

# 海洋2B卫星和中法海洋卫星散射计海面风资料在台风“米娜”模拟中的一次应用

刘晓燕<sup>1</sup>, 陈莉<sup>1</sup>, 邢建勇<sup>1</sup>, 高元勇<sup>1</sup>, 崔利民<sup>2</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

**摘要:** 以台风“米娜”(201918)为试验对象, 利用WRF模式及其3DVAR同化系统对海洋2B卫星和中法海洋卫星散射计海面风资料分别和同时进行同化, 设计3组同化试验, 对照控制试验, 分析了同化不同卫星散射计海面风资料对台风模拟的影响。试验结果表明: 对于台风路径模拟, 3种同化方案的结果均有较明显的改善; 对于台风强度模拟, 3种同化方案的效果均不明显。

**关键词:** WRF模式; 3DVAR; 台风模拟; 海洋2B卫星; 中法海洋卫星; 散射计海面风  
**中图分类号:** P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)03-0075-08

## 1 引言

我国东部毗邻西北太平洋, 因此我国是受台风影响最为严重的国家之一<sup>[1]</sup>。西北太平洋平均每年可生成28.2个台风, 在我国登陆的约有7个<sup>[2-3]</sup>, 其伴随的狂风和暴雨等灾害现象, 给所影响的省市和地区带来了严重的损失。提高台风预报水平, 及时做好防范措施, 可有效降低灾害天气带来的损失, 因此台风的准确预报对国家和社会具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。

近些年, 随着卫星和雷达等遥感技术的发展, 非常规观测资料迅速增多, 有效弥补了常规观测资料的不足。这些非常规观测资料, 不仅可以对台风进行及时准确的监测, 而且可以用于数值模式中, 通过同化技术改善模式初始场, 提高台风预报效果。黄嘉宏等<sup>[6]</sup>利用四维变分(Four-Dimensional Variational, 4DVAR)同化技术, 对南海台风“Vongfong”进行了模拟试验, 证明了QuikSCAT卫星海面风场资料可以使模拟的台风路径与实况更为接近; 王业桂等<sup>[5]</sup>探究了同化不同卫星的同一种微波遥感资料对台风路径模拟效果的影响, 证明了同化卫星微波遥感资料可以有效改善台风路径模拟, 但是同化不同

资料的效果不一; 希爽等<sup>[7]</sup>针对2008年影响我国大陆的8个典型台风开展了批量卫星资料同化和数值预报试验, 证明了卫星资料对台风预报有改进作用。

海洋2B(HY-2B)卫星和中法海洋卫星(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)均为2018年底发射, 截至2020年底, 已经有一年多的数据可供使用, 也形成了一些相关研究。陈克海等<sup>[8]</sup>利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)再分析风场数据、热带大气海洋观测计划和美国国家数据浮标中心(National Data Buoy Center, NDBC)浮标获取的海面风矢量实测数据对HY-2B散射计海面风场数据产品的质量进行了统计分析。结果表明, 不论是在开阔海域还是近海海域, HY-2B散射计海面风资料都能较好地满足业务应用的精度要求, 即风速优于2 m/s, 风向优于20°。国家卫星海洋应用中心的中法卫星在轨测试评审报告指出, CFOSAT对ECMWF再分析风场数据的风速精度在1.26~1.48 m/s之间, 风向精度在11°~15°之间, 优于风速测量误差2 m/s和风向误差20°的指标要求<sup>[9-10]</sup>。Xu

收稿日期: 2020-12-22; 修回日期: 2021-09-02。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0502805)。

作者简介: 刘晓燕(1988-), 女, 助理工程师, 硕士, 从事海面风场资料同化研究。E-mail: 973954679@qq.com

等<sup>[11]</sup>利用CFOSAT同步观测到了由台风引起的风场和海浪场,实现了台风的有效监测。到目前为止,这两种卫星散射计数据用于同化的工作还比较少。本文基于新一代高分辨率中尺度预报模式(Weather Research and Forecasting model, WRF)及其三维变分(Three-Dimensional Variational, 3DVAR)同化系统,开展这两种海洋卫星散射计海面风资料在同化中的应用,并考察同化不同卫星散射计海面风资料对台风模拟的影响。

## 2 台风个例概述

2019年第18号热带气旋“米娜”(Mitag)于2019年9月28日00时(世界时,下同)在台湾省台北市东南方约1540 km的西北太平洋上(132.1°E, 15.4°N)生成,中心附近最大风力8级(18 m/s),中心最低气压为998 hPa;随后向西北方向移动,强度逐渐加强,28日21时加强为强热带风暴级,29日09时加强为台风级;10月1日00时开始减弱,并于1日12时30分在浙江舟山普陀沿海登陆,登陆时中心附近最大风力为11级(30 m/s),中心最低气压980 hPa;之后向东北方向移动,强度逐渐减弱,并于2日12时10分前后在韩国全罗南道沿海再次登陆,登陆时为热带风暴级,最大风力9级(23 m/s),中心最低气压为988 hPa;之后继续减弱,3日06时中央气象台对其停止编号<sup>[12-13]</sup>。

## 3 资料介绍、方法介绍、模式设置及试验设计

### 3.1 资料介绍

本文所使用的数据主要有美国全球预报系统(Global Forecast System, GFS)的模式输出产品、我国自主研发的HY-2B散射计海面风数据以及与法国联合研制的CFOSAT散射计海面风数据。GFS数据每6 h输出一次,取其第12~84 h共计72 h的预报结果为本文试验提供初值(背景场)和边界条件,该数据空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。HY-2B是我国第二颗海洋动力环境卫星,于2018年10月25日发射,其上搭载的散射计主要功能为测量海面风矢量场,工作频率为13.256 GHz,极化方式包含HH和VV两

种,其中H极化的刈幅优于1350 km, V极化的刈幅优于1700 km,分辨率为 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ ,风速测量范围为 $2 \sim 24 \text{ m/s}$ ,风速精度为 $\pm 2 \text{ m/s}$ 或10%,风向精度为 $\pm 20^\circ$ <sup>[14]</sup>。CFOSAT于2018年10月29日发射,是一颗具有海风海浪联合探测能力的卫星,其上搭载的散射计是国际上首次采用旋转扇形波束扫描方式测量海洋风场的微波散射计,刈幅大于1000 km,工作频率为13.256 GHz,空间分辨率有 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ 和 $12.5 \text{ km} \times 12.5 \text{ km}$ 两种,本文使用前者,风速的有效测量范围为 $4 \sim 24 \text{ m/s}$ ,精度为 $\pm 2 \text{ m/s}$ 或10%,风向精度为 $\pm 20^\circ$ <sup>[15]</sup>。此外,台风路径和强度观测数据来自中国气象局热带气旋最佳路径数据集(网址:<https://tcdata.typhoon.org.cn>)<sup>[16]</sup>。

### 3.2 方法介绍

本文采用WRFV3.7.1及其3DVAR同化系统。3DVAR是变分法的一种方法,它是通过迭代函数,产生一个分析时刻的大气真实状态的最优估计,通过目标泛函表示为:

$$J(x) = J_b(x) + J_o(x) = \frac{1}{2} (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + \frac{1}{2} (y_o - H[x])^T O^{-1} (y_o - H[x]) \quad (1)$$

式中, $x$ 为大气状态变量; $x_b$ 为背景场资料; $y_o$ 为观测资料; $H$ 为观测算子,它将分析变量投影到观测空间; $B$ 为背景场误差协方差矩阵; $O$ 为观测误差协方差矩阵。三维变分问题就是求解上式极小值的问题。

文中使用的3DVAR同化方法依赖于WRF模式的变分同化系统,该同化系统根据设置的不同,可以识别little\_r和bufr两种数据格式。文中采用的是little\_r格式,即一种该同化系统所识别的有着固定格式的文本格式,将观测资料输出为此格式,进入同化系统,该同化系统在进行质量控制后(剔除超过阈值的数据),使用上述公式计算,便可得到优化后的初始场。

### 3.3 模式设置及试验设计

本文模拟区域的模式水平分辨率为25 km,垂直为不均匀35层,以(128°E, 23°N)为中心,共 $400 \times 300$ 个格点。试验采用的模式物理过程方案设置见表1。模拟时间为2019年9月29日12时—

10月2日12时。同化分析时刻为2019年9月29日12时,同化时间窗口为2019年9月29日09—15时。

表1 物理过程参数化方案设置

Tab.1 Parameterization scheme setting of physical processes

物理过程	参数化方案
微物理过程	WRF Single-Moment 6-class(WSM6)
长波辐射	RRTM
短波辐射	Dudhia
近地面层	Monin-Obukhov
陆面	Noah
边界层	YSU
积云参数化	KF

文中共设计了4组试验,试验HY2B、试验CFO和试验HY2B+CFO分别为同化HY-2B卫星散射计海面风数据、CFO卫星散射计海面风数据和同化以上两种数据,试验CTRL为控制试验(不同化任何资料),用于评估其他3组同化试验的效果。具体设计见表2。

表2 试验设计

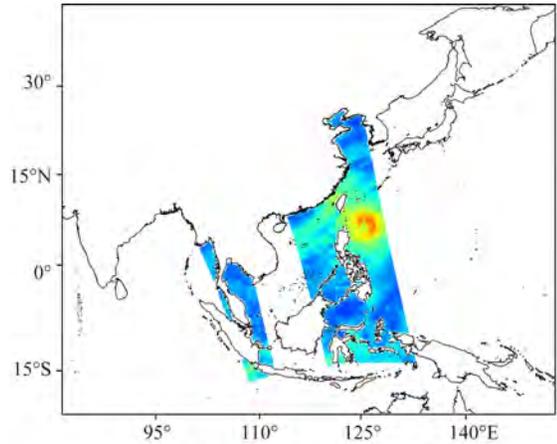
Tab.2 Design of numerical experiments

试验名称	试验说明
CTRL	直接使用GFS资料的12h预报场作为初始场,进行72h预报
HY2B	背景场为CTRL中的初始场,通过同化HY-2B卫星散射计风数据,得到优化的初始场,最后进行72h预报
CFO	背景场为CTRL中的初始场,通过同化中法卫星散射计风数据,得到优化的初始场,最后进行72h预报
HY2B+CFO	背景场为CTRL中的初始场,通过同化HY-2B卫星和中法卫星散射计风数据,得到优化的初始场,最后进行72h预报

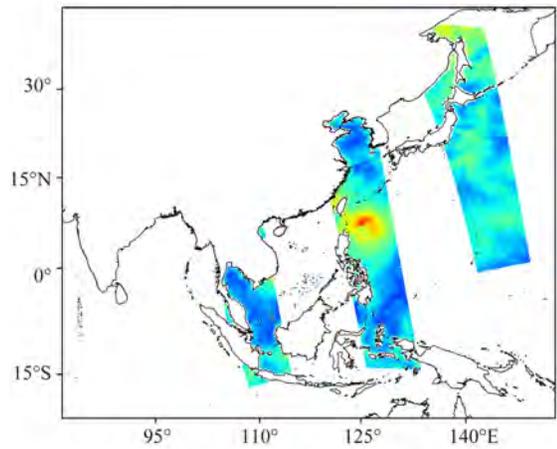
### 4 试验结果分析

#### 4.1 同化效果分析

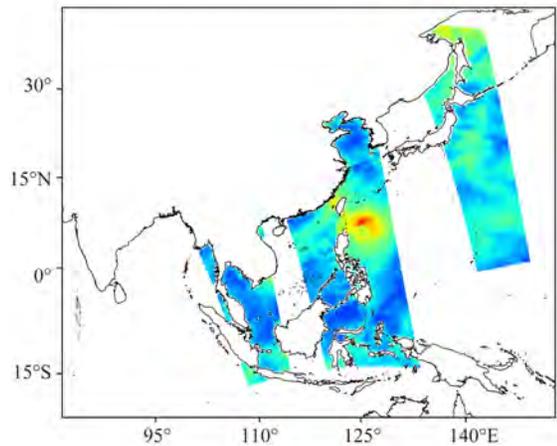
图1为3组同化试验中吸收的观测资料的分布情况。图中可以看到两颗卫星的散射计海面风数据的部分区域有重合,且都完整地捕捉到了台风位置信息,不同的是两颗卫星散射计捕捉台风信息的时间存在差异, HY-2B卫星散射计捕捉到台风的时间在09—10时之间,而CFO卫星散射计捕捉到台风



a. HY2B组试验的观测资料分布情况



b. CFO组试验的观测资料分布情况



c. HY2B+CFO组试验的观测资料分布情况

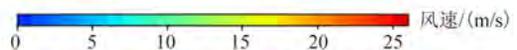


图1 3组同化试验的观测资料分布情况

Fig.1 Observation data distribution of three groups of assimilation experiments

的时间在10—11时之间,更接近于同化时间。

图2是3组同化试验使用不同卫星观测资料进

行同化后,观测资料的U/V分量分别与背景场和分析场进行比较的结果,表3更直观地展示了图2中

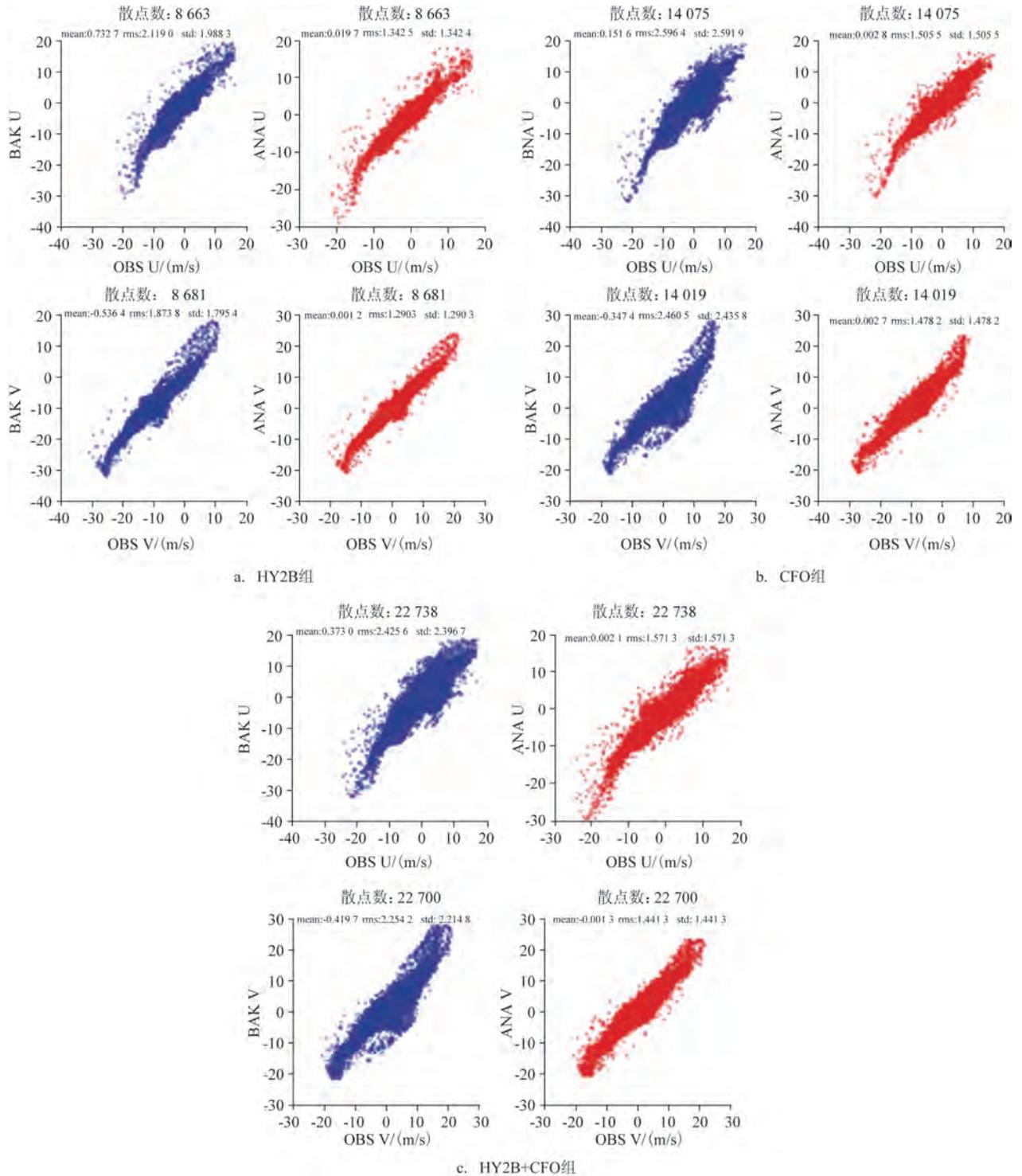


图2 3组同化试验的OMB和OMA(OBS为观测资料,BAK为背景场资料,ANA为分析场资料,单位:m/s)

Fig.2 OMB and OMA of three groups of assimilation experiments (OBS is observation data, BAK is background field data, ANA is analysis field data, unit: m/s)

表3 同化前后U分量的背景场与分析场对比结果

Tab.3 Comparison of background field and analysis field of U component

对比要素	HY2B		CFO		HY2B+CFO	
	BAK	ANA	BAK	ANA	BAK	ANA
平均误差	0.733	0.020	0.152	0.003	0.373	0.002
均方根值	2.119	1.343	2.596	1.506	2.426	1.571
标准差	1.988	1.342	2.592	1.506	2.400	1.571

同化前后的U分量的分析结果。由图2和表3均可以看出,不论是使用HY-2B卫星散射计资料、CFO卫星散射计资料亦或二者和,其效果都是一致的,相对于背景场,分析场的平均误差(mean)、均方根值(rms)和标准差(std)均更接近观测场,即 $OMA < OMB$  (OMA代表观测值与分析场值的差,OMB代表观测值与背景场值的差),改进十分明显。当 $OMA < OMB$ 时,说明分析场相对于背景场更接近于观测,从而说明同化过程是有效的,对初始场的调整起到了正效应。

此外,我们还可以看到HY2B试验中观测资料与背景场的差异小于其他两组试验的差异,说明HY-2B卫星散射计海面风资料与背景场资料接近。从初始增量场图(略)也可以看出,HY2B试验的增量小于其他两组试验增量,这与图2反映出的特征吻合。

#### 4.2 台风路径72 h模拟结果分析

图3是4组试验的台风路径72 h模拟结果与台风实况的比较。由图可以看出,4组试验结果整体趋势比较接近,与实况相比,CTRL和HY2B试验模拟的路径偏西,其他两组试验模拟的路径偏东,且4组试验模拟的台风移动速度都要慢于实况。台风移动既受台风内部因子的作用又受环境条件的影响,环境条件主要是指高空引导气流,但4组试验的500 hPa位势高度场(图略)未能将路径不同的原因体现出来,说明同化过程对该高度场的影响不太明显,同时还说明造成4组试验台风移动路径差异的原因可能是台风内部因子的作用。

图4是4组试验在72 h内逐6 h的路径误差变化。由图可以看出,HY2B试验的路径误差趋势跟CTRL试验结果比较相似,均为在模拟后期误

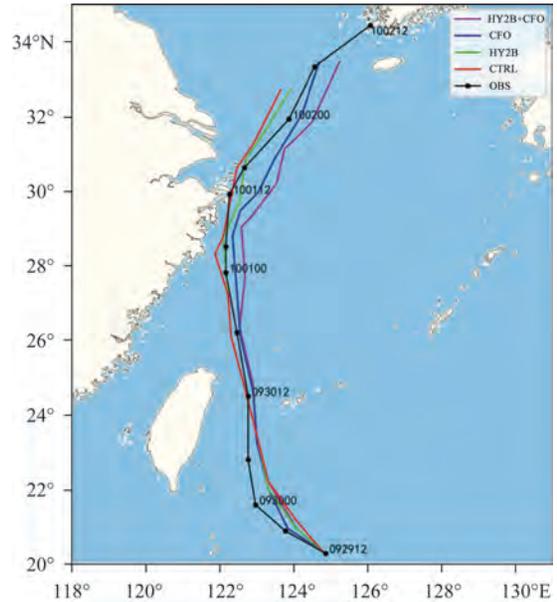


图3 台风“米娜”的模拟路径和实况路径

Fig.3 Simulated tracks and observed track of typhoon "Mitag"

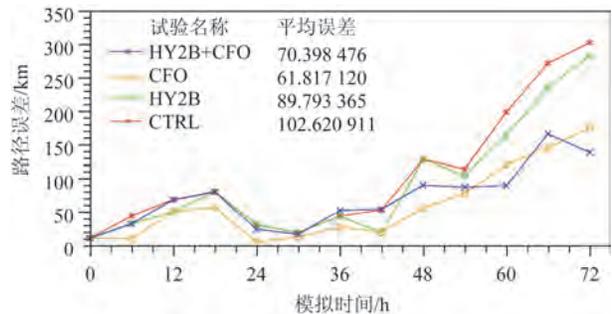


图4 4组试验的台风路径模拟误差逐6 h变化

Fig.4 Temporal variations of errors in typhoon track simulations at 6-hour interval for 4 groups of experiments

差明显增大;HY2B试验的结果除个别时刻与CTRL试验结果比较一致外,其他时刻的效果是优于CTRL试验的;CFO试验结果明显优于控制试验CTRL,在整个模拟时段内,误差均小于CTRL;最后一组同化试验HY2B+CFO结果的模拟误差随时间变化不大,在预报前36 h略微优于CTRL,在42 h时误差大于CTRL,之后随着CTRL的误差快速增大将二者之间的差距拉开,HY2B+CFO试验结果在后期明显优于CTRL。从图中左上角的统计结果也可以得知,3组同化试验对于台风路径的模拟均起到了较好的改善效果。

从图4中我们可以明显地看到,在模拟时段的

前 54 h 内,路径误差均控制在 150 km 以内, 54 h 之后, CTRL 和 HY2B 两组试验的误差开始明显增大, 72 h 时误差达到 300 km 左右, 而另外两组试验的误差随模拟时效增大不明显。

### 4.3 台风强度 72 h 模拟结果分析

#### 4.3.1 台风中心海平面最低气压分析

图 5 为台风中心海平面最低气压模拟结果和实况对比情况。由图可以看出, 4 组试验结果走势比较一致, 均为气压先减小后增大, 与实况的变化趋势也基本一致, 但是 4 组试验结果在模拟前 60 h 均大于实况, 即模拟的台风强度均偏弱, 在模拟时段的后 12 h 里 4 组试验出现了分支, CFO 和 HY2B+CFO 两组试验模拟的台风强度偏强。

#### 4.3.2 台风中心附近最大风速分析

图 6 为台风中心附近最大风速模拟结果和实况对比情况。由图可以看出, 4 组试验结果走势比较

一致(起报时刻除外), 均为风速先增大再减小, 与实况的变化趋势也基本一致, 只是 4 组试验的台风强度模拟结果均比实况弱。

不论是从台风中心最低气压还是中心附近最大风速情况分析, 4 组试验模拟的台风强度均偏弱。分析其原因, 可能因为台风强度主要和热力结构直接相关, 本文的观测资料是卫星散射计海面风资料, 更多的是直接改进台风风场等动力结构, 虽然利用背景误差协方差, 风场的调整可以传递到其他与热力结构有关的控制变量, 但影响有限, 因此对台风的强度改进不明显。

## 5 总结

本文进行了 HY-2B 和 CFO 两颗卫星散射计海面风资料在同化中的应用。基于 2019 年第 18 号台风“米娜”, 利用 WRF 模式及其 3DVAR 同化系统对不同的海洋卫星散射计海面风资料开展同化试验, 考察了同化不同散射计海面风对台风模拟效果的影响。结论如下:

(1) 对于台风路径, 4 组试验的模拟和实况较为一致, 且 3 组同化试验的结果均优于 CTRL 试验, CFO 试验效果最优, 其次是 HY2B+CFO, HY2B 试验效果相对弱一些, 可能是因为 CFOSAT 散射计海面风资料的时间更接近模拟时刻。

(2) 对于台风强度, 4 组试验的模拟情况与实况的变化趋势较为一致, 但是模拟结果比实况偏弱, 3 组同化试验未在台风强度模拟中体现出同化的优势, 只有在海平面最低气压模拟中, CFO 和 HY2B+CFO 两组试验的结果略微优于 CTRL。

基于上述结论可知, 同化不同海洋卫星散射计海面风资料对于此次台风路径的模拟都具有不同效果的改善, 但是对于台风强度的模拟效果比较微弱。由于本文结论只是基于个例试验的卫星散射计海面风场数据的一次应用, 具有一定的局限性, 其结论并不能直接代表这两种卫星散射计海面风场数据的真实效果, 因而下一步将考虑进行一年或更长时间内的台风模拟试验, 得出更具代表性和说服力的结论。

致谢: 所有 CFOSAT 数据由中国国家航天局 (CNSA) 和法国国家空间研究中心 (CNES) 提供。

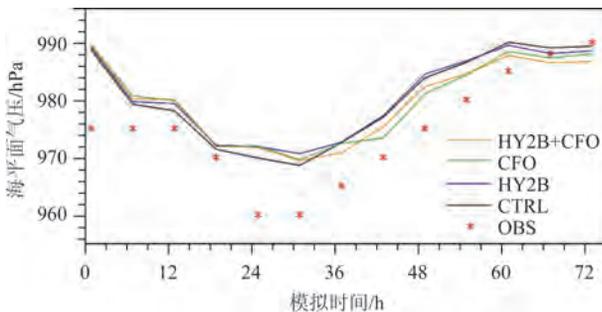


图 5 台风中心海平面最低气压模拟结果和实况对比  
Fig.5 Comparison of simulation results of lowest sea-level pressure in typhoon center and CMA best track data

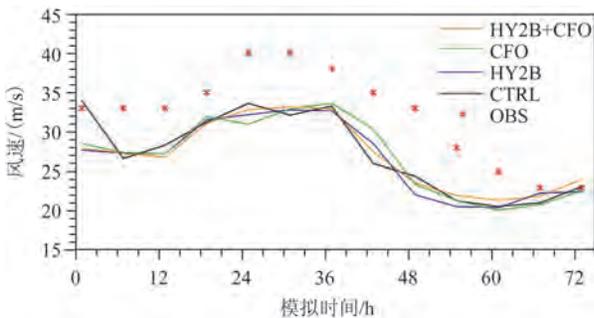


图 6 台风中心附近最大风速模拟结果和实况对比  
Fig.6 Comparison of simulation results of maximum wind speed in typhoon center and CMA best track data

CFOSAT 和 HY-2B 数据来源于 <https://osdds.nsoas.org.cn>.

### 参考文献:

- [1] 刘天绍, 刘孙俊, 杨玺, 等. 1951-2015 影响广东沿海台风的统计分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(4): 68-74.  
Liu T S, Liu S J, Yang X, et al. Statistical analysis of the typhoon influencing Guangdong province during 1951-2015[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(4): 68-74.
- [2] 郑文荣, 李江南, 蔡建春, 等. 西北太平洋超强台风时空分布特征及其成因[J]. 海洋预报, 2009, 26(4): 19-24.  
Zheng W R, Li J N, Cai J C, et al. An analysis on the super strong typhoon in the northwest Pacific[J]. Marine Forecasts, 2009, 26(4): 19-24.
- [3] 许映龙, 张玲, 高拴柱. 我国台风预报业务的现状及思考[J]. 气象, 2010, 36(7): 43-49.  
Xu Y L, Zhang L, Gao S Z. The advances and discussions on China operational typhoon forecasting[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(7): 43-49.
- [4] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979.  
Chen L S, Ding Y H. An introduction to the West Pacific Ocean typhoons[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [5] 王业桂, 张斌, 蔡其发, 等. 不同卫星微波遥感资料同化对台风路径模拟的影响[J]. 大气科学, 2018, 42(2): 398-410.  
Wang Y G, Zhang B, Cai Q F, et al. Effects of assimilating microwave remote sensing data of different satellite on the simulation of typhoon track[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(2): 398-410.
- [6] 黄嘉宏, 李江南, 魏晓琳, 等. 同化 QuikSCAT 资料对台风 Vongfong(2002)数值模拟的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2006, 45(4): 116-120.  
Huang J H, Li J N, Wei X L, et al. Assimilation of QuikSCAT data and its impact on prediction of typhoon Vongfong(2002)[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2006, 45(4): 116-120.
- [7] 希爽, 马刚, 张鹏. ATOVS 微波观测对 2008 年台风预报影响的初步评估[J]. 热带气象学报, 2014, 30(4): 700-706.  
Xi S, Ma G, Zhang P. Preliminary evaluation of the impacts of ATOVS microwave observation in typhoon numerical forecast in 2008[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 30(4): 700-706.
- [8] 陈克海, 解学通, 张金兰, 等. HY-2B 卫星散射计海面风场产品质量分析[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(6): 30-40.  
Chen K H, Xie X T, Zhang J L, et al. Accuracy analysis of the retrieved wind from HY-2B scatterometer[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2020, 39(6): 30-40.
- [9] 董晓龙, 朱迪, 林文明, 等. 中法海洋卫星微波散射计在轨性能验证[J]. 空间科学学报, 2020, 40(3): 425-431.  
Dong X L, Zhu D, Lin W M, et al. Orbit performances validation for CFOSAT scatterometer[J]. Chinese Journal of Space Science, 2020, 40(3): 425-431.
- [10] Lin W M, Dong X L, Portabella M, et al. A perspective on the performance of the CFOSAT rotating fan-beam scatterometer[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(2): 627-639.
- [11] Xu Y, Liu J Q, Xie L L, et al. China-France Oceanography Satellite (CFOSAT) simultaneously observes the typhoon-induced wind and wave fields[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 38(11): 158-161.
- [12] 王海平, 董林. 2019 年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(2): 1-9.  
Wang H P, Dong L. Overview of typhoon activities over western North Pacific and the South China Sea in 2019[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(2): 1-9.
- [13] 孙舒悦, 董林. 2019 年 9 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2019, 45(12): 1762-1768.  
Sun S Y, Dong L. Analysis of the September 2019 atmospheric circulation and weather[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(12): 1762-1768.
- [14] 刘圆, 韩进喜. 海洋卫星应用系统现状及发展[J]. 国际太空, 2019(3): 36-40.  
Liu Y, Han J X. The status and development of marine satellite application system[J]. Space International, 2019(3): 36-40.
- [15] Liu J Q, Lin W M, Dong X L, et al. First results from the rotating fan beam scatterometer onboard CFOSAT[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(12): 8793-8806.
- [16] Ying M, Zhang W, Yu H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.

## An application of scatterometer sea surface wind data of HY-2B satellite and China-France Oceanography satellite in typhoon "Mitag" simulation

LIU Xiaoyan<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>, XING Jianyong<sup>1</sup>, GAO Yuanyong<sup>1</sup>, CUI Limin<sup>2</sup>

(1. National Marine Environment Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081 China)

**Abstract:** In this paper, taking typhoon "Mitag" (1918) as an example, the WRF model and its 3DVAR assimilation system are used to analyze the influence of assimilating different sea surface wind data of different satellite scatterometers on typhoon simulation. Three groups of assimilation experiments are designed by assimilating the scatterometer sea surface wind data of HY-2B satellite and China-France Oceanography satellite separately and simultaneously. The experimental results show that the simulation results of typhoon track could be significantly improved by using the three assimilation schemes, while the simulation results of typhoon intensity are not significantly improved by using the three assimilation schemes.

**Key words:** WRF model; 3DVAR; typhoon simulation; HY-2B satellite; China-France Oceanography satellite; scatterometer sea surface wind