 5 月 17 日收稿; 2023 年 2 月 9 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

Key words: typhoon track, operational forecast, potential vorticity tendency diagnosis, asymmetric convection

引 言

20 世纪 90 年代以来,我国台风业务预报水平不断进步,路径综合预报偏差逐年减小,基本与世界领先水平相当(陈联寿,2006;许映龙等,2010;钱传海等,2012;陈国民等,2019;2021;王海平和董林,2020)。但针对台风异常路径或引导气流偏弱的情况下,部分台风路径的预报仍然会出现较大的偏差(徐晶等,1999;张玲和黄奕武,2013;许映龙等,2015;杨琼琼和吴立广,2015;董林等,2020;王海平等,2022)。台风路径预报偏差会直接影响降水、大风落区以及受灾范围的预报,因此近海台风路径业务预报的精准性尤为关键。

早期台风路径预报的研究认为,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(陈联寿和丁一汇,1979;Chan and Gray,1982)。而业务中常用的引导气流分析与实际台风移动路径仍存在较大差异,主要原因是由 β 效应引起的涡旋环流之间存在的通风流所造成的涡旋移动,简称 β 漂移理论(Holland,1983;Fiorino and Elsberry,1989;Peng and Williams,1990)。随着通风流理论进一步扩展到斜压的情况,Wu and Wang(2000)提出了一个更加普遍适用的诊断台风路径的动力学框架,他们在无大尺度环流的 β 平面理想试验中指出,涡旋会朝着位势涡度趋势的一波分量最大的区域移动。位涡趋势诊断方法包含了垂直切变和潜热释放所引起的大气温度结构的改变,以及台风内部垂直耦合的作用,同时也可以解决位涡反演方法的假设大气参考状态对结果产生的影响(Wu and Emanuel,1993;1995a;1995b)。吴玉琴等(2015)进一步考虑台风不对称环流结构影响,对位涡诊断方法进行了改进。许多观测结果和模式检验都证实了位涡趋势诊断方法在不同台风移动类型中的有效性(Wu and Wang,2001a;2001b;Wong and Chan,2007)。其中,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。

关于非绝热加热因子的作用,其实早在几十年前就有学者基于卫星图像提出热带气旋会倾向在发展最旺盛的积雨云团的边缘移动(距离热带气旋中心 200~600 km 处)。陈联寿等(1997)通过数值模拟揭示台风的热力不对称结构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。除此以外,在理论研究方面,Willoughby(1992)使用正压模型和质量源-汇模拟对流的影响,指出涡旋将远离源并向汇移动。Wang and Holland(1995;1996)从原始方程模型出发,发现零星的对流单体可能会引起台风路径的振荡。所有这些观测模拟以及理论的研究均指出不对称的对流活动对于台风移动会起到关键的作用。在应用方面,还有直接基于卫星图像输入的神经网络算法可以作为简易预测气旋路径的辅助手段(Kovordányi and Roy,2009)。但非绝热加热对位涡趋势的贡献不是简单的对流加热,还取决于对流加热的梯度与垂直风切作用,Wu and Wang(2001b)提出垂直风切会在一定程度上引起涡旋结构的倾斜,但非对称的加热通过快速调整可以起到抵消风切引起的倾斜趋势,所以非绝热加热对斜压台风的垂直耦合起到重要作用。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 GRAPES-TCM,指出与非绝热加热有关的位相锁定被认为是位涡强迫及台风海棠(2005 年)在台湾登陆前回旋和转折的主要贡献因子。

2021 年台风灿都沿浙江近海北上,并在东海海面缓慢移动回旋,15 日开始转向偏东和东北方向移动,对沿海地区风雨影响巨大。当时各业务综合预报均预测其会在浙北或上海登陆,而近海台风登陆与否,需采取明显不同的防御策略和手段,路径预报偏差尤其是是否登陆对气象服务效益的影响是巨大的。因此,探究“灿都”近海路径预报偏差的具体成因非常必要。本文将通过对欧洲中期天气预报中心集合预报系统(以下简称 EC-EPS)的不同成员的表现,依据位涡趋势方法诊断分析影响近海台风路径的主要因素,重点分析非绝热加热因子对台风移动趋势的影响,并回顾和总结在“灿都”的实时业务预报中,如何具体考量非绝热加热因子对路径预报

决策的影响。

1 资料和方法

(1)欧洲中期天气预报中心集合预报系统各预报成员(EC-EPS,共 51 个)的水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,预报时效间隔为 6 h。本文预报开始时选取 2021 年 9 月 10 日 12 时(世界时,下同),该时次台风灿都中心位于台湾海峡南侧,且各集合预报成员间离散度较大,部分成员预测“灿都”将在福建、浙江、上海等地登陆,另外的成员则预测“灿都”直接北上或北到东北行。本文挑选了第 5 号和第 6 号集合成员(分别简称 EN05 和 EN06)作为代表进行诊断对比分析,两个集合成员的预报路径(图 1)在 12 日 12 时之前沿台湾海峡东侧向北移动,12 日 12 时(预报时效 48 h)到达台湾海峡北部附近并开始产生分歧。EN05 路径向西偏折登陆,而 EN06 则与中央气象台业务实时定位较为吻合,沿海岸线向北移动,没有登陆。

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

(3)2021 年 9 月 10 日 12 时至 12 日 12 时 FY-4A $10.8 \mu\text{m}$ 的红外云图资料(<http://rsapp.nsmc.org.cn>),最小时间分辨率为 5 min。

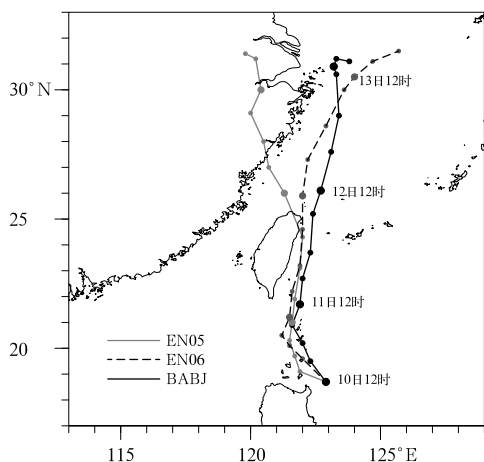


图 1 中央气象台业务实时定位和 ECMWF 集合预报成员(EN05 和 EN06)在 2021 年 9 月 10 日 12 时起报的台风灿都路径
Fig. 1 The operational real-time typhoon data of National Meteorological Centre and ECMWF ensemble prediction EN05 and EN06 of Typhoon Chanthu starting from 1200 UTC 10 September 2021

诊断方法参照 Wu and Wang(2000)提出的位涡趋势动力学框架,台风会朝着位涡趋势一波分量最大的区域运动,即

$$-\mathbf{C} \cdot \nabla \mathbf{P}_s = \frac{\partial \mathbf{P}_1}{\partial t} \quad (1)$$

式中: \mathbf{C} 代表台风运动的分量, \mathbf{P}_s 和 \mathbf{P}_1 分别代表位涡的对称和一波分量。 $\partial \mathbf{P}_1 / \partial t$ 最大值的位置决定了台风的移动方位。同时,Wu and Wang(2000)指出在非绝热加热存在时,位涡趋势是由以下四项物理过程所引起的:

$$\frac{\partial \mathbf{P}_1}{\partial t} = \Delta_1 (\text{HA} + \text{VA} + \text{DH} + \text{F}) \quad (2)$$

式中 Δ_1 代表一波算子。方程右侧共四项,分别为水平平流项(HA)、垂直平流项(VA)、非绝热加热项(DH)和摩擦以及次网格项(F)的贡献。位涡诊断方程右侧所有项都要经过傅里叶分解求取一波分量。

水平平流项已经包含了行星涡度的经向变化,即 β 效应的作用。同时,垂直风切引起的水平位涡梯度和 β 效应有时会产生相反的贡献(Shapiro, 1992),就不用再单独考虑 β 效应的影响。在台风眼墙之外,除了对流层顶附近位涡梯度较大的地方,垂直平流的贡献可能很小,而摩擦项的作用仅在边界层较为显著。因此,可以推测台风的移动主要由水平平流和非绝热加热项所引起的。而非绝热加热项取决于对流加热的水平及垂直加热梯度。

由于 EC 集合预报提供的数据变量有限,无法直接计算位涡诊断方程右侧所有项的贡献,但可以通过某些近似对非绝热加热项进行合理的估计,结合可以直接计算的水平平流以及垂直平流项,对位涡诊断框架进行有效评估和定量诊断。根据 May and Rajopadhyaya(1996),加热率可以表示为:

$$Q = \omega \frac{\partial s}{\partial p} \quad (3)$$

式中: ω 是垂直速度, p 是气压, s 代表静力能(Yanai et al,1973),可以表示为:

$$s = gz + c_p T \quad (4)$$

式中: g 是重力加速度, z 代表高度, c_p 是定压比热, T 是温度,根据静力平衡假设,加热率可以改写成:

$$Q = \omega \left(c_p \frac{\partial T}{\partial p} - \frac{1}{\rho} \right) \quad (5)$$

式中 ρ 是空气的密度。这样加热率 Q 可以直接由式(5)计算,于是根据 Wu and Wang(2000),非绝热加热项可以表示为:

$$DH = g \left[- (f + \zeta) \frac{\partial Q}{\partial p} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial Q}{\partial x} \right] \quad (6)$$

式中： u 和 v 是纬向和经向风分量， f 是科氏参数， ζ 是相对涡度。求取特定高度的非绝热加热项，所以 DH 的一波分量可以表示为：

$$DH_1 = \Delta_1 \left[g \left(- \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \right] \quad (7)$$

可以看出 DH 项的一波分量主要取决于 Q 的水平梯度以及垂直风切。

计算各项物理过程的估算速度参考 Wu and Wang(2000)和吴玉琴等(2015)的计算方法，均以预测台风中心为中心，25~200 km 的区域进行计算，垂直层采用 850~500 hPa 的平均。这一层距离边界层和出流层都有一定距离，所以摩擦项和出流项的贡献可以忽略不计。

2 位涡趋势方法诊断

位涡趋势诊断方法指出台风会朝着位涡趋势一波分量最大的位置移动。如上文所述，从 2021 年

9月10日12时起报的EC-EPS结果看，在12日12时之前，各集合成员发散度小，大致沿着台湾海峡东侧沿海向北到东北方向移动，12时后各成员的预报离散度加大，较多成员预报登陆浙江或上海，少部分成员预报沿海北上。以下分别挑选 EN05(登陆成员)和 EN06(不登陆成员)来开展位涡趋势诊断分析。

图 2 分别展示了 EN05 和 EN06 预测的台风路径的移向和移速，以及通过位涡趋势诊断的总体移向和移速。可以看到两者基本能实现较好的吻合，特别是在移向方面误差较小(图 2b 和 2d)，但有时两者也存在较大的差异，主要是发生在模式预报的最初时段(10 日 12 时和 18 时)。同时可以看到在 12 日 12 时之后，EN05 和 EN06 分别朝着西北方向和东北方向移动(图 2b 和 2d)。

为了分析台风路径产生分叉的主要原因，图 3 诊断了不同物理项对总体位涡趋势的贡献，包括 HA、VA 和 DH。各项对移速的贡献是通过台风中心 25~200 km 半径的平均振幅进行计算的，移动的方向取决于最大振幅所处的方位。与 Chan et al (2002)和 Yu et al(2007)研究结果类似，大多数时

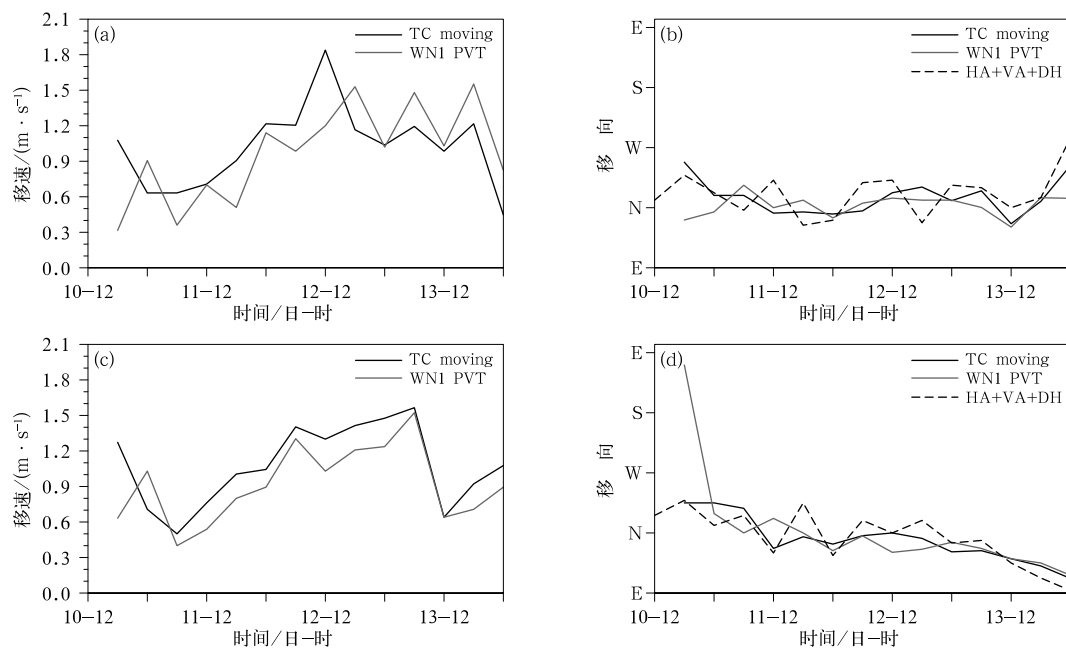


图 2 2021 年台风灿都(a,b)EN05 和(c,d)EN06 预测的(a,c)台风移速和距离位涡趋势

诊断中心 25~200 km 的平均台风移速,(b,d)台风移向、位涡趋势诊断的

台风移向,以及水平平流项(HA)、垂直平流项(VA)和非绝热加热项(DH)综合诊断的台风移向

Fig. 2 Temporal evolutions of TC (a, c) moving speed and amplitude of WN1 PVT in 25-200 km

radius, (b, d) moving direction, phases of maximum WN1 PVT, and WN1 HA,

VA and DH terms of Typhoon Chanthu in 2021 predicted for (a, b) EN05 and (c, d) EN06

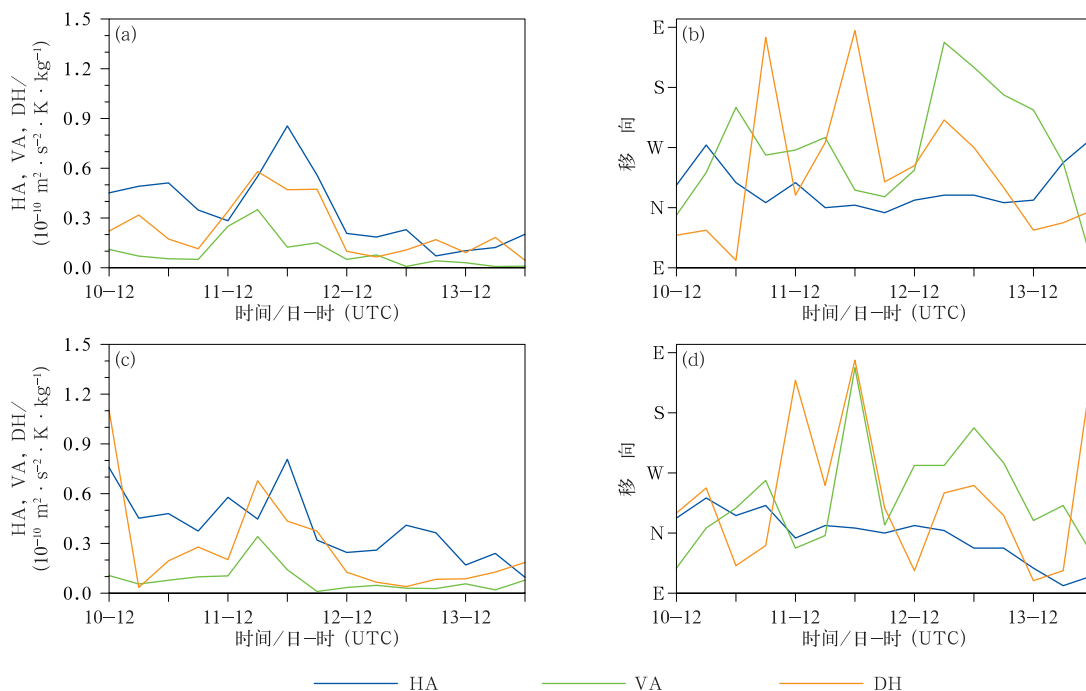


图 3 2021 年台风灿都(a,b)EN05 和(c,d)EN06 位涡趋势诊断水平平流项(HA)、垂直平流项(VA) 和非绝热加热项(DH)对(a,c)台风移速振幅和(b,d)台风移向的贡献

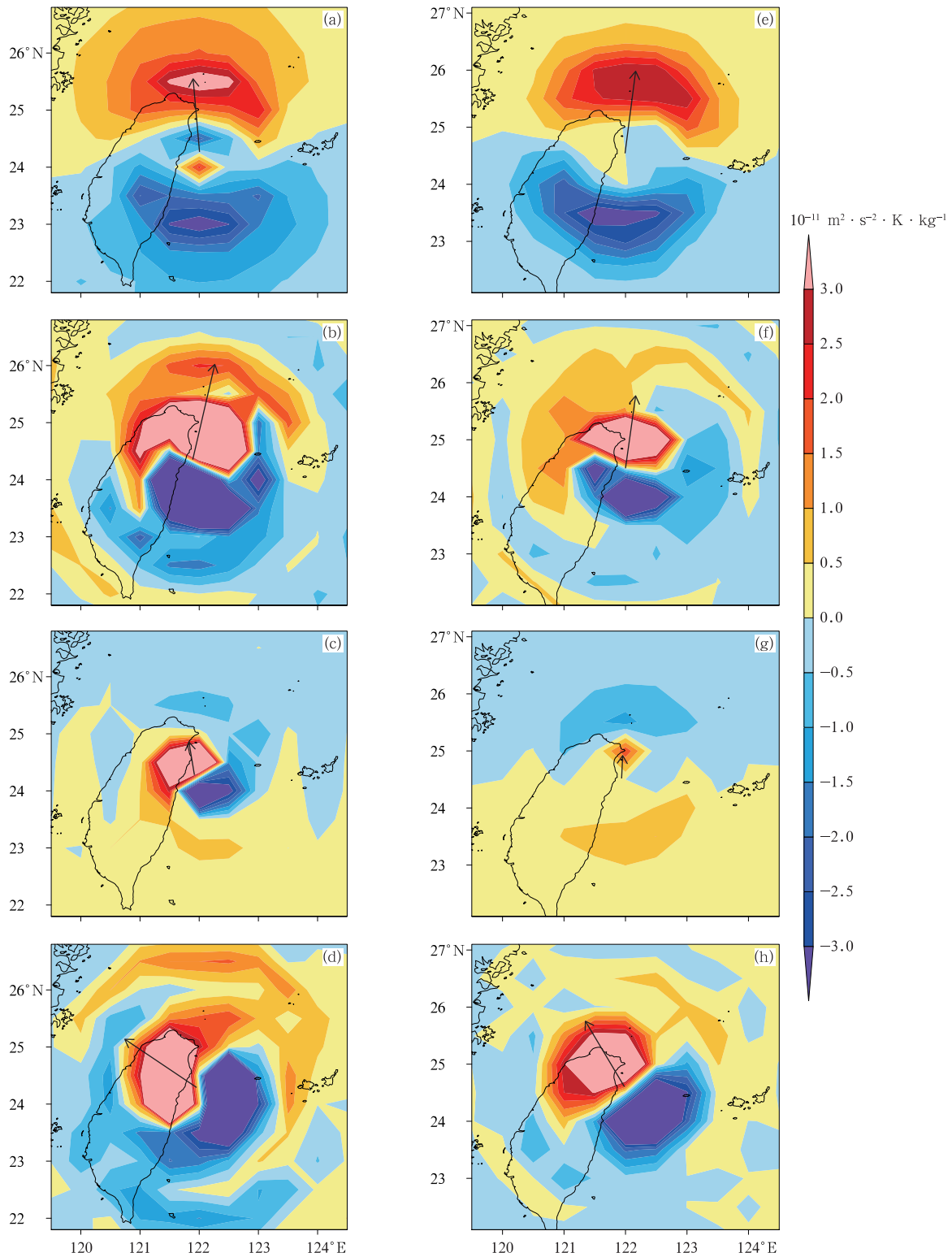
Fig. 3 Contributions of WN1 HA, WN1 VA, and WN1 DH predicted for (a, b) EN05 and (c, d) EN06 to (a, c) amplitude and (b, d) moving direction of Typhoon Chanthu in 2021

刻 HA 的贡献是最大的,接着是 DH,VA 的贡献相对较小。在 12 日 12 时之后各项的贡献均有所减小,主要是由于经过台湾海峡的地形摩擦作用,台风整体强度减弱,位涡和位涡趋势都有所减弱,此时引导气流有所减弱,但 HA 的贡献仍然是大于 DH 的贡献(图 3a 和 3c)。

从移动方向上来看(图 3b 和 3d),三项的整体贡献与位涡趋势的方向还是较为一致的(图 2b 和 2d),产生的差值大部分是由于无法计算的摩擦项以及次网格过程所引起的。整体来看,位涡趋势诊断各项物理过程之和与方程左侧较为吻合,验证了方法及计算的可靠性。两个集合成员之间,HA 和 DH 在 12 日 12 时之前是接近一致的,VA 在某些时刻有较大差异(如 12 日 00 时),但由于振幅偏小,产生的影响也较为有限(图 3b 和 3d)。在 12 日 12 时,两组成员 DH 方向突然发生较大偏差,虽然振幅相较前一时刻有所减小,但 HA 和总体位涡趋势也同时减小,所以还是对位涡趋势最大强度的位置以及台风的移动路径开始分叉产生了较大的影响。在 12 日 12 时之后,两个成员 DH 的方向又接近一致,但 HA 的方向产生了一些变化,EN05 和 EN06 方向分别向西和向东偏移,对两个成员间位涡趋势以

及台风的移动路径进一步分叉起到较大的作用。同时还可以注意到,HA 的方向一直较稳定在朝西北或东北方向,而 DH 在方向上相比 HA 有更大的不确定性,一方面是因为估算 DH 的作用依靠简单的温度垂直梯度,加热的水平梯度和垂直风切的变化,近似估计存在一定的误差。另一方面,非绝热加热包含潜热感热等微物理项变化,也是模式模拟较为薄弱的部分,所以振荡较为明显。

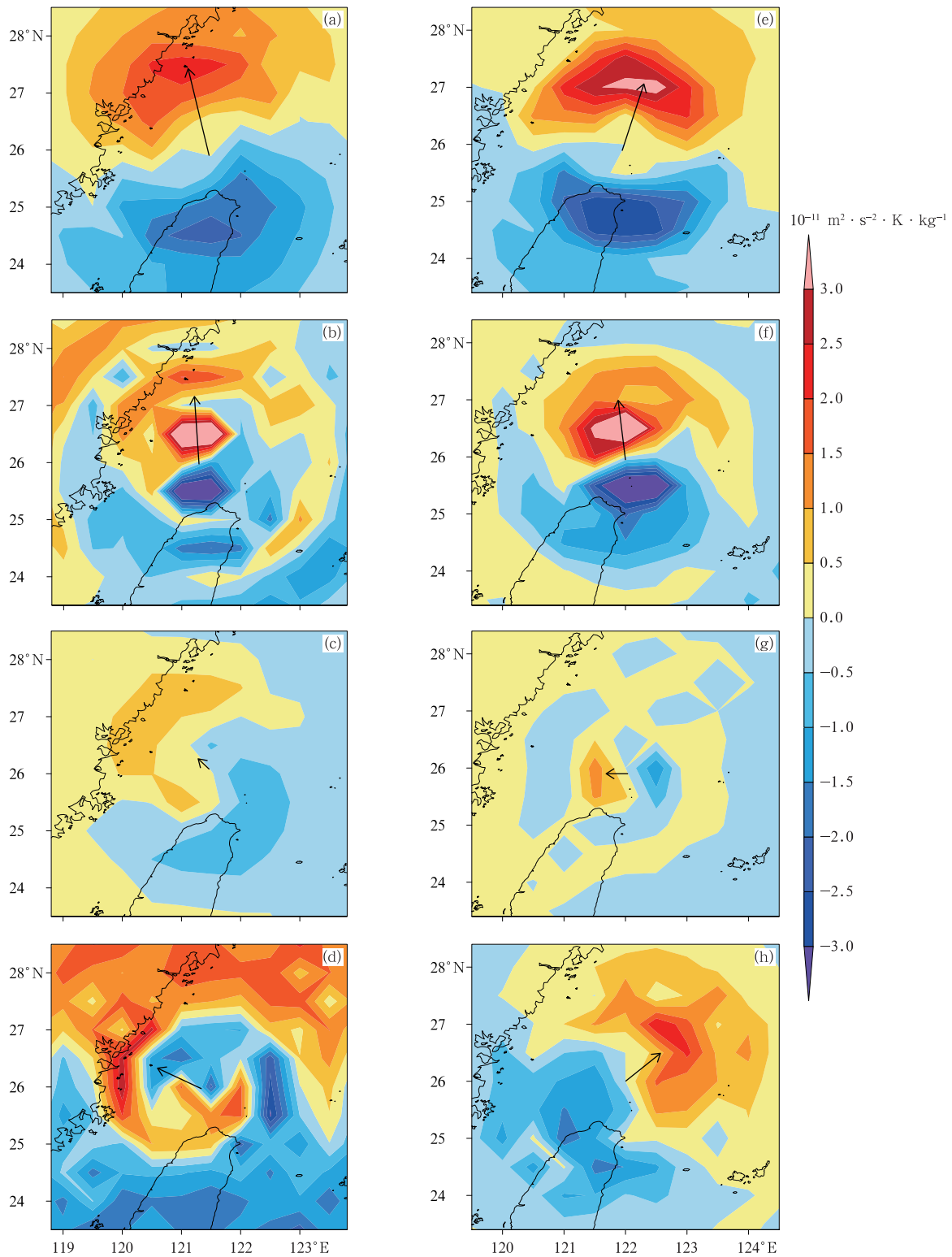
从具体的总位涡趋势和其他各项的一波分量,可以更清楚地看到总体的移动趋势以及各项物理过程对台风移动的贡献分量。12 日 06 时,台风中心位置和总体位涡趋势在两个集合成员间还没有太大的区别,都是向北移动的趋势(图 4a 和 4e)。由于台风中心选用的是业务实时定位,而不是位涡最大的位置,所以在求取一波分量的时候就不是刚好对称分布的形态(图 4a)。各项物理过程也没有明显的区别,HA 和 DH 对移动的贡献较大,分别是东北和西北分量(图 4b,4d,4f 和 4h),而 VA 的贡献相对偏小,是朝北的分量(图 4c 和 4g)。到 12 日 12 时,中心位置没有明显区别,但总体位涡趋势在 EN05 和 EN06 间已经有明显不同,EN05 是朝北偏西移动的趋势,而 EN06(图 5e)是朝北偏东移动的趋势,移动



注:箭头:各项物理过程对台风移动的贡献分量。

图 4 2021 年 9 月 12 日 06 时台风灿都(a~d)EN05 和(e~h)EN06 多层平均(850~500 hPa)的位涡趋势诊断结果
(a,e)总位涡趋势诊断一波分量,(b,f)水平平流项(HA)一波分量,
(c,g)垂直平流项(VA)一波分量,(d,h)非绝热加热(DH)一波分量

Fig. 4 The multilayer (850–500 hPa) averaged diagnostic results of potential vorticity tendency for Typhoon Canthu at 0600 UTC 12 September 2021 predicted for (a–d) EN05 and (e–h) EN06
(a, e) WN1 PVT, (b, f) WN1 HA, (c, g) WN1 VA, (d, h) WN1 DH



注:箭头:各项物理过程对台风移动的贡献分量。

图 5 2021 年 9 月 12 日 12 时台风灿都(a~d)EN05 和(e~h)EN06 多层平均(850~500 hPa)的位涡趋势诊断结果 (a,e)总位涡趋势诊断一波分量,(b,f)水平平流项(HA)一波分量, (c,g)垂直平流项(VA)一波分量,(d,h)非绝热加热(DH)一波分量

Fig. 5 The multilayer (850–500 hPa) averaged diagnostic results of potential vorticity tendency for Typhoon Canthu at 1200 UTC 12 September 2021 predicted for (a–d) EN05 and (e–h) EN06 (a, e) WN1 PVT, (b, f) WN1 HA, (c, g) WN1 VA, (d, h) WN1 DH

速度在 EN05 中稍偏快一些(图 5a);此时 HA 的贡献仍没有明显的区别,只是相较前一个时刻振幅偏小(图 5b 和 5f);VA 的贡献非常小,几乎可以忽略不计(图 5c 和 5g);而 DH 项产生了较大区别,方向与位涡趋势方向是一致的,分别是向西北和东北的分量(图 5d 和 5h),也就是说此时刻台风移动的趋势和方向主要是由 DH 项贡献产生的,非绝热加热对于集合成员台风路径差异的产生起到重要作用。同时可以注意到,12 日 12 时各项的贡献相较前一时次都有所减小,但此时引导气流作用也是相对偏弱的,而 DH 的方向和位置起到了关键作用,同时内核外围的非绝热加热作用也较大,是不可忽略的。

3 对流活动及环境物理过程对台风运动的贡献

从位涡趋势诊断的结果可以得知,两个集合成员路径分叉主要是由非绝热加热造成的。从 12 日 12 时非对称的降水结构分布也能看到(图 6a 和 6b),EN05 的对流和降水活动主要集中在内核周围以及东南沿海地区,而 EN06 在东北象限外围区域也存在较明显的对流活动,且从流场的分布可以看到台风倒槽与之相适配。对比同时刻的 ERA5 再分析资料(图 6c),可以看到降水活动同样在台风中心东北象限十分活跃,与 EN06 的降水结构更为接近,只是台风倒槽没有特别明显。因此,加热率的水平梯度(即非对称的对流活动)是 DH 项中贡献较大

的,其是造成台风路径产生分叉的主要原因。

为了更一步验证东北象限的对流降水及非绝热加热是否是影响台风登陆与否的关键因素,本文选取了集合成员中登陆的 39 个成员(简称 Land)和未登陆的 12 个成员(简称 NoLand),对 12 日 12 时的降水结构进行合成分析(图 7),可以看到 Land 的对流和降水分布与 EN05 非常接近,主要集中在内核周围以及东南沿海地区,而 Noland 与 EN06 更相似,都在东北象限外围区域有明显降水。集合成员合成的降水结构进一步验证了 EN05 和 EN06 的代表性,同时也证实东北象限的对流降水是 DH 项对台风路径产生影响的直接原因。与王新伟等(2015)提出的台风周围非对称的对流系统会直接影响台风的移动,倾向朝发展最旺盛的积雨云团边缘移动是较为一致的。

从 FY-4A 卫星红外云图,可以更清楚地了解东北象限对流活动的发展演变(图 8)。10 日 12 时,台风中心位于台湾海峡东南侧,内核区对流活动旺盛,能看到清晰的台风眼区且在北侧有螺旋雨带,台风倒槽较为明显;11 日 00—12 时,台风中心靠近海峡地区,强度稍有减弱,结构组织开始松散;12 日 00—06 时内核区域的对流活动重新组织,但外围由于地形摩擦,只在东北和西南象限有对流活动和螺旋雨带;12 日 12 时,内核区域以及西南象限的对流活动有所减弱,而东北象限在强水汽输送情况下对流旺盛,与 EN06 和 ERA5 再分析资料的降水结构较为一致(图 6b 和 6c)。

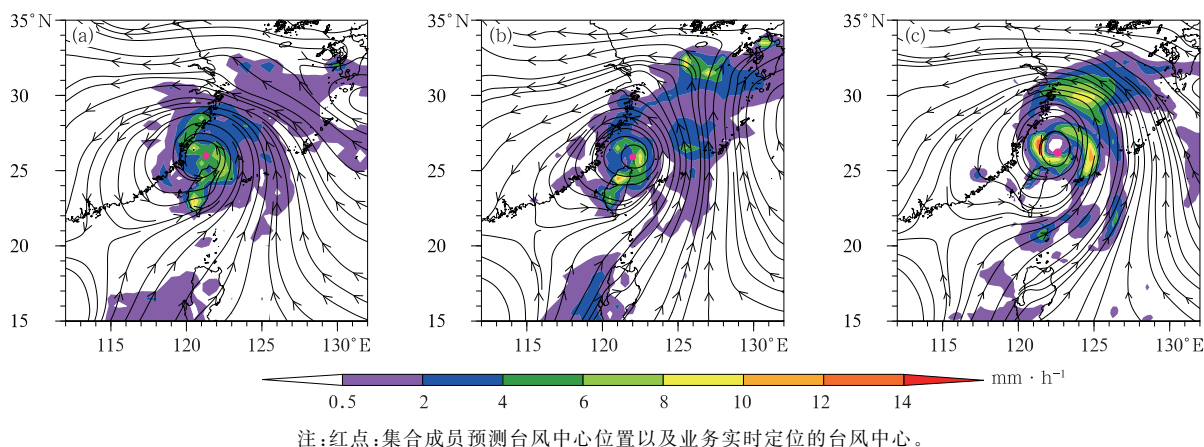


图 6 2021 年 9 月 12 日 12 时台风灿都的降水强度(填色)和 850 hPa 流场
(a)EN05, (b)EN06, (c)ERA5 再分析资料

Fig. 6 The precipitation rate (colored) and streamlines at 850 hPa of Typhoon Chanthu at 1200 UTC 12 September 2021
(a) EN05, (b) EN06, (c) ERA5 reanalysis data

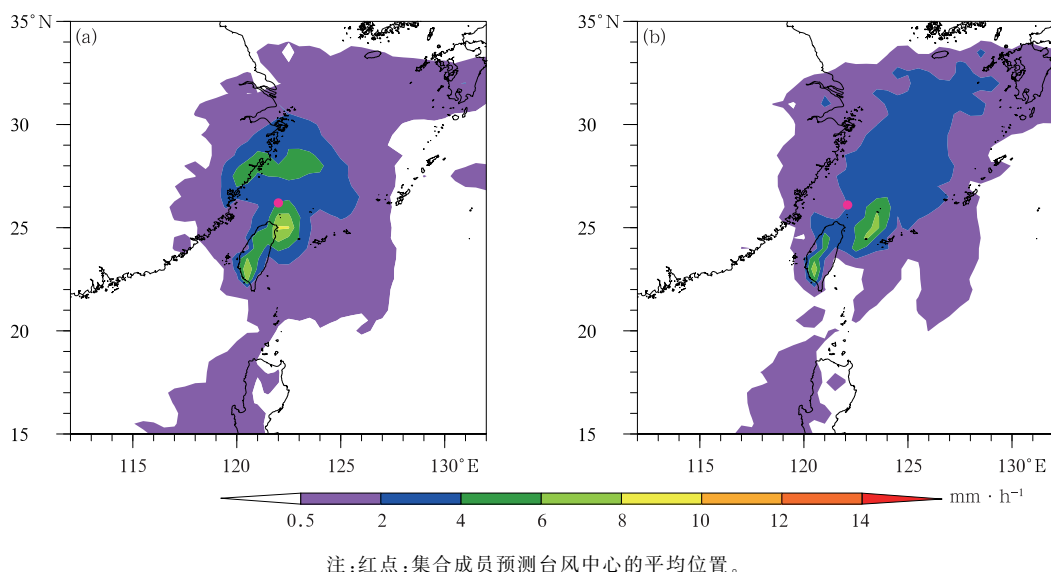


图 7 2021 年 9 月 12 日 12 时台风灿都集合成员的合成降水强度

(a) Land 集合成员, (b) NoLand 集合成员

Fig. 7 Composite precipitation rate of Typhoon Chanthu at 1200 UTC 12

September 2021 predicted by ensemble members

(a) Land ensemble members, (b) NoLand ensemble members

分析影响对流活动的环境和物理因子,对比两个集合成员中层水汽,EN05 内核区域的水汽条件明显高于 EN06(大于 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的范围),而 EN06 东北象限经过水汽输送存在大面积的高水汽带,东南沿海地区的水汽却明显比 EN05 偏低(图 9a 和 9b);同一时刻 ERA5 再分析资料更接近 EN06 的水汽分布,西北及西南象限偏干空气入侵内核中心对该区域对流活动的持续发展和组织化是较为不利的(图 9c)。从热力学条件出发,对比两个集合成员中低层温度差,台风北侧区域 EN05 温度差较大的地方($14 \sim 16^\circ\text{C}$)位于内核区及西北象限,而 EN06 位于台风中心北侧及东北象限,ERA5 再分析资料中整体中低层温度差都较小($12 \sim 14^\circ\text{C}$),北侧及东北象限存在小范围温度差较大的区域(图 9d~9f),中低层较大的温度差会增加潜在不稳定性,为该区域对流活动的发展提供较为有利的条件。从动力学角度,EN05 和 EN06 内核低层急流分别位于台风中心北侧及东侧,气旋性环流相应地在西北象限和东北象限有较强的辐合,对对流活动及 DH 项有较大的贡献(图 9g 和 9h);同一时刻 ERA5 再分析资料更接近 EN06 的偏南急流,在台风中心偏北侧及东北象限有较强辐合及对流活动发展。

4 业务实践中的非绝热加热因子分析

从欧洲中期天气预报中心精细化数值预报模式的结果来看,9 日 00 时起报的台风路径登陆台湾,但没有在东南沿海再次登陆,9 日 12 时起报的路径擦过台湾海峡,然后在浙江北部登陆,但没有深入内地,10 日 12 时起报,也就是上两节中诊断分析的起报时间,台风路径沿着台湾海峡东侧北上,在浙江北部登陆,然后在上海附近打转回旋,到 12 日 00 时起报,此时台风已经在台湾东部近海领域,然而其路径预报直接深入我国大陆且回旋数日(图 10)。单就是否登陆的结果来看,路径预报的准确度在时效变短的情况下是逐渐下降的,稳定性也较为欠缺。面对这种情况,在业务实践中,预报员需要有分析思路来对模式预报做一些修正,以减小预报误差,尤其是涉及到是否登陆。

对比不同时刻起报的 EC_high 模拟红外云图(图略),9 日 00 时和 12 时起报的 12 日 12 时对流活动基本呈偏东北—西南走向,和实际卫星云图观测资料是较为一致的,该两次预报也更为准确,而 10 日 12 时和 12 日 00 时起报的对流活动基本是呈

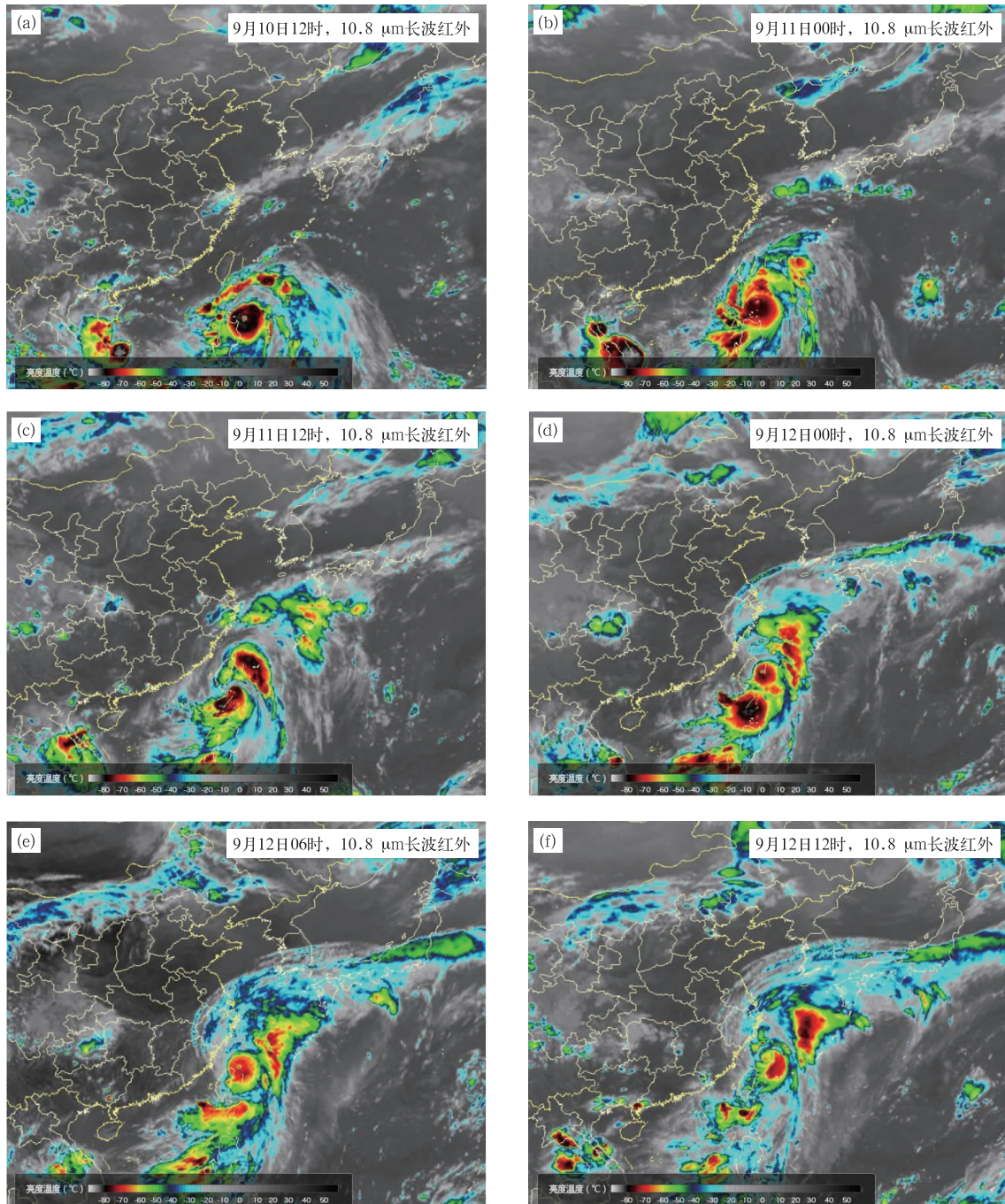
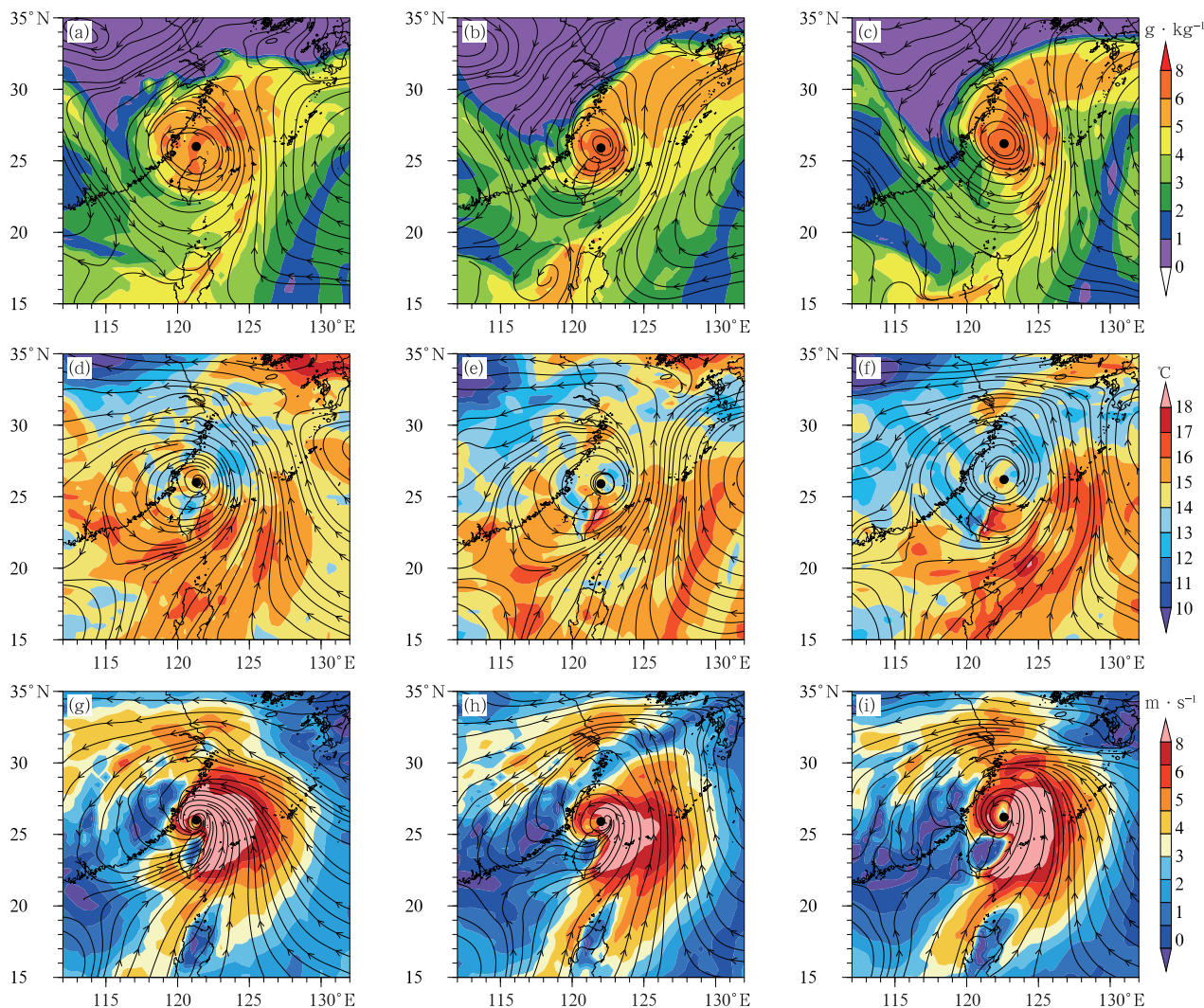


图 8 台风灿都活动期间 FY-4A(104.7°E)10.8 μm 通道长波红外增强图

Fig. 8 FY-4A (104.7°E) long-wave infrared satellite image of 10.8 μm during Typhoon Chanthu

南北走向,与卫星观测结果有较大区别(图略),即临近时次的预报在此例中效果更差。从实际卫星观测来看,12日12时杭州湾附近及沿海地区的对流降水并不强,主要的对流雨带集中在较远海域,而非对称的积云对流和非绝热加热作用会一定程度影响台

风路径产生移动分量。根据实际卫星云图反映的台风结构,与模式预报的台风结构或降水分布作对比,可以作为修正模式预报路径的重要参考,有望修正甚至推翻10日12时和12日00时起报的预报结果,得出更好的路径预报,即台风灿都很可能不登陆



注:黑点:集合成员预测台风中心位置以及业务实时定位的台风中心。

图 9 2021 年 9 月 12 日 12 时台风灿都(a~c)500 hPa 比湿(填色)和流场, (d~f)700~500 hPa 的温度差(填色)和 700 hPa 流场,(g~i)925 hPa 风速(填色)和流场 (a,d,g)EN05,(b,e,h)EN06,(c,f,i)ERA5 再分析资料

Fig. 9 (a-c) The 500 hPa specific humidity (colored) and streamlines, and (d-f) 700-500 hPa temperature difference (colored) and 700 hPa streamlines, (g-i) 925 hPa wind speed (colored) and streamlines of Typhoon Chanthu at 1200 UTC 12 September 2021 (a, d, g) EN05, (b, e, h) EN06, (c, f, i) ERA5 reanalysis data

我国。

卫星观测作为海洋上最有利的观测热带气旋精细化结构的手段,目前业务中主要用于台风结构和强度分析,尚不足以用于路径预报的修正参考。本例分析表明,在引导气流较弱或台风路径可能存在偏折的情况下,对比卫星云图反映的台风结构,尤其是外围的对流发展态势,与模式预报的台风结构或

对流发展态势的差别,可作为修正模式路径预报的参考。当然,现阶段看,这一参考指征在短时效取得的效果会更好一些。在本例中,利用 12 日 00 时的 9~12 h 预报结果,与观测的卫星云图做比对,可望得出更好的路径预报,即预报“灿都”不太可能登陆。如果与 10 日 12 时或者更早的模式预报进行对比和推敲,也有利于增加决策信心。

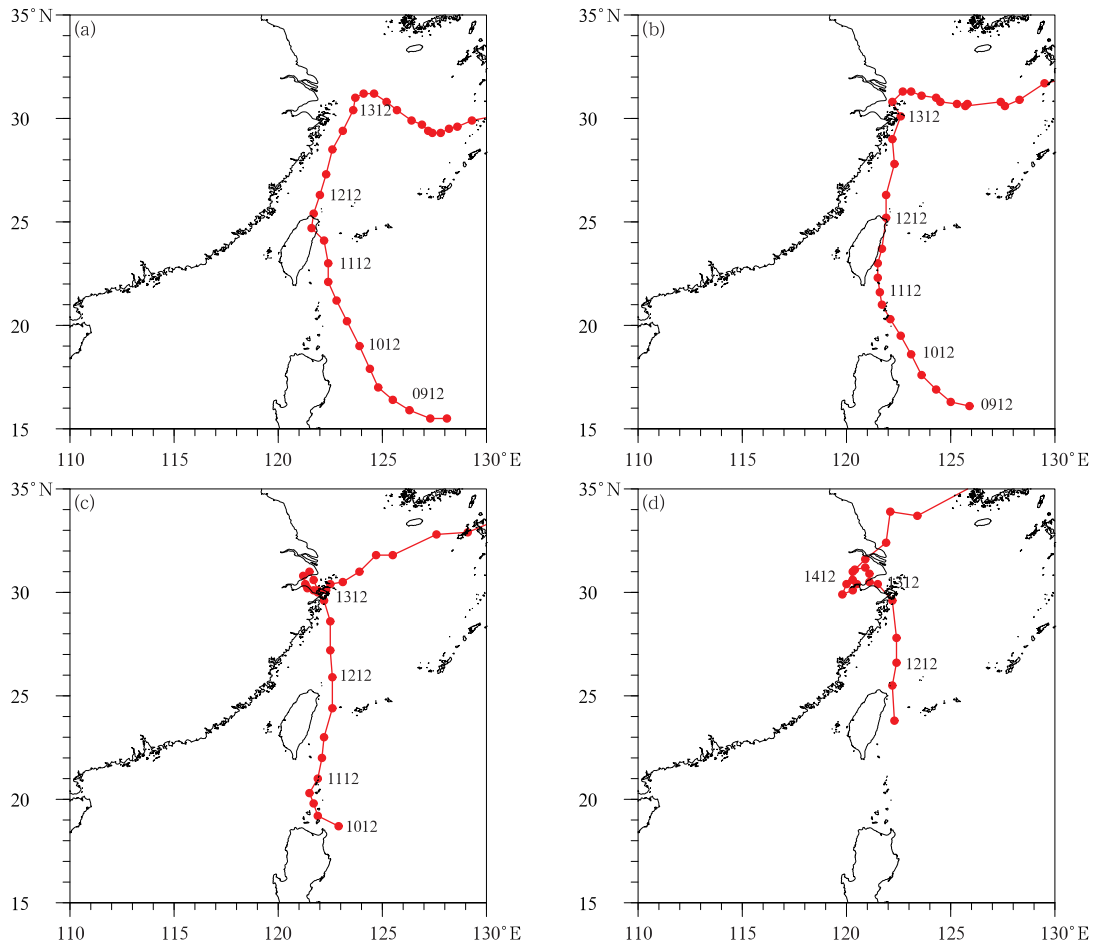


图 10 欧洲中期天气预报中心精细化数值预报模式(a)9日00时,(b)9日12时,
(c)10日12时和(d)12日00时起报的台风路径

Fig. 10 ECMWF-HRFS forecast TC tracks started from different initial times: (a) 0000 UTC 9,
(b) 1200 UTC 9, (c) 1200 UTC 10, (d) 0000 UTC 12 September

5 结论与讨论

本文通过位涡趋势诊断方法对欧洲中期天气预报中心集合预报系统(EC-EPS)台风灿都路径预报差异较大的两个集合成员进行诊断分析。预报路径在12日12时开始产生分歧,EN05向西偏折登陆,而EN06则与中央气象台业务实时定位较为吻合,沿东南海岸线向北运动,没有登陆。位涡趋势诊断方法证实两个成员均朝位涡趋势一波分量最大的位置移动,同时诊断了水平平流(HA)、垂直平流(VA)和非绝热加热(DH)不同物理项对总体位涡趋势的贡献,大多数时刻HA的贡献是最大的,接着是DH,VA的贡献相对较小。路径分叉的时刻位涡趋势差异主要是由非绝热加热项的方向所引起

的,EN05和EN06分别是向西北和东北的分量,与位涡趋势方向是一致的,即DH对集合成员台风路径差异的产生起到重要作用。在路径分叉之后,两个成员DH的方向又接近一致,但HA的方向产生了一些变化,EN05和EN06方向分别向西和向东偏移,也就是说HA(即引导气流)对两个成员间位涡趋势以及台风分叉之后的移动路径起主导作用。

从路径分叉时刻非对称的降水结构分布和卫星云图可以看到EN05的对流和降水活动主要集中在内核周围以及东南沿海地区,而EN06在东北象限外围区域也存在较明显的对流活动,与非绝热加热项的方向是较为一致的,即非对称对流活动发展和加热率的水平梯度对于台风移动在引导气流偏弱的情况下可能会起到关键的作用,是DH项对台风路径产生影响的直接原因。影响对流活动分布的环境

和物理因子中,EN06 东北象限存在大面积的高水汽带,同时台风中心北侧及东北象限存在中低层温度差较大的区域,会增加潜在不稳定,为该区域对流活动的发展提供较为有利的条件。另外,EN06 台风中心东侧存在低层偏南急流,气旋性环流相应存在东北象限有较弱的辐合,对对流活动及 DH 项有较大贡献。

近海台风的路径偏差会直接影响降水大风的落区以及受灾的范围,在台风业务预报中至关重要。但引导气流较弱或台风路径可能存在偏折的情况下,非绝热加热及对流活动,特别是外围的不对称对流活动会直接影响台风路径。集合预报离散度较大或模式间存在一定偏差时,预报人员在综合参考模式给出的台风路径预报的基础上,也可以多结合对比卫星云图反映的台风结构,尤其是外围的对流发展态势和非对称结构,与模式预报的台风结构或对流发展态势的差别,作为修正模式路径预报的参考,为实际业务预报提供相应帮助。目前本文只分析了“灿都”这一个个例,日后有必要对卫星云图台风非对称对流结构进行整体统计分析,进一步加强验证。

参考文献

- 陈国民,张喜平,白莉娜,等,2019. 2017年西北太平洋和南海热带气旋预报精度评定[J]. 气象,45(4):577-586. Chen G M, Zhang X P, Bai L N, et al, 2019. Verification on forecasts of tropical cyclones over Western North Pacific and South China Sea in 2017[J]. Meteor Mon, 45(4):577-586(in Chinese).
- 陈国民,张喜平,杨梦琪,等,2021. 2019年西北太平洋和南海台风预报精度评定[J]. 气象,47(10):1266-1276. Chen G M, Zhang X P, Yang M Q, et al, 2021. Verification on forecasts of typhoons over Western North Pacific and South China Sea in 2019[J]. Meteor Mon, 47(10):1266-1276(in Chinese).
- 陈联寿,2006. 热带气旋研究和业务预报技术的发展[J]. 应用气象学报,17(6):672-681. Chen L S, 2006. The evolution on research and operational forecasting techniques of tropical cyclones[J]. J Appl Meteor Sci, 17(6):672-681(in Chinese).
- 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,解以扬,等,1997. 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,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).
- 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).
- 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).
- 王海平,董林,2020. 2019年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. 海洋气象学报,40(2):1-9. Wang H P, Dong L, 2020. Overview of typhoon activities over western North Pacific and the South China Sea in 2019[J]. J Mar Meteor, 40(2):1-9(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).
- 吴玉琴,吴立广,梁佳,2015. 利用位涡趋势法诊断台风“莫拉克”(2009)的移动[J]. 气象学报,73(2):236-246. Wu Y Q, Wu L G, Liang J, 2015. Diagnosis of the movement of Typhoon Morakot (2009) using the potential vorticity tendency approach[J]. Acta Meteor Sin, 73(2):236-246(in Chinese).
- 徐晶,陈联寿,徐祥德,1999. 青藏高原高空流型对西太平洋台风路径影响的诊断分析[J]. 应用气象学报,10(4):410-420. Xu J, Chen L S, Xu X D, 1999. Diagnosis on the impact of middle troposphere circulation pattern over the Qinghai Xizang Plateau on the track of typhoon over West Pacific[J]. Quart J Appl Meteor, 10(4):410-420(in Chinese).
- 许映龙,吕心艳,张玲,等,2015. 1323号强台风菲特特点及预报难点分析[J]. 气象,41(10):1222-1231. Xu Y L, Lü X Y, Zhang L, et al, 2015. Analysis on the characteristics and forecasting difficulty of severe Typhoon Fitow (No. 1323)[J]. Meteor Mon, 41(10):1222-1231(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).
- 杨琼琼,吴立广,2015. 中国24h台风路径预报难点及其大尺度环流分析[J]. 气象科学,35(4):389-397. Yang Q Q, Wu L G, 2015. Analysis on difficulty of 24 h typhoon track forecast in China and associated large-scale circulation[J]. J Meteor Sci, 35(4):389-397(in Chinese).
- 张玲,黄奕武,2013. 超强台风梅花和超强台风洛克预报偏差的天气学分析[J]. 气象,39(7):842-847. Zhang L, Huang Y W, 2013. Synoptic analysis on forecast error of super Typhoon Muifa and Severe Typhoon Roke[J]. Meteor Mon, 39(7):842-847(in Chinese).

- Chan J C L, Gray W M, 1982. Tropical cyclone movement 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.
- Fiorino M, Elsberry R L, 1989. Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion[J]. *J Atmos Sci*, 46(7): 975-990.
- Holland G J, 1983. Tropical cyclone motion; environmental interaction plus a beta effect[J]. *J Atmos Sci*, 40(2): 328-342.
- Kovordányi R, Roy C, 2009. Cyclone track forecasting based on satellite images using artificial neural networks[J]. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 64(6): 513-521.
- Lajoie F A, 1976. On the direction of movement of tropical cyclones [J]. *Aust Meteor Mag*, 24: 95-104.
- Lajoie F A, Nicholls N, 1974. A relationship between the direction and movement of tropical cyclones and the structure of their cloud systems [R]. Melbourne: Bureau of Meteorology Tech. Rep. No. 11: 22.
- May P T, Rajopadhyaya D K, 1996. Wind profiler observations of vertical motion and precipitation microphysics of a tropical squall line[J]. *Mon Wea Rev*, 124(4): 621-633.
- Peng M S, Williams R T, 1990. Dynamics of vortex asymmetries and their influence on vortex motion on a β -plane[J]. *J Atmos Sci*, 47(16): 1987-2003.
- Shapiro L J, 1992. Hurricane vortex motion and evolution in a three-layer model[J]. *J Atmos Sci*, 49(2): 140-154.
- Wang Y, Holland G J, 1995. The role of vertical coupling in baroclinic vortex motion[C]//Preprints, 21st Conf. on Hurricane Tropical Meteorology. Miami: Amer Meteor Soc: 466-468.
- Wang Y Q, Holland G J, 1996. The beta drift of baroclinic vortices. Part II: diabatic vortices[J]. *J Atmos Sci*, 53(24): 3737-3756.
- Willoughby H E, 1992. Linear motion of a shallow-water barotropic vortex as an initial-value problem[J]. *J Atmos Sci*, 49(21): 2015-2031.
- Wong M L M, Chan J C L, 2007. Modeling the effects of land-sea roughness contrast on tropical cyclone winds[J]. *J Atmos Sci*, 64(9): 3249-3264.
- Wu C C, Emanuel K A, 1993. Interaction of a baroclinic vortex with background shear; application to hurricane movement[J]. *J Atmos Sci*, 50(1): 62-76.
- Wu C C, Emanuel K A, 1995a. Potential vorticity diagnostics of hurricane movement. Part I: a case study of Hurricane Bob (1991) [J]. *Mon Wea Rev*, 123(1): 69-92.
- Wu C C, Emanuel K A, 1995b. Potential vorticity diagnostics of hurricane movement. Part II: Tropical Storm Ana (1991) and Hurricane Andrew (1992)[J]. *Mon Wea Rev*, 123(1): 93-109.
- Wu L G, Wang B, 2000. A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion[J]. *Mon Wea Rev*, 128(6): 1899-1911.
- Wu L G, Wang B, 2001a. Movement and vertical coupling of adiabatic baroclinic tropical cyclones[J]. *J Atmos Sci*, 58(13): 1801-1814.
- Wu L G, Wang B, 2001b. Effects of convective heating on movement and vertical coupling of tropical cyclones; a numerical study[J]. *J Atmos Sci*, 58(23): 3639-3649.
- Yanai M, Esbensen S, Chu J H, 1973. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets[J]. *J Atmos Sci*, 30(4): 611-627.
- 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)