

余贞寿,冀春晓,张红蕾,等,2020. 涡旋追踪技术在浙江区域模式台风定位定强中的应用研究[J]. 气象,46(11):1461-1473. Yu Z S, Ji C X, Zhang H L, et al, 2020. Application of GFDL vortex tracker technique to the Zhejiang regional NWP models[J]. Meteor Mon, 46(11):1461-1473(in Chinese).

涡旋追踪技术在浙江区域模式台风 定位定强中的应用研究*

余贞寿^{1,2} 冀春晓¹ 张红蕾¹ 段晶晶³

1 浙江省气象科学研究所,杭州 310008

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

3 浙江省宁波市气象台,宁波 315012

提 要: 针对搜寻海平面气压最小值位置确定热带气旋(TC)位置的方法(MSLP)应用于数值模式预报台风定位方法存在的不足,开展 GFDL 涡旋追踪技术(GVT)在本地化模式应用研究,采用 GVT 和 MSLP、搜寻 500 hPa 最大相对涡度值(VT500)和搜寻最小位势高度值(H500)等四种方法对四类不同路径台风定位定强分析结果表明:H500、VT500、MSLP 方法定位路径均会出现不同程度的“锯齿”形不规则的摆动,尤其是 VT500 不规则摆动幅度最大,定位效果最差;GVT 方法可以较好地修正“锯齿”形不规则的摆动,使得模式预报路径更接近实况,定位效果最好;在远离海岸线地区,H500、MSLP 和 GVT 定位效果比较接近。从不同方法对台风中心最低气压定强误差可见,VT500 方法误差最大,GVT 方法误差最小,MSLP、H500 方法误差介于 VT500 和 GVT 之间。四种方法对台风中心附近最大风速定强误差差别不大。2016—2018 年业务应用评估结果表明:采用 GVT 技术建立的浙江台风定位定强系统对浙江区域中尺度模式和浙江快速更新同化预报系统台风预报质量有改进作用。

关键词: 台风,涡旋追踪,定位,定强,区域数值模式

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.007

Application of GFDL Vortex Tracker Technique to the Zhejiang Regional NWP Models

YU Zhenshou^{1,2} JI Chunxiao¹ ZHANG Honglei¹ DUAN Jingjing³

1 Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Ningbo Meteorological Observatory of Zhejiang Province, Ningbo 315012

Abstract: The most common tropical cyclone (TC) center identification method for searching for minimum sea level pressure (MSLP) still has some shortcomings. In this paper, TC center identification method and intensity estimation method based on GFDL vortex tracker technique (GVT) are studied in the regional numerical weather prediction model application. Detailed comparisons are conducted between GVT and three traditional TC center location and intensity estimation techniques which include MSLP, the method of using maximum vorticity value at 500 hPa (VT500), and the method of using minimum geopotential height at 500 hPa (H500). The results show that using H500, VT500 and MSLP methods to determine

* 国家自然科学基金面上项目(41675044)、浙江省气象科技计划项目(2013ZD01-6,2017ZD05)和中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2018LASW-B05)共同资助

2019 年 6 月 11 日收稿; 2020 年 8 月 11 日收修定稿

第一作者:余贞寿,主要从事数值预报和台风研究. E-Mail: yuzhenshou@163.com

TC center location, can generate some degrees of zigzag-shaped irregular swing paths, especially the VT500 method. The VT500 method has the largest irregular swing amplitude and the positioning result is the worst. GVT method can better correct the zigzag-shaped swing path and make the model prediction path closer to the observed one, so its positioning result is the best. However, the positioning results of H500, MSLP and GVT are relatively close when the typhoon location is far away from the coastline. The errors of the minimum pressure of TC center by these four methods show that the VT500 method has the largest error, the GVT method has the smallest error, and the errors by MSLP and H500 methods are between those of VT500 and GVT. The errors of maximum wind speed near the TC center by four methods show the errors of the four methods are not much different. The operational application assessment in 2016–2018 show that the Zhejiang Typhoon Vortex Tracker System based on GVT technology can improve the prediction quality of Zhejiang WRF-ADAS Regional Model System and Zhejiang WRF-ADAS Rapid Refresh System.

Key words: typhoon, vortex tracker, TC center identification, intensity estimation, regional numerical weather prediction model

引 言

在台风业务预报实践中,台风定位定强是制作台风预报和发布预警的第一步,定位定强精准度不仅会影响台风路径和强度预报的质量,而且也会影响到其所带来的狂风、暴雨和风暴潮预报的质量(矫梅燕,2010)。郑艳等(2018)研究指出台风鲸鱼(201508)路径及登陆点预报偏差的主要原因是台风强度偏弱导致业务定位出现较大偏差。对于台风的定位定强一直是国内外研究关注的重点,而多数研究基于气象卫星、雷达及地面加密自动站等观测资料对台风开展定位和定强工作。气象卫星则具有观测范围广、观测时次多等特点,卫星云图成为全天候监测台风的主要手段,尤其是对远海台风的监测(Dvorak,1975;刘正光等,2003;许映龙等,2015)。当台风接近陆地时,由于受海岛和大陆下垫面的地形作用的影响,台风结构和强度会受较大影响(薛霖和李英,2016;陈俊等,2017;段晶晶等,2017),往往会导致不易通过云形确定台风的中心位置,从而给卫星定位带来很大困难,而此时多普勒天气雷达由于在时间和空间分辨率上的优势,已成为近海台风监测的一个主要技术手段(Anthes,1982;Griffin et al,1992;Wood,1994;许映龙等,2006;Chang et al,2009;张勇等,2011;黄旋旋等,2014)。此外,针对台风登陆后由于摩擦作用导致强度很快减弱,台风云系松散,中心模糊不清,用卫星云图和雷达探

测都难以准确定位的问题,滕卫平和杜惠良(1995)提出通过对地面加密观测资料的客观分析来确定台风中心的方法。随着数值模式对于台风的预报能力的不断提升,当前数值预报已经成为台风预报最重要预报手段之一,对于模式结果的精确定位定强能有效提高台风路径的业务预报能力,有利于更好做好台风的防灾减灾工作,将损失降到最小程度(伍荣生,2007)。目前,对于数值预报台风的定位定强方法,从不同的角度出发,有许多方法仅根据台风某一特性来进行定位定强,往往会存在一些不同的问题。埃尔斯本里(1994)研究指出台风风场结构具有气旋式涡旋特征,涡旋状分布风向的中心,对应台风中心所在的位置,因此可以通过搜寻模式预报的台风环流区域内低层相对涡度或位涡大值中心来定台风中心。Braun(2002)提出利用变分方法来寻找水平面气压场几何中心作为热带气旋(TC)中心的方法。Wu et al(2006)研究中提出了轴平均切向风定位方法。有些研究中采用整层平均流场的气旋中心确定法(王鹏云和刘春涛,1998;余贞寿等,2005)。另外,基于整个台风系统的中心眼区位势高度和海平面气压值达到最低的结构特征,可以通过寻找台风环流范围内的位势高度最低值和海平面气压最低值来确定台风中心位置,尤其是搜寻最低海平面气压最小值定位方法(MSLP)因其便利性而得到广泛应用(余贞寿等,2007;Nolan et al,2009),但该方法在台风靠近岛屿或登陆时受下垫面影响较大;另外,由于台风各种特殊的结构与特征,海平面气压低值仅为

台风特征的一个方面, 仅以 MSLP 分析法确定台风中心的位置虽能得到接近的台风中心位置, 却忽略了台风的暖心结构特征与较大涡度, 使得模拟台风中心位置可信度降低(王咏青等, 2012), 要得到数值预报中可信度较高的台风中心位置, 需要在模式资料中对台风相关的各种特征进行分析, 经过严格的计算来提取。此外, 还有根据台风的属性如近地面风、低层相对涡度值, 暖心结构等多因子综合定位定强法, 如根据 850 hPa 相对涡度、最大地面风速、海平面气压以及台风环流所在位置与周围环境的温度差等来综合判定 TC 中心(Camargo and Zebiak, 2002; 沈新勇等, 2010; Song et al, 2016); 根据 TC 低层气压中心、最大风圈和持续时间进行识别来确定的(Walsh et al, 2007); 基于 850 hPa 和 500 hPa 相对涡度、950 hPa 和 700 hPa 的湿度条件和 850~200 hPa 的垂直风切来确定(Tory et al, 2013); Tao et al(2011) 提出根据海平面气压、高层位势高度和台风风场环流综合判定 TC 中心方法。这些方法在一定程度上能够修正单因子造成的误差, 但因子相对固定, 灵活性较差。在 2013—2016 年业务使用中发现浙江区域数值预报系统中采用 MSLP 方法存在明显缺陷, 尤其是当台风靠近海岸线、登陆岛屿、登陆大陆后受下垫面影响和台风强度比较弱时会出现“锯齿”形不规则的摆动或者不连续跳跃, 这与 Braun(2002) 指出 MSLP 方法有可能会致眼墙相对 TC 中心发生振荡是一致的, 而且没能给出台风强度的另外一个重要指标——近中心最大风速, 因此浙江区域数值预报业务系统的定位定强亟需改进。目前, 美国飓风中心运行的 HWRF 模式台风定位定强采用了 NOAA 开发的涡旋追踪 GFDL vortex tracker(GVT) 技术方法(Bernardet et al, 2015)。因此, 本文拟开展 GVT 方法在浙江区域中尺度模式(Zhejiang WRF-ADAS Regional Model System, ZJWARMS, 预报时效为 72 h) 和浙江快速更新同化预报系统(Zhejiang WRF-ADAS Rapid Refresh System, ZJWARRS, 预报时效为 24 h)(邱金晶等, 2015) 应用研究, 该方法采用多因子结合的手段, 考虑不同因素综合定位, 有效避免单因子定位时所存在的缺陷, 同时不同的因子选择和权重的可调节性, 能够针对当地特征, 不同的台风特征, 制定合理的具有本地特

色的定位定强法, 同时能较为精确给出近中心最大风速。本文首先通过设计若干台风个例的数值模拟试验来比较评估分析 GVT 和 MSLP、搜寻 500 hPa 最大相对温度值(VT500) 和搜寻最小位势高度值(H500) 等定位定强方法优劣, 然后把 GVT 方法应用于 ZJWARRS 和 ZJWARMS 中, 并与原来的定位定强方法进行对比分析。

1 GFDL 涡旋追踪技术简介

美国 NOAA 开发的 GVT, 可以从 GRIB1 格式的模式结果中提取相应的数据客观分析出风暴的中心位置(经度、纬度), 风暴的强度(最大 10 m 风、最小海平面气压 MSLP) 和结构信息(34、50 和 64 节风速四象限的半径)。GVT 输入的是柱面坐标的经纬数据, 输出的是风暴中心、强度和结构信息, 以 Automated Tropical Cyclone Forecast(ATCF) 格式和改进的 ATCF 格式。它主要通过搜索变量的最大或最小值所在位置来确定 TC 中心, 优先使用 10 m、850 hPa、700 hPa、500 hPa 相对涡度、海平面气压 MSLP、850 hPa、700 hPa、500 hPa 位势高度场中心, 其次是 10 m、850 hPa、700 hPa 风场中心, 还可以是 500 hPa 风场和其他一些物理量的中心, 可以选择其中一些或全部, 然后取这些中心的几何平均位置来确定风暴中心, 详细介绍请参考使用手册(Biswas et al, 2018)。本文研究中采用了 GVT 方法是组合使用 850 hPa 和 500 hPa 相对涡度最大值、海平面气压 MSLP 最低值、850 hPa 和 500 hPa 位势高度最小值位置平均来确定 TC 中心。GVT 的定强方法是确定 TC 中心后, 获取 TC 中心的最小海平面气压值作为 TC 中心最低气压值, 通过搜索以 TC 中心为中心、半径为 200 km(在 GVT 中分辨率小于 0.25° 时默认搜寻半径为 200 km, 分辨率大于 1.25° 时默认搜寻半径为 500 km, 分辨率介于两者之间的默认搜寻半径为 300 km)、最大 10 m 风速作为 TC 近中心最大风速。其他三种方法中 VT500 和 H500 的定强方法同 GVT 方法, MSLP 定强方法与 GVT 最大区别就是直接把定位找到的最低海平面气压值作为 TC 中心最低气压值, 四种方法搜寻 TC 近中心最大风速获取方法相同。

2 GVT 与其他方法比较

2.1 数值模式与试验设计

本文采用 WRFv3.4.1 模式,选用单重网格区域(图1),垂直方向取36层,水平网格距为 9 km,时间步长为 30 s;微物理方案采用 Goddard GCE 方案,无积云参数化方案;陆面过程使用 Noah 方案;行星边界层采用 YSU 参数化方案;表面层使用 Monin-Obukhov 方案;陆面过程采用 Unified Noah 陆面模式,长波、短波辐射分别选用 RRTM、RRT-MG 方案。采用 NCEP 全球模式 GFS 提供的预报场作为 WRF 模式的初和边值场,GFS 预报场时间

间隔 3 h,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,为了对比分析四种方法对台风靠近大陆海岸线或登陆台湾岛受地形影响下定位定强效果,本文设计了四类路径台风的 12 个试验(表 1),以 2015 年 9 号台风灿鸿(段晶晶等,2017)为例对比分析不同方法对靠近浙江近海擦边转向东北行路径台风定位定强差异,以 2016 年 1 号台风尼伯特、2016 年 17 号台风鲇鱼(高拴柱等,2018)、2017 年 9 号台风纳沙(董林等,2020)分别代表西北行后在台湾岛南部、中部和北部登陆类台风来探讨四种方法定位定强效果。本文中用来检验评估的台风路径、强度实况资料从中国气象局上海台风所提供的 CMA/STI 热带气旋最佳路径数据集(Ying et al, 2014; http://tcdata.typhoon.gov.cn/zljssj_zlhq.html)选取。

表 1 本文中设计数值试验情况列表

Table 1 Summary of the numerical experiments in this study

台风个例	台风路径描述	试验名称	数值试验设计方案描述
灿鸿 Chan-hom (201509)	西北行转东北行路径,在浙江近海擦边转向东北行路径,模拟时段内强度由超强台风级($55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)逐渐减弱为台风级($33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	A01	用 GFS 提供 2015 年 7 月 10 日 20 时的预报场作为 WRF 的初始场和边值场,从 11 日 02 时起报,预报 24 h
		A02	同 A01,但起报时间为 11 日 05 时。
		A03	同 A01,但起报时间为 11 日 08 时。
尼伯特 Nepartak (201601)	西北行路径,以超强台风级($58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)在台湾南部台东县登陆后,路径出现“蛇形”摆动,并以强热带风暴级($28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)在福建泉州石狮市再次登陆	S01	用 GFS 提供 2016 年 7 月 7 日 20 时的预报场作为 WRF 的初始场和边值场,从 7 日 20 时起报,预报 24 h
		S02	同 S01,但起报时间为 7 日 23 时。
		S03	同 S01,但起报时间为 8 日 02 时。
鲇鱼 Megi (201617)	西北行路径,以强台风($45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)在台湾中部花蓮县登陆后,在台湾海峡形成“V”路径,以台风级($35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)福建泉州惠安县再次登陆	M01	用 GFS 提供 2016 年 9 月 27 日 08 时的预报场作为 WRF 的初始场和边值场,从 27 日 08 时起报,预报 24 h
		M02	同 M01,但起报时间为 27 日 11 时。
		M03	同 M01,但起报时间为 27 日 14 时。
纳沙 Nesat (201709)	西北行路径,以台风级($40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)在台湾北部宜兰县登陆后,路径出现南折,并以台风级($33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)在福建福清市再次登陆	N01	用 GFS 提供 2017 年 7 月 29 日 08 时的预报场作为 WRF 的初始场和边值场,从 29 日 14 时启动,预报 24 h
		N02	同 N01,但起报时间为 29 日 17 时。
		N03	同 N01,但起报时间为 29 日 20 时。

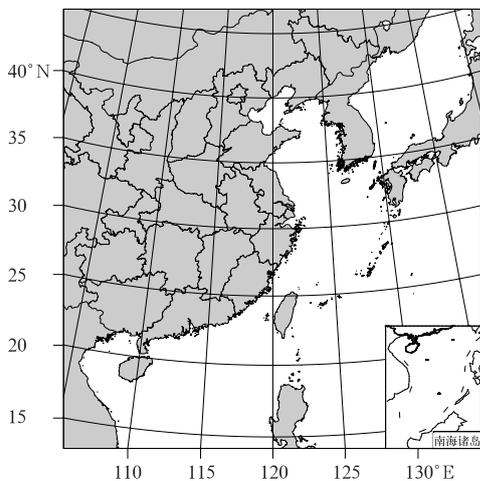


图 1 模拟区域

Fig. 1 Domain of numerical simulation

2.2 试验结果分析

(1) 2015 年 9 号台风灿鸿

从图 2b 可见,VT500 定位路径在台风靠近浙江东北部宁波、舟山群岛路径出现了明显“锯齿”形不规则的摆动路径,与实况路径(图中 OBS)有明显差异,H500(图 2a)和 MSLP(图 2c)定位路径在台风靠近宁波沿海也出现了“锯齿”形不规则的摆动路径,但幅度比 VT500 明显减小;而在 GVT 定位路径得到明显修正,路径更接近实况。从 A01、A02 和 A03 三个试验的四种方法定位误差(图 3a)和定强误差(图 3b 和 3c)可见,VT500 定位误差最大,H500、MSLP 和 GVT 定位误差比较接近,H500 略

比 MSLP 和 GVT 小; 从不同方法对台风中心最低气压定强误差可见, VT500 误差最大, GVT 误差最小, MSLP、H500 误差介于 VT500 和 GVT 之间; 从不同方法对台风中心附近最大风速定强误差可见, 四种方法误差差异很小, GVT 略比其他三种误差小。

(2) 2016 年 1 号台风尼伯特

从图 4b 可见, VT500 定位路径相对于其他三种方法的路径预报最为杂乱, 甚至是在台湾岛西侧出现了“回旋打转”的路径, 与实况有明显差异, 而 H500 定位路径(图 4a)和 MSLP 定位路径(图 4c)在台风位于台湾岛上时出现了一定的“锯齿”型摆动路径, 与实况路径略有差异, 但其定位路径的预报偏

差比 VT500 定位路径明显减小; 而在 GVT 定位路径呈现出实况较为一致的“蛇形”摆动且没有出现非常明显的“锯齿”型摆动, 或者严重的突变点。从 S01、S02 和 S03 三个试验的四种方法定位误差(图 3a)和定强误差(图 3b 和 3c)可见, VT500 定位误差最大, MSLP 和 GVT 定位误差比较接近, H500 定位误差略大于 MSLP 和 GVT; 从不同方法对台风中心最低气压定强误差可见, 对于不同的起报时间来说 VT500 方法误差均最大, 而 MSLP 和 GVT 方法误差接近, H500 方法误差介于 MSLP 和 GVT 之间; 从不同方法对台风中心附近最大风速定强误差可见, 四种方法误差差别不大。

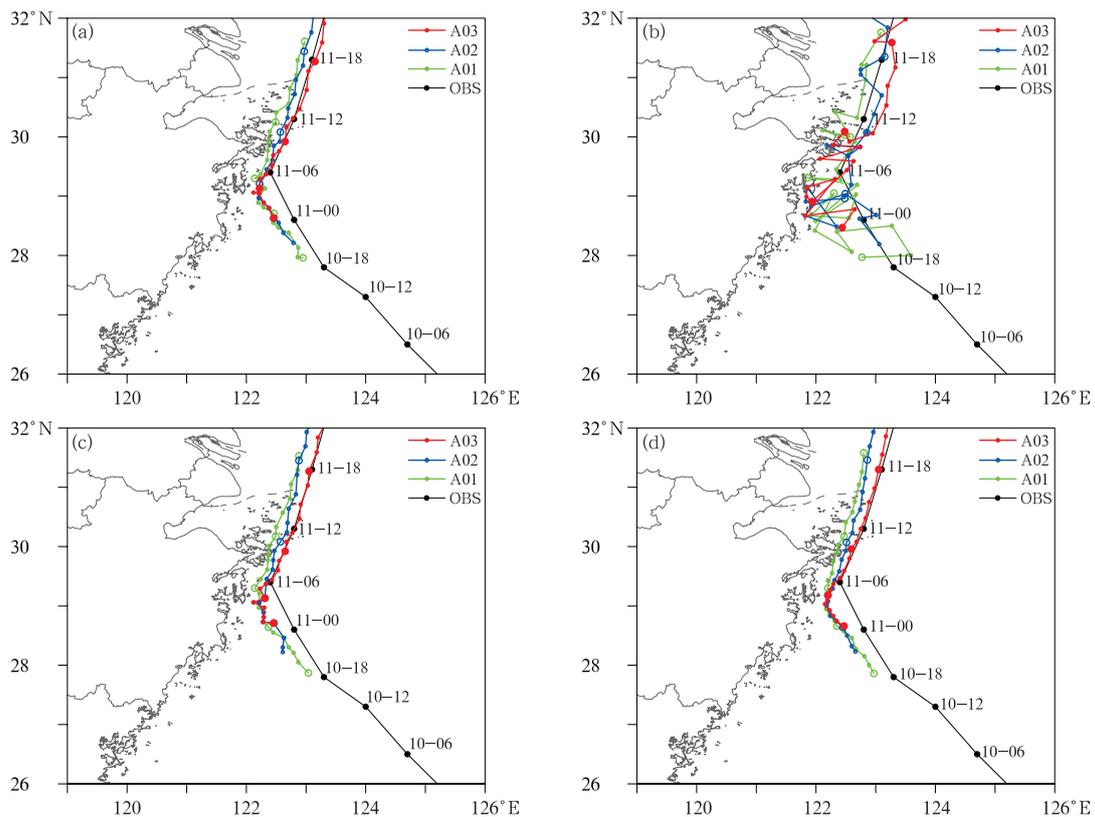


图 2 不同方法对 2015 年 9 号台风灿鸿路径预报定位比较

(a) H500, (b) VT500, (c) MSLP, (d) GVT

(图中 OBS 指观测值, 数字为时间: 日期-小时)

Fig. 2 Comparison of different TC center identification methods for the track prediction of the Typhoon Chan-hom (201509)

(a) H500, (b) VT500, (c) MSLP, (d) GVT

(OBS indicates observation; numbers indicate time: date-hour)

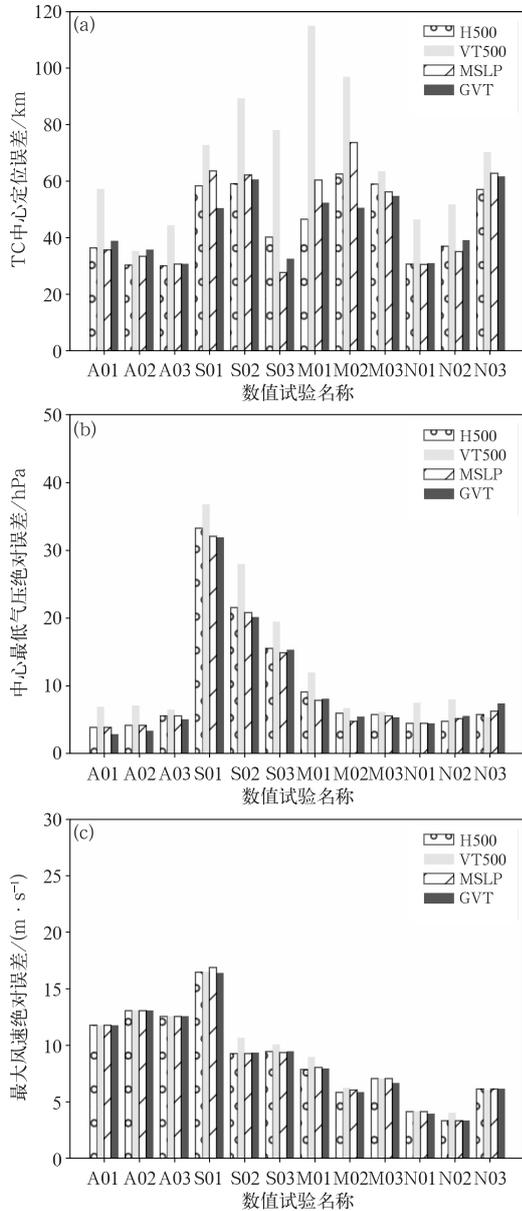


图 3 不同方法对不同路径台风定位误差(a), 中心最低气压定强误差(b)和近中心最大风速定强误差(c)比较

Fig3 Comparison of different methods for typhoon track and intensity forecast error

(a) track error, (b) error of minimum center pressure, (c) error of maximum surface wind near center

(3)2016 年 17 号台风鲇鱼

从图 5d 可见, GVT 定位的效果明显优于其余三者,其优势尤其体现在预报出台风经过台湾岛时出现右偏现象,从台湾岛到海峡出现“V”路径;与前面分析的东北行和“蛇形”摆动路径的台风相同,

VT500 方法(图 5b)定位预报路径与实况路径偏差最大,全程都表现为“锯齿”形不规则的摆动路径; H500(图 5a)和 MSLP(图 5c)在台风在台湾岛上的定位中出现了较为明显的“锯齿”形不规则的摆动路径,但幅度比 VT500 方法明显减小。从 M01、M02 和 M03 三个试验的四种方法定位误差(图 3a)和定强误差(图 3b 和 3c)可见,VT500 方法在定位误差最大,尤其是在 M01 的试验中,其误差接近其余方法的 2 倍;H500、MSLP 和 GVT 三种方法的定位误差整体上比较接近,M01 试验中 H500 最优,M02 和 M03 试验中 GVT 方法最优;从不同方法对台风中心最低气压定强误差可见,VT500 定强误差最大,H500 次之,而 MSLP 第三,GVT 定强误差最小;从不同方法对台风中心附近最大风速定强误差可见,四种方法误差比较接近,而 GVT 方法略比其他三者小。

(4)2017 年 9 号台风纳沙

从图 6b 可见,VT500 定位路径在台风靠近台湾岛和登陆福建前路径出现了明显“锯齿”形不规则的摆动路径,且幅度较大,与实况有较大偏差,其余三种方法 H500(图 6a)、MSLP(图 6c)和 GVT(图 6d)路径定位与实况较为接近,但 H500 和 MSLP 定位路径时仍然存在一些较小的“锯齿”形不规则的摆动路径,在 GVT 定位路径得到明显修正,无“锯齿”状摆动。从 N01、N02 和 N03 三个试验的四种方法定位误差(图 3a)和定强误差(图 3b 和 3c)可见,四种方法定位路径误差均为登岛后试验 N03 误差明显比登岛前试验 N01、N02 大,四种方法相比而言,VT500 定位误差最大,H500、MSLP 和 GVT 方法的定位误差比较接近,三个试验平均而言,H500 的误差最小;从不同方法对台风中心最低气压定强误差可见,VT500 方法误差仍然是最大,其他三者非常接近;从不同方法对台风中心附近最大风速定强误差可见,四种方法误差没有显著差异。

上述四种方法对四类不同路径台风定位定强对比分析可见,无论是靠近海岸线紧擦型台风或是从台湾岛不同部位登陆台风,在最靠近海岸线附近和登岛前后,H500、VT500、MSLP 方法定位路径均会出现不同程度的“锯齿”形不规则的摆动路径,尤其是 VT500 不规则摆动幅度最大,定位效果最差,GVT 方法可以较好地修正“锯齿”形不规则的摆动,

使得模式预报路径更接近实况, 定位效果最好, 在远离海岸线, H500、MSLP 和 GVT 定位效果比较接近。从不同方法对台风中心最低气压定强误差可见, VT500 方法误差最大, GVT 方法误差最小,

MSLP、H500 方法误差介于 VT500 和 GVT 之间。从不同方法对台风中心附近最大风速定强误差可见, 四种方法误差差别不大, 可能原因是四种方法搜寻 TC 近中心最大风速获取方法相同, 虽然搜寻到

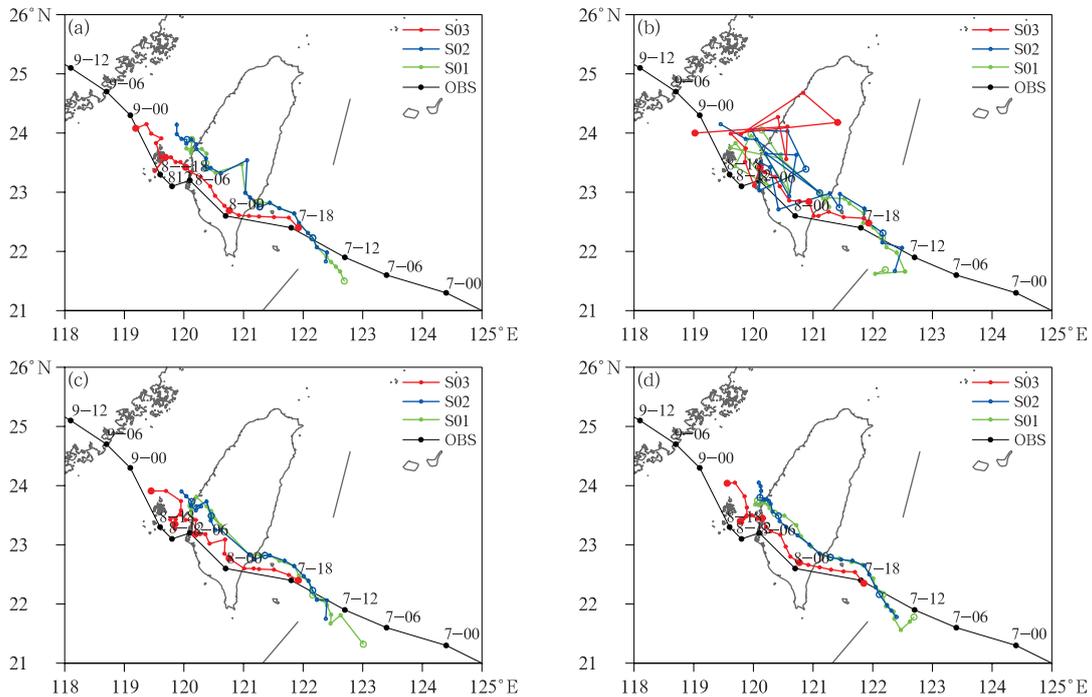


图 4 同图 2, 但为 2016 年 1 号台风尼伯特

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the Typhoon Nepartak (201601)

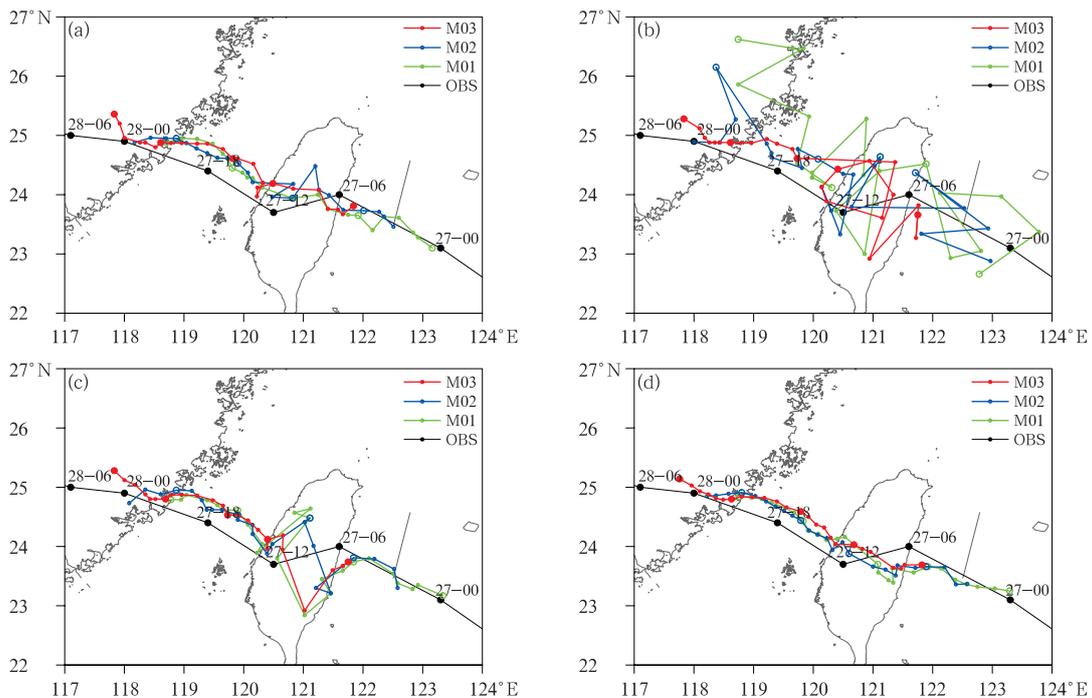


图 5 同图 2, 但为 2016 年 17 号台风鲑鱼

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the Typhoon Megi (201617)

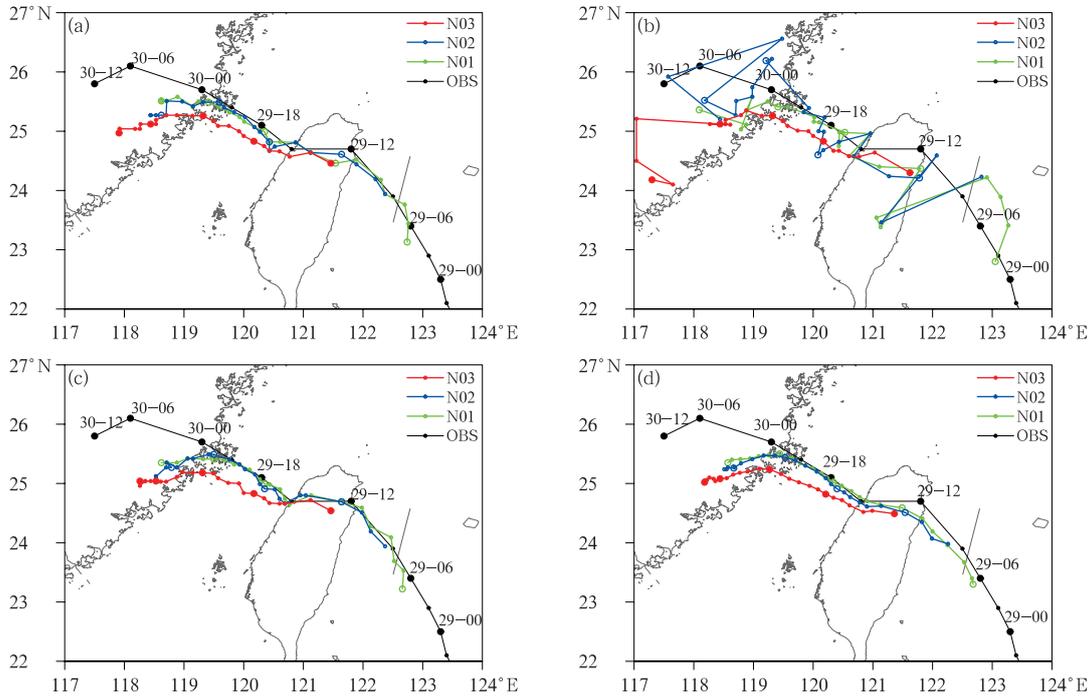


图 6 同图 2, 但为 2017 年 9 号台风纳沙

Fig. 6 Same as Fig. 2, but for the Typhoon Nesat (201709)

台风中心存在差异,但这种中心位置上差异相对于 200 km 半径搜寻最大风速范围还是小的,导致四种方法可能搜寻到相同位置的最大风速。

2.3 定位差异可能原因分析

为了探讨造成定位差异的可能原因,本文选取了给出浙江近海擦边转向台风灿鸿和台湾岛中部登陆台风鲑鱼来分析其典型时刻的结构特征和四种方法 TC 中心定位关系,由图 7a 可见 2015 年 7 月 11 日 12 时台风灿鸿的 500 hPa 位势高度场分布与海平面气压场分布比较一致,两者最低中心位置相差 0.04 个经度,但是 500 hPa 相对涡度的最大中心位于靠近海岸线一侧,比位势高度最低中心位置偏东 0.27 个经度,观测研究表明台风灿鸿接近浙江海岸期间,在东北气流下,浙东北地形的摩擦辐合及抬升作用使得大量的强对流云团汇集在台风西北侧(段晶晶等,2017),是导致相对涡度的最大中心偏离台风中心的重要原因,而 GVT 定出 TC 中心位置介于 H500 和 MSLP 之间,从雷达反射率和温度的剖面(图 7b)可见,GVT、H500、MSLP 定出 TC 中心确实在台风眼区中心,而 VT500 定出的 TC 中心位于台风眼墙内侧。由图 7c 可见 2016 年 9 月 27 日 17 时台风鲑鱼受台湾岛地形影响明显,在台湾中央山

脉附近产生了多个 500 hPa 位势高度、相对涡度中心,从海平面气压场可见台湾岛东南侧产生次生低压,次生低压中心值小于台湾岛上原台风低压中心值,MSLP 方法定位 TC 中心在台湾岛东南侧,已有研究指出台湾岛周围是产生诱生台风低压的高频区(孟智勇等,1998),因此,受台湾岛地形影响,H500、VT500、MSLP 定位方法所得 TC 中心差异较大,即使同一方法不同时次 TC 中心位置也会出现不连续跳跃(图 5),从雷达反射率和温度的剖面(图 7d)可见,H500、MSLP 定位 TC 中心位于台风眼墙内侧,而 VT500 的定位 TC 中心位于台风眼墙外侧,只有 GVT 定出 TC 中心正好位于台风眼中心。由此可见,海岸线、地形等因素会使得 H500、VT500、MSLP 产生较大偏差,尤其是对强度比较弱的 TC,相比之下,本文选取的 GVT 定位的台风中心最能够体现台风的结构和强度特征。

3 GVT 在浙江区域模式系统应用

3.1 浙江台风涡旋追踪系统

利用 GVT 技术,针对浙江业务运行 ZJWARMS 和 ZJWARRS 开展台风精细化定位定强技术应用

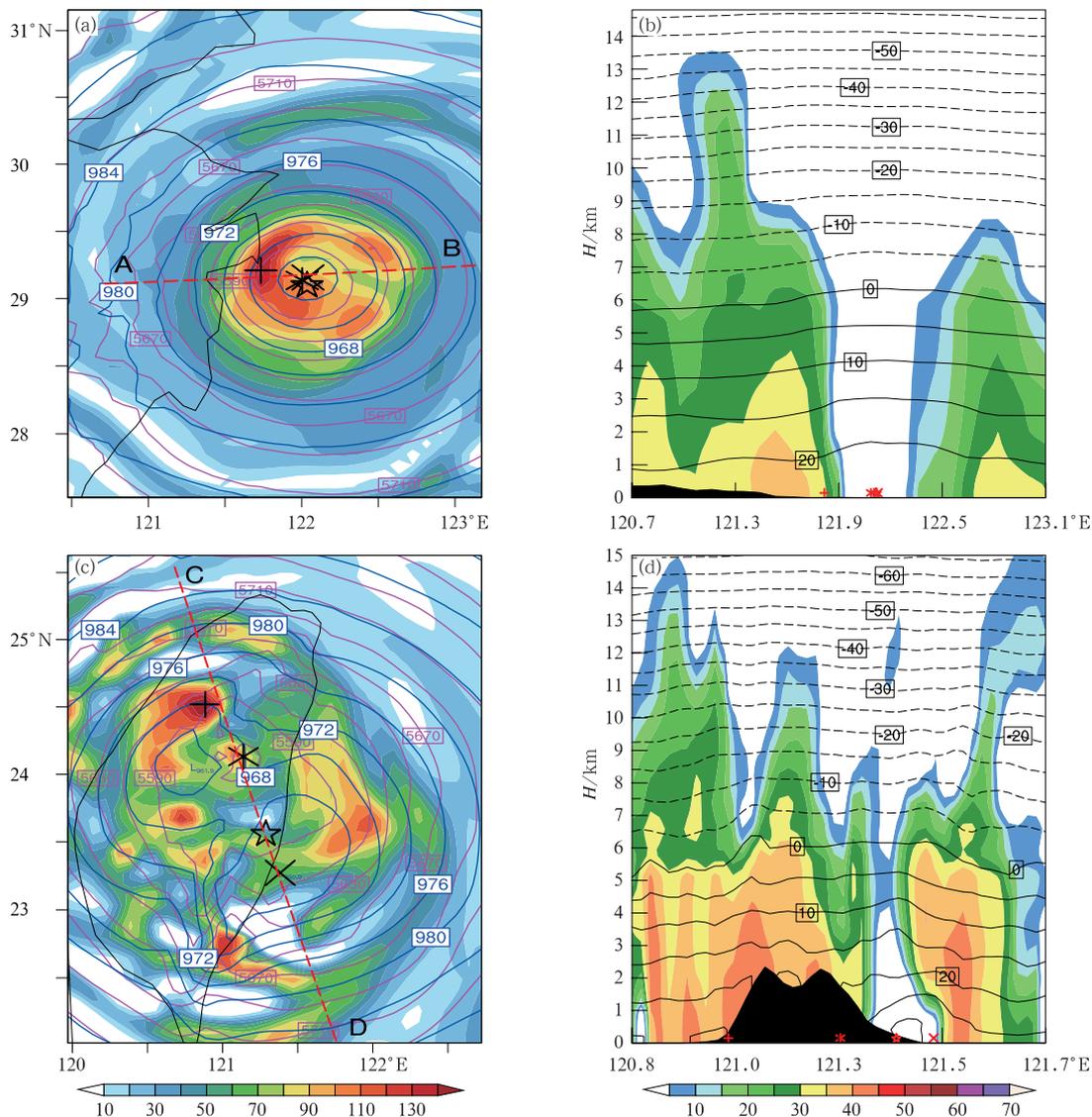


图 7 模拟的 2015 年 7 月 11 日 12 时台风灿鸿(a,b)和 2016 年 9 月 27 日 17 时台风鲇鱼(c,d)

(a,c)中心附近的海平面气压场(蓝色等值线,单位:hPa)、
500 hPa 位势高度场(红色等值线,单位:gpm)
和 500 hPa 相对涡度(填色,单位: $10^{-5} s^{-1}$),

(b,d)模拟的过 TC 中心的雷达反射率(填色,单位:dBz)和温度剖面(等值线,单位: $^{\circ}C$)

(图中星号、十字星、叉、五角星分别代表 H500,VT500,MSLP,
GVT 定位 TC 中心;图 7a,7c 中,线段 AB 和 CD 分别表示图 7b 和 7d 剖面位置)

Fig. 7 Simulation of Typhoon Chan-hom at 12:00 BT 11 July 2015 (a, b)
and simulation of Typhoon Megi at 17:00 BT 27 September 2016 (c, d)

(a, c) sea level pressure field near the typhoon center (blue contour, unit: hPa),
500 hPa geopotential height field (red contour, unit: gpm) and
500 hPa relative vorticity (colored, unit: $10^{-5} s^{-1}$),

(b, d) cross-sections of simulated radar reflectivity (colored, unit: dBz)
and temperature of the over-TC center profile (contour, unit: $^{\circ}C$)

(The asterisk, cross-shaped star, fork, five-pointed star represent the TC centers located
by H500, VT500, MSLP, GVT, respectively; in Figs. 7a, 7c, the line segments AB and CD
represent the positions of profile in Figs. 7b and 7d)

研究,建立了浙江台风涡旋追踪系统(ZJTVTS),实现了浙江区域数值预报的逐小时定位定强业务应用。该系统(图 8)主要包括区域模式(ZJWARMS和ZJWARRS)资料处理模块UPP、区域模式台风初始定位模块、GFDL Vortex Tracker分析模块GVT、数据产品格式处理模块GVT2MI和数据共享及发布模块。每当有台风进入浙江区域模式的预报区域(最外重嵌套区域,分辨率为9 km)时,ZJTVTS系统会启动接入ZJWARRS和ZJWARMS预报定位定强,ZJTVTS会在预报模式积分结束后15 min内产生本次模式预报的逐小时的台风路径和强度预报信息。ZJTVTS可以提供Automated Tropical Cyclone Forecast(ATCF)和MICAPS 7类格式数据,并且以MICAPS的7类格式数据推送到浙江省气象网络中心服务器,在业务内网浙江台风网实现同步更新显示,供预报服务人员使用。

3.2 应用效果评估

收集到2016—2018年期间ZJWARRS预报的9个台风54次预报结果和ZJWARMS预报的9个台风的31次预报结果,由于实况是6 h一次时间间隔,ZJWARRS、ZJWARMS分别是逐3 h、12 h预报一次,因此,ZJWARRS、ZJWARMS评估结果最高时间分辨率分别为3 h、6 h。采用ZJTVTS后处理方法称为新方法,原来采用MSLP方法称为旧方法,新方法应用于ZJWARRS和ZJWARMS后,对老方法定位路径出现的“锯齿”形不规则的摆动有明显的修正作用(图略),从图9a可见,新老方法对ZJWARRS的24 h预报台风的定位误差呈现出一致的逐渐增大的变化趋势,但新方法的定位误差始

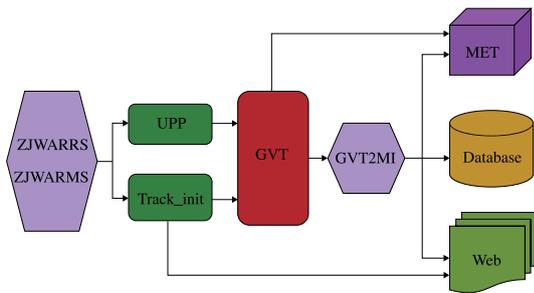


图 8 浙江台风涡旋追踪系统流程图
Fig. 8 Flow chart of Zhejiang NWP TC-vortex tracker system

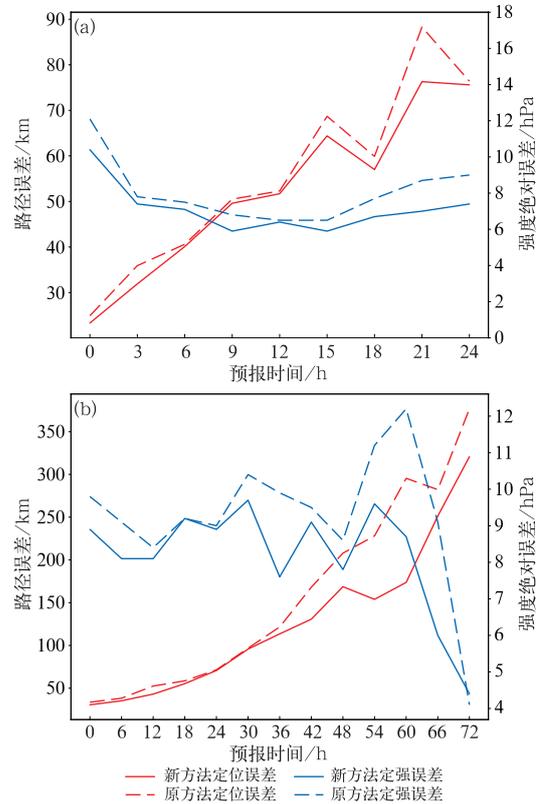


图 9 新老方法对 ZJWARRS(a)和 ZJWARMS(b)对 2016—2018 年多个 TC 预报路径平均误差和强度逐时绝对误差时间演变
Fig. 9 Comparison of time-averaged track errors and absolute errors of intensity of ZJWARRS (a) and ZJWARMS (b) by the new and old methods for multiple TCs in 2016—2018

终比老方法要小,同样,新老方法的最低中心气压的绝对误差呈现出先降后升一致变化趋势,新方法的误差小于老方法;从 24 h 平均来看,ZJWARRS 应用新方法后,路径误差从 55.3 km 减小到 52.2 km,新方法对台风路径预报准确率比老方法提高了 5.6%;台风中心附近最低气压绝对误差从 8.1 hPa 降低到 7.1 hPa,新方法对台风强度预报准确率比老方法提高了 12.3%。由图 9b 可见,新老方法对 ZJWARMS 的 72 h 预报台风的定位误差和近中心最低气压绝对误差也是呈现出一致的变化趋势,虽然有些时次新老方法定位定强的差异比较小,但新方法的定位定强误差始终比老方法要小,从 0~24、0~48、0~72 h 三时段平均来看,0~24 h 路径误差从 50.9 km 下降至 47 km,24~48 h 路径误差从 148.6 km 下降至 127.1 km,48~72 h 路径误差从 295.6 km 下降至 224.9 km,新方法对台风路径

预报准确率比老方法分别提高了 7.7%、14.4%、23.9%;对 24、48、72 h 台风中心最低气压定强绝对误差分别从 9.1、9.6、9.2 hPa 降低到 8.6、8.6、7.2 hPa,新方法对台风强度预报准确率比老方法分别提高了 5.5%、10.4%、21.7%。可见,ZJWARMS 系统应用新方法后,绝大多数时刻定位误差和定强绝对误差均明显减小了,由于老方法未能给出台风近中心最大风速,故不能比较新老方法的效果,采用新方法后得到 24 h 平均的 ZJWARRS 系统预报台风中心附近最大风速绝对误差为 $5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,采用新方法后评估得到 ZJWARMS 系统 0~24、24~48、48~72 h 的预报台风中心附近最大风速绝对误差为 4.7、5.1、4.9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

4 结论与讨论

为了探讨分析浙江区域模式系统预报台风登陆后或台风强度比较弱时会出现“锯齿”形不规则的摆动路径原因,本文开展了 GVT、MSLP、VT500、H500 四种定位定强方法对比试验,并把 GVT 引入浙江区域模式系统 ZJWARMS 和 ZJWARRS 中业务应用和对比研究,得到如下结论:

(1) 针对具有西北行后浙江近海擦边转向、台湾岛南部、中部、北部登陆后在福建再次登陆的四个典型路径台风进行模拟测试,结果表明:无论是靠近海岸线紧凑型台风或是从台湾岛不同方位登陆台风,在最靠近海岸线附近和登岛前后,H500、VT500、MSLP 方法定位路径均会出现不同程度的“锯齿”形不规则的摆动路径,尤其是 VT500 不规则摆动幅度最大,定位效果最差;GVT 方法可以较好地修正“锯齿”形不规则的摆动,使得模式预报路径更接近实况,定位效果最好,在远离海岸线,H500、MSLP 和 GVT 定位效果比较接近。不同方法对台风中心最低气压定强差异明显(由于定位的差异导致),VT500 方法误差最大,GVT 方法误差最小,MSLP、H500 方法误差介于 VT500 和 GVT 之间。不同方法对台风近中心最大风速差异不明显,主要是由于是确定最大风的方式决定的(在一定范围内找最大风速,定位的较小差异不会影响最大风速的确定。

(2) 不同方法在海上定位差异不明显,受地形影响下定位差异明显,主要是因为台风内核区由于地形的摩擦辐合及抬升作用激发中尺度对流系统及岛屿地形诱生低压系统从而造成 H500、VT500、

MSLP 方法定位偏差,针对典型个例的模拟表明 GVT 方法综合考虑了低层相对涡度最大中心、低层位势高度、海平面气压中心位置后,定位误差最小。

(3) 业务试验及检验结果表明:采用 GVT 技术建立的浙江台风定位定强系统 ZJTVTS 可以改进 ZJWARMS 和 ZJWARRS 台风预报质量,提供精细化的台风路径、中心最低气压和最大风速信息,0~24 h 平均路径和强度(中心最低气压)改进幅度在 5% 以上。

需要指出的是,虽然 GVT 技术可以改进台风预报质量,但本质上提高台风预报路径和强度仍需数值模式系统本身预报能力提高,GVT 技术应用只是起锦上添花作用。另外,模拟的台风位置和强度与模式的分辨率确实有关(限于篇幅未展开讨论),分辨率提高有利于提高台风定位精度,越易得到更强的近中心最大风速。GVT 定强中,通过给定搜索半径来搜寻最大 10 m 风速作为 TC 近中心最大风速,有可能找到台风外围由于地形等原因造成的大风,有可能使得登陆和近海台风的定强偏大,本文通过多个 9 km 分辨率模拟个例进行本地化测试,结果表明,对于小于 50 km 和 50 km 以上搜索半径获得 TC 近中心最大风速有明显差异,50 km 以上搜索半径获得 TC 近中心最大风速差异很小,但需要指出是,台风登陆减弱后,采用 250 km 以上搜索半径可能搜寻到台风外围由于地形等原因造成的大风作为最大风速情况,需要通过前后时次 TC 强度变化加以甄别。

参考文献

- 埃尔斯本里. 1994. 热带气旋全球观[M]. 陈联寿,译. 北京:气象出版社. Elsberry R L, 1994. A Global View of Tropical Cyclones [M]. Chen L S, trans. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 陈俊,平凡,王秀春,等,2017. 台湾岛地形对“麦德姆”台风的影响[J]. 大气科学,41(5):1037-1058. Chen J, Ping F, Wang X C, et al, 2017. Topographic influence of Taiwan Island on typhoon “Matmo”[J]. Chin J Atmos Sci, 41(5): 1037-1058 (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).
- 段晶晶,钱燕珍,周福,等,2017. 台风灿鸿造成浙江东北部大暴雨地形作用的数值模拟研究[J]. 气象,43(6):686-695. Duan J J, Qian Y Z, Zhou F, et al, 2017. Numerical simulation of topographic effect on heavy rainfall in northeastern Zhejiang caused

- by typhoon Chan-Hom[J]. Meteor Mon, 43(6): 686-695(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).
- 黄旋旋,朱科锋,赵坤,2014. 近海台风中心自适应定位方法研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 50(6): 855-864. Huang X X, Zhu K F, Zhao K, 2014. An algorithm for adaptive identifying and tracking eyes of typhoons near landfall[J]. J Nanjing Univ (Nat Sci), 50(6): 855-864(in Chinese).
- 矫梅燕,2010. 现代天气业务(上)[M]. 北京:气象出版社. Jiao M Y, 2010. Modernization of Weather Forecast (Volume I)[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 刘正光,喻远飞,吴冰,等,2003. 利用云导风矢量的台风中心自动定位[J]. 气象学报, 61(5): 636-640. Liu Z G, Yu Y F, Wu B, et al, 2003. Automatic location of typhoon center using cloud derived wind vectors[J]. Acta Meteor Sin, 61(5): 636-640(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).
- 邱金晶,陈锋,董美莹,等,2015. 浙江省快速更新同化系统的建立与检验评估[J]. 气象科技进展, 5(6): 6-12. Qiu J J, Chen F, Dong M Y, et al, 2015. Establishment and evaluation of Zhejiang WRF-ADAS rapid refresh system[J]. Adv Meteor Sci Technol, 5(6): 6-12(in Chinese).
- 沈新勇,朱文达,杜佳,等,2010. 2006年7—9月的台风季节预报试验[J]. 气象科学, 30(5): 676-683. Shen X Y, Zhu W D, Du J, et al, 2010. The seasonal forecasting experiment of typhoon from July to September of 2006[J]. Sci Meteor Sin, 30(5): 676-683(in Chinese).
- 滕卫平,杜惠良,1995. 用地面加密资料作登陆台风定位的客观方法[J]. 气象, 21(7): 43-46. Teng W P, Du H L, 1995. An objective method of locating landing typhoon with surface observation data[J]. Meteor Mon, 21(7): 43-46(in Chinese).
- 王鹏云,刘春涛,1998. 1996年第8号台风中尺度结构的数值研究[J]. 气象学报, 56(3): 296-311. Wang P Y, Liu C T, 1998. Numerical study on the mesoscale structure of Typhoon Herb 1996[J]. Acta Meteor Sin, 56(3): 296-311(in Chinese).
- 王咏青,宋天元,梁驹,等,2012. 西北太平洋台风季节预报的数值模拟[J]. 大气科学学报, 35(1): 24-31. Wang Y Q, Song T Y, Liang J, et al, 2012. Simulation of seasonal tropical cyclone activity over the western North Pacific by using the WRF model[J]. Trans Atmos Sci, 35(1): 24-31(in Chinese).
- 伍荣生,2007. 前言 台风研究中的一些科学问题[J]. 南京大学学报(自然科学版), 43(6): 567-571. Wu R S, 2007. Preface: some problems of typhoon study[J]. J Nanjing Univ(Nat Sci), 43(6): 567-571(in Chinese).
- 许映龙,矫梅燕,毕宝贵,等,2006. 近海台风雷达定位方法应用研究[J]. 大气科学, 30(6): 1119-1128. Xu Y L, Jiao M Y, Bi B G, et al, 2006. The applied study of the positioning method of a tropical cyclone over offshore using a Doppler radar[J]. Chin J Atmos Sci, 30(6): 1119-1128(in Chinese).
- 许映龙,张玲,向纯怡,2015. 台风定强技术及业务应用—以 Dvorak 技术为例[J]. 气象科技进展, 5(4): 22-34. Xu Y L, Zhang L, Xiang C Y, 2015. Typhoon intensity estimation technique and its operational application: with example of Dvorak technique[J]. Adv Meteor Sci Technol, 5(4): 22-34(in Chinese).
- 薛霖,李英,2016. 台湾地形诱发中尺度系统对台风 Meranti (1010) 迅速加强影响的数值研究[J]. 大气科学, 40(6): 1107-1116. Xue L, Li Y, 2016. The effect of mesoscale systems induced by the topography of Taiwan on the rapid intensification of Typhoon Meranti (1010)[J]. Chin J Atmos Sci, 40(6): 1107-1116(in Chinese).
- 余贞寿,郝增周,谢海华,等,2007. 台湾岛地形对台风“海棠”(0505) 移动路径影响的数值试验研究[J]. 热带气象学报, 23(6): 575-580. Yu Z S, Hao Z Z, Xie H H, et al, 2007. A numerical study of the effect of Taiwan Island terrain on Typhoon Haitang (0505) track[J]. J Trop Meteor, 23(6): 575-580(in Chinese).
- 余贞寿,廖胜石,黄克慧,等,2005. 0414号台风“云娜”的数值模拟[J]. 气象学报, 63(6): 903-914. Yu Z S, Liao S S, Huang K H, et al, 2005. A numerical simulation study of Typhoon Rananim[J]. Acta Meteor Sin, 63(6): 903-914(in Chinese).
- 张勇,刘黎平,张志强,等,2011. 基于组网天气雷达的台风定位方法探讨[J]. 气象科技, 39(5): 587-595. Zhang Y, Liu L P, Zhang Z Q, et al, 2011. Typhoon location in landing period based on three-dimensional mosaics of reflectivity[J]. Meteor Sci Technol, 39(5): 587-595(in Chinese).
- 郑艳,程守长,蔡亲波,等,2018. 台风鲸鱼(1508)路径和降水业务预报偏差原因分析[J]. 气象, 44(1): 170-179. Zheng Y, Cheng S C, Cai Q B, et al, 2018. Analysis on the forecast deviation of Typhoon Kujira (1508) in track and rainfall distribution[J]. Meteor Mon, 44(1): 170-179(in Chinese).
- Anthes R A, 1982. Tropical cyclones: their evolution, structure and effects[R]. Boston: American Meteorological Society, 1-208.
- Bernardet L, Tallapragada V, Bao S, et al, 2015. Community support and transition of research to operations for the Hurricane Weather Research and Forecasting Model[J]. Bull Amer Meteor Soc, 96(6): 953-960.
- Biswas M K, Stark D, Carson L, 2018. GFDL vortex tracker users guide version 3. 9 a[M]. Developmental Testbed Center, 1-35. <https://dtcenter.org/community-code/gfdl-vortex-tracker/gfdl-vortex-tracker-components-v3-9a>.
- Braun S A, 2002. A cloud-resolving simulation of Hurricane Bob (1991): storm structure and eyewall buoyancy[J]. Mon Wea Rev, 130(6): 1573-1592.
- Camargo S J, Zebiak S E, 2002. Improving the detection and tracking of tropical cyclones in atmospheric general circulation models

- [J]. *Wea Forecasting*, 17(6):1152-1162.
- Chang P L, Jou B J D, Zhang J, 2009. An algorithm for tracking eyes of tropical cyclones[J]. *Wea Forecasting*, 24(1):245-261.
- Dvorak V F, 1975. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery[J]. *Mon Wea Rev*, 103(5):420-430.
- Griffin J S, Burpee R W, Marks F D, et al, 1992. Real-time airborne analysis of aircraft data supporting operational hurricane forecasting[J]. *Wea Forecasting*, 7(3):480-490.
- Nolan D S, Zhang J A, Stern D P, 2009. Evaluation of planetary boundary layer parameterizations in tropical cyclones by comparison of in situ observations and high-resolution simulations of Hurricane Isabel (2003). Part I: initialization, maximum winds, and the outer-core boundary layer[J]. *Mon Wea Rev*, 137(11):3651-3674.
- Song P, Zhu J, Zhong Z, et al, 2016. Impact of atmospheric and oceanic conditions on the frequency and genesis location of tropical cyclones over the western North Pacific in 2004 and 2010[J]. *Adv Atmos Sci*, 33(5):599-613.
- Tao W K, Shi J J, Lin P L, et al, 2011. High-resolution numerical simulation of the extreme rainfall associated with Typhoon Morakot. Part I: comparing the impact of microphysics and PBL parameterizations with observations[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*, 22:673-696.
- Tory K J, Chand S S, Dare R A, et al, 2013. The development and assessment of a model-, grid-, and basin-independent tropical cyclone detection scheme[J]. *J Climate*, 26(15):5493-5507.
- Walsh K J E, Fiorino M, Landsea C W, et al, 2007. Objectively determined resolution-dependent threshold criteria for the detection of tropical cyclones in climate models and reanalyses[J]. *J Climate*, 20(10):2307-2314.
- Wood V T, 1994. A technique for detecting a tropical cyclone center using a Doppler radar[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 11(5):1207-1216.
- Wu L, Braun S A, Halverson J, et al, 2006. A numerical study of Hurricane Erin (2001). Part I: model verification and storm evolution[J]. *J Atmos Sci*, 63:65-86.
- 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):287-300.