

王业桂, 张斌, 蔡其发, 等. 2018. 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, 42 (2): 398–410. Wang Yegui, Zhang bin, Cai Qifa, et al. 2018. Effects of assimilating microwave remote sensing data of different satellite on the simulation of typhoon track [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (2): 398–410, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1709.17150.

不同卫星微波遥感资料同化对台风路径模拟的影响

王业桂 张斌 蔡其发 黄勇 兰伟仁

解放军 61741 部队, 北京 100094

摘 要 本文以 2015 年 13 号超强台风“苏迪罗”为个例, 利用 WRF 模式及其 3DVar 同化系统对 NOAA15、NOAA18 和 NOAA19 的 AMSU-A 微波遥感资料分别同化及组合同化, 探究同化不同卫星的同一种微波遥感资料对于台风路径模拟效果的影响。结果表明: 同化不同卫星的同一种微波遥感资料对于台风路径模拟具有不同的调整, 本文中 NOAA15 的同化效果最好, 其次是 NOAA18, 最后是 NOAA19; 同时同化 NOAA15、NOAA18 和 NOAA19 的 AMSU-A 资料并没有取得最好的同化效果, 而组合 NOAA15 和 NOAA18 则取得了最好的同化效果, 即不是同化的卫星数量越多, 同化效果越好; 同化试验 3 个时刻的增量场表明同化不同卫星的同一种微波遥感资料对物理场具有不同的调整, 这与其对台风模拟路径的调整有着较好的对应, 相对于温度场、海平面气压场、位势高度场和风场的增量结构与模拟台风路径的调整更为密切。

关键词 台风路径 数值模拟 同化 AMSU-A 资料 增量场

文章编号 1006-9895(2018)02-0398-13

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1709.17150

Effects of Assimilating Microwave Remote Sensing Data of Different Satellite on the Simulation of Typhoon Track

WANG Yegui, ZHANG Bin, CAI Qifa, HUANG Yong, and LAN Weiren

Unit 61741, PLA, Beijing 100094

Abstract In this study, AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit-A) microwave remote sensing data of NOAA15, NOAA18, and NOAA19 are assimilated respectively and combinedly to simulate the super typhoon “Soudelor” (Number 13, 2015) using the WRF model and its 3DVar assimilation systems. The objective of the present study is to investigate the effects of assimilating the same type of microwave remote sensing data from different satellites on the simulation of typhoon track. The results demonstrate that assimilation of the same type of microwave remote sensing data from different satellites leads to different effects on the simulation of typhoon track. In this paper, the assimilation effect of NOAA15 is the best, followed by that of NOAA18, and the effect of NOAA19 data assimilation is the worst. Assimilating the AMSU-A data of NOAA15, NOAA18, and NOAA19 simultaneously didn’t yield the best assimilation effect, whereas assimilating the AMSU-A data of combined NOAA15 and NOAA18 had the best assimilation effects. The above results indicate that assimilating observation data of more satellites doesn’t necessarily lead to better assimilation effect. The increment fields at three different times in the assimilation experiments demonstrate that assimilating the same type of microwave remote sensing data from different satellites lead to different adjustments on physical fields, which correspond well to the

收稿日期 2017-04-10; 网络预出版日期 2017-09-05

作者简介 王业桂, 男, 1963 年出生, 高级工程师, 主要从事数值预报研究。E-mail: wyegui@sohu.com

通讯作者 张斌, E-mail: zhangbinzhb1985@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41375105

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41375105)

adjustments on the simulation of typhoon track. Compared to the incremental structures of temperature, sea level pressure, geopotential height, and winds are more closely linked with the adjustment of the simulation of typhoon track.

Keywords Typhoon track, Numerical simulation, Assimilation, AMSU-A data, Incremental field

1 引言

我国紧邻西北太平洋，频繁的台风登陆导致的人员伤亡、经济损失十分严重，由此造成的灾害位居十大自然灾害之首（张晓慧等，2015），因此台风的准确预报对国家和社会具有重要意义。近年来中尺度数值模式成为对台风预报的一个重要手段，台风的路径预报是数值预报中的一个难点问题（希爽等，2014）。数值模式预报作为一个初值问题，准确的初始场是预报台风路径的重要条件，由于台风发生在热带洋面上，海洋上常规资料的严重缺乏，导致实际研究和业务中很难对台风的初始场结构进行精细化的描述，这使得对台风的分析和预报存在很大的困难（刘松涛等，2006）。卫星微波遥感资料具有观测范围广、时空分辨率高和全天候观测的特点（张斌等，2014），可以极大缓解海洋上常规资料不足的问题，能够对台风进行很好的监测，因而同化卫星微波遥感资料对提高台风预报精度具有重要的意义和作用（杨春等，2017）。

NOAA（National Oceanic and Atmospheric Administration）系列极轨卫星的 ATOVS（Advanced TIROS-N Operational Vertical Sounder）微波遥感观测具有探测通道多，空间分辨率高等优势，而且可以探测云天气条件下大气的温度和湿度，因此近几十年来得到了广泛的应用（Kidder et al., 2000; Brueske and Velden, 2003; Knaff et al., 2004; Bessho et al., 2006; Yu et al., 2006）。English et al.（2000）对 NOAA 系列极轨卫星的微波遥感资料进行同化，数值预报的误差得到了明显减小。Okamoto et al.（2005）利用 3DVar 方法对 ATOVS 资料直接同化，分析时刻的温度场和水汽场的精度得到了明显提高。Le Marshall et al.（2002）把 ATOVS 资料同化到台风的初始场中，台风内部结构得到了更为准确地描述，48 h 的路径预报误差大大减小。NCEP（National Centers for Environmental Prediction）、ECMWF（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）和 JMA（Japan Meteorological Agency）等国外数值预报中心中对 ATOVS 微波遥感资料的同化做了许多工作（Eyre, 1992; Eyre et al.,

1993; McNally and Vesperini, 1996; Okamoto and Tada, 2000; Harris and Kelly, 2001; Lee and Lee, 2003），有效提高了数值预报的准确度。国内，Zhang et al.（2004a, 2004b）以 0205 号台风威马逊为例，利用 3DVar 方法对 AMSU 微波遥感资料同化，结果更加合理的反映了台风三维结构，有效地调整了台风的温度场和环流场。袁炳等（2010）利用 4DVar 对 ATOVS 资料同化，取得了更为精细的台风环流和温压湿场结构，进而提高了预报结果。刘贝等（2014）利用 3DVar 方法对 ATOVS 资料进行同化，发现 AMSU-A（Advanced Microwave Sounding Unit-A）微波遥感资料对台风的路径模拟有较明显的改善效果。希爽等（2014）基于 3DVar 同化方法，针对 2008 年的 8 个典型台风进行 ATOVS 资料的同化，结果表明台风路径预报得到了有效的改善。张晓慧等（2015）基于 En3DVar 方法对 ATOVS 资料进行同化，有效的提高双台风的路径及伴随的强降水预报。

上述研究表明了同化 NOAA 系列卫星的微波遥感资料在台风路径预报中的重要作用，但研究着重考察的是同化某类微波遥感资料后对台风路径预报结果的影响，而对于同一种微波遥感资料，不同卫星的扫描轨道有着明显的不同，那么同化不同卫星的同一种微波遥感资料对于台风路径的预报影响有何不同呢？同化更多颗卫星的微波遥感资料可以增加同化的资料量，那么是否同化更多颗卫星的微波遥感资料能够取得更好的台风路径预报效果呢？这些问题对于合理同化卫星微波遥感资料具有重要的意义，然而目前对这些问题的研究相对较少，基于此，本文进行相关探究。ECMWF 比较了各种资料同化对改善预报的贡献率，结果表明微波遥感资料 AMSU-A 居首位，因此本文对 NOAA 系列卫星的 AMSU-A 资料开展同化研究，考察对比同化不同卫星的同一种微波遥感资料对台风路径预报的调整和对物理场的影响。

2 台风个例简介

2015 年第 13 号超强台风“苏迪罗”于 7 月 30 日 12 时（协调世界时，下同）在西北太平洋洋面

上生成,强度逐渐加强,8月2日进入快速强化期,8月3日加强为超强台风级,“苏迪罗”具有发展迅猛的特点,其强度在两天时间里由强热带风暴级加强为强台风级,中心附近最大风力达到其巅峰强度17级(65 m s^{-1})以上。8月8日以中心附近最大风力15级(48 m s^{-1})在台湾省花莲市登陆,并于同日14时以中心附近最大风力13级(38 m s^{-1})在福建省莆田市登陆,随后又进入内陆,“苏迪罗”对我国台湾、福建、广东、江西、湖北、浙江、上海、安徽、江苏等地均造成了较大的影响,影响范围很广,它也成了2015年首个两次登陆中国的台风。“苏迪罗”8月9日减弱为热带低压,8月10日9时停止编号。由于台风“苏迪罗”给中国东部造成严重灾害和经济损失,2016年的第48届台风委员会会议上,“苏迪罗”被除名。

3 资料使用和数值模式设置

3.1 资料使用

NOAA系列极轨卫星的ATOVS由3个相互独立的仪器组成:高分辨率红外探测器3型(HIRS-3),先进的微波探测器A型(AMSU-A)和B型(AMSU-B),其中AMSU-A是一种交叉、逐线扫描式辐射计,仪器由15个通道组成,半功率点的瞬时视场角为 3.3° ,星下点分辨率约为45 km。AMSU-A微波遥感探测器搭载在NOAA15、NOAA16、NOAA17、NOAA18和NOAA19上,由于NOAA17存在仪器故障,NOAA16在本文的模拟区域没有过境资料,因而本文同化的为NOAA15、NOAA18和NOAA19的AMSU-A微波遥感资料。试验中的初始场和边界条件是NCEP $1^\circ\times 1^\circ$ 的再分析资料。

3.2 数值模式及设置

本文采用WRF模式(3.8.1版本)及其3DVar同化系统(Barker et al., 2003)。模拟区域的水平方向为 200×125 个格点,格距为30 km,垂直方向为35层。模拟时间为2015年8月6日06时到2015年8月9日00时(60 h),模式物理过程采用Kain-Fritsch积云参数化方案,WSM6微物理参数化方案,RRTM长波辐射方案,Dudhia短波辐射方案,YSU边界层方案。同化分析时刻为2015年8月6日06时,同化时间窗为分析时刻前后3 h,考虑到模式的“spin-up”问题(张斌等, 2014),试验的背景场均为6 h的预报场,即将2015年8月6日00时的NCEP $1^\circ\times 1^\circ$ 资料积分6 h的预报场作为背景场。

4 数值试验及模拟结果

4.1 不同卫星的AMSU-A资料的同化效果

为了探究同化不同卫星的同一种微波遥感资料对于台风模拟的影响,本节设计了4个试验,试验DA-15、试验DA-18和试验DA-19分别为同化NOAA15、NOAA18和NOAA19的AMSU-A资料,试验CTRL为控制试验(不同化任何资料),用于考察同化试验的效果。图1为三颗卫星在同化时间窗内模拟区域的AMSU-A资料覆盖情况,可以看到NOAA19覆盖范围相对大些,其次是NOAA18,最后是NOAA15,但总体来讲三颗卫星覆盖范围大小相当。

图2为4个试验在60 h内的逐6 h路径误差变化,括号内数值为60 h的路径平均误差。相对于试验CTRL,各同化试验均能不同程度减少了台风路径的模拟误差,这表明同化各卫星的AMSU-A微波遥感资料的有效性。进一步对NOAA15、NOAA18和NOAA19的AMSU-A同化效果对比,可以看出各卫星的微波遥感资料同化对台风路径模拟的改善有着明显的不同。相对于试验CTRL,分析时刻,试验DA-15和DA-18的路径误差减小最大,而试验DA-19的路径误差变化不大;从60 h的平均路径误差来看,整体上试验DA-15的同化效果最好,其次是试验DA-18,最后是试验DA-19,这与分析时刻的路径误差变化有较好的对应。然而前36 h内,相对于试验CTRL,试验DA-15和试验DA-19的路径误差得到了明显减小,试验DA-18则较差,甚至出现了负效果,这与其分析时刻和60 h整体的路径误差减小情况不一致,因此进一步对模拟的台风路径进行分析(图3)。相对于试验DA-19,试验DA-18模拟的台风路径整体更为偏北,这与实况更为接近,但试验DA-18模拟的台风西进偏快,因此虽然模拟路径整体偏北更为接近实况,但是由于西进偏快,导致计算的路径误差偏大,而试验DA-19虽然模拟的路径相对偏南,然而西进速度相对较小,与实况更为接近,综合计算的路径误差反而更小。安成等(2014)指出,台风路径预报误差应包括距离误差和方向误差两个方面,本文的路径误差仅考虑了业务和研究上常用的距离误差,如果从方向误差来看,那么前36 h内,试验DA-18相比于试验DA-19模拟更好,因此有必要在以后的研究中将方向误差也纳入到评估标准中。图2中从36 h开

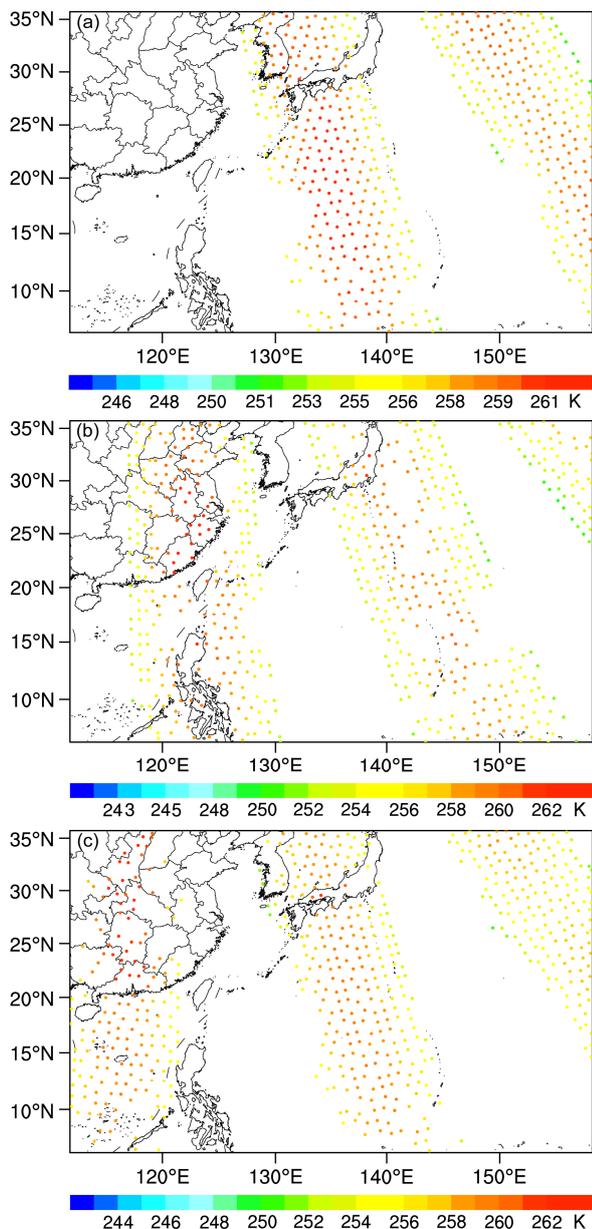


图 1 (a) NOAA15、(b) NOAA18 和 (c) NOAA19 在模拟区域的 AMSU-A 资料覆盖，扫描点颜色代表亮温大小（单位：K）
Fig. 1 The AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit-A) data coverage over the simulation areas for (a) NOAA15, (b) NOAA18, and (c) NOAA19, the color of scanning point represents the brightness temperature (units: K)

始，试验 DA-19 的改善效果逐渐下降，而试验 DA-18 的改善效果则上升，且优于试验 DA-19，这可能与试验 DA-18 的分析时刻路径误差更小、前 36 h 的路径整体与实况更为接近有关。36 h 到 48 h 内，试验 DA-19 甚至出现了负效果，这进一步说明了试验 DA-18 前期模拟的台风路径更为合理，同时也进一

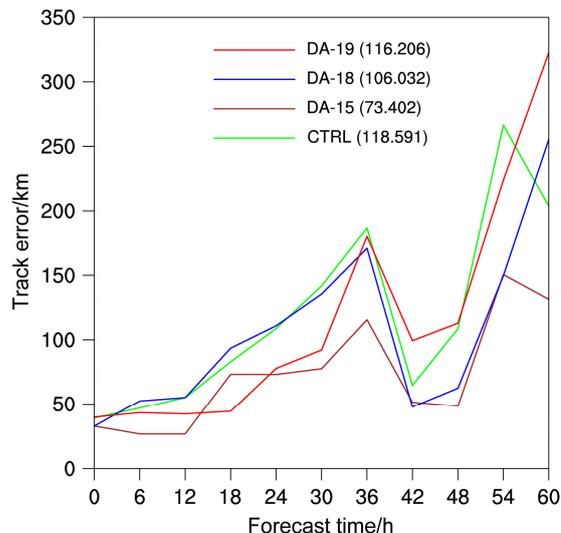


图 2 试验 DA-15、DA-18、DA-19 和 CTRL 的台风路径模拟误差逐 6 h 变化，括号内的数字为 60 h 平均的路径误差（单位：km）

Fig. 2 Temporal variations of errors in typhoon track simulations at 6-hour interval for experiment DA-15 (assimilating AMSU-A data of NOAA15), experiment DA-18 (assimilating AMSU-A data of NOAA18), experiment DA-19 (assimilating AMSU-A data of NOAA19), experiment CTRL (no data assimilated). Numbers in brackets represent the 60-hour averages of track errors (units: km)

步说明了考虑方向误差的重要性。从图 2 可以看出，各同化试验的误差在 36 h 后有突然的下降。

从图 3 中可以看出同化各卫星的 AMSU-A 微波遥感资料后，总的来说对台风前期的模拟改善作用较大，而在后期效果减弱，特别是 48 h 之后，各同化试验模拟的台风路径都较为偏南，相对于试验 CTRL 改善较小。这可能是由于初期，模拟结果对初始场较为敏感，调整物理场能够有效地改善台风路径模拟，而在后期，模式的动力过程起主导作用，初始场的影响变得微弱 (Zhang et al., 2017)。本文中仅同化了分析时刻（单时刻）的微波遥感资料，对后期台风模拟的影响较小，因此，下一步将考虑循环同化的方式，同化更多时刻的卫星微波遥感资料。

本节的试验结果表明，同化不同卫星的同一种微波遥感资料能够不同程度改善台风路径模拟结果，尽管各卫星的 AMSU-A 资料覆盖度相差不大（图 1），然而其同化结果存在着较大差异，本文中 NOAA15 的同化效果最好，其次是 NOAA18，最后是 NOAA19。

4.2 不同卫星的 AMSU-A 资料组合同化

4.1 节表明同化不同卫星的 AMUS-A 微波遥感

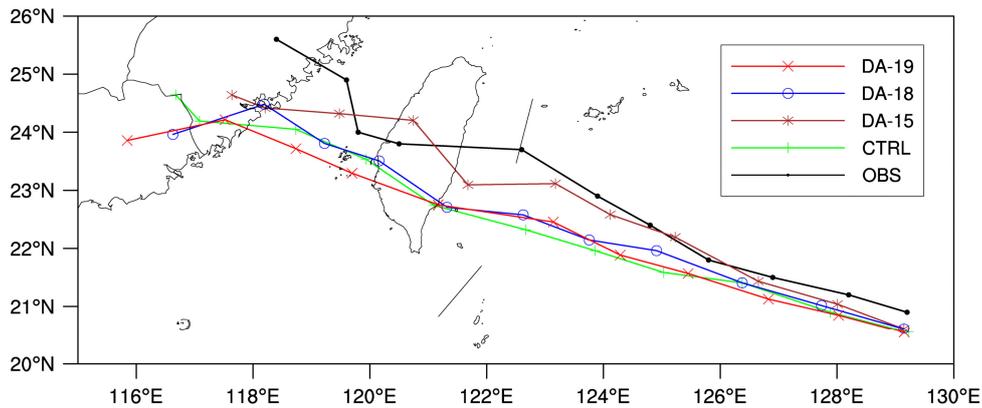


图3 试验 DA-15、DA-18、DA-19 和 CTRL 模拟的逐 6 h 台风路径以及实况 (OBS)

Fig. 3 Simulated typhoon tracks at 6-hour interval for experiments DA-15, DA-18, DA-19, CTRL, and real track (OBS)

资料不同程度地改善了台风路径模拟的效果。考虑到各卫星的运行轨道不同,因而扫描区域不同,如图 1 所示,不同卫星间的微波遥感资料可以互补,增加同化的资料量,那么同时同化这些卫星的 AMSU-A 资料是否能够进一步提高模拟的效果?基于此,本节设置了 2 个组合同化试验,试验 DA-589 为同时同化 NOAA15、NOAA18 和 NOAA19 的 AMSU-A 资料,试验 DA-58 为同时同化 NOAA15 和 NOAA18 的 AMSU-A 资料。

图 4 为 4 个试验 60 h 内的逐 6 h 路径误差变化和模拟路径,括号内为对应试验 60 h 的平均路径误差,图 5 为相应的模拟路径。为了对比分析,图 4 和图 5 也给出了试验 CTRL 和单颗卫星同化效果最好的试验 DA-15 的结果。

从图 4 可以看出,相对于试验 CTRL,试验 DA-589 减小了台风路径的模拟误差,这表明了组合同化 AMSU-A 微波遥感资料的有效性。但进一步综合对比试验 DA-589 和试验 DA-15 的路径模拟,试验 DA-589 并没有进一步减小路径误差,也就是说尽管试验 DA-589 同化了三颗卫星的 AMSU-A 资料,同化了更多卫星的微波遥感资料,然而相对于单颗同化效果最好的试验 DA-15,模拟结果并没有进一步提高,这从图 5 也可以清晰的反映。这说明并不是同化的卫星数量越多,微波遥感资料量越大,同化效果越好,这可能是由于不同卫星同一种仪器性能差异、扫描位置偏差带来的误差在同化系统内随之带来累积的误差,反而降低了同化效果(李兴武等, 2012)。

基于上述结果,试验 DA-58 将改善效果最小的

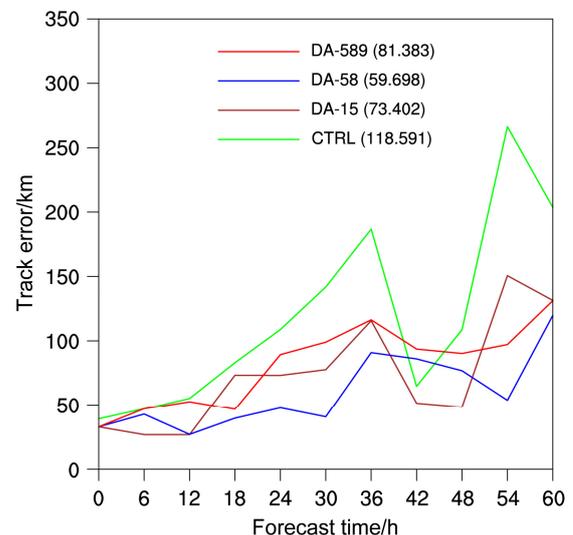


图4 试验 DA-15、DA-58、DA-589 和 CTRL 的台风路径模拟误差逐 6 h 变化,括号内的数字为 60 h 平均的路径误差(单位: km)

Fig. 4 Temporal variations of errors in typhoon track simulations at 6-hour interval for experiment DA-15, experiment DA-58 (assimilating AMSU-A data of NOAA15 and NOAA18), experiment DA-589 (assimilating AMSU-A data of NOAA15, NOAA18, and NOAA19), experiment CTRL. Numbers in brackets represent the 60-hour averages of track errors (units: km)

NOAA19 剔除,仅同化 NOAA15 和 NOAA18 两颗卫星的 AMSU-A 微波遥感资料。从图 4 可以看出,试验 DA-58 的路径误差是最小的,即组合同化 NOAA15 和 NOAA18 的 AMSU-A 资料进一步提高了同化效果,这表明优化组合不同卫星的微波遥感资料有可能进一步提高同化效果。从图 4 也可以看到,试验 DA-58 模拟的台风路径相对于试验 DA-589 更为偏北,更为接近观测;相对于试验 DA-15,试

验 DA-589 模拟的台风路径整体偏南些, 整体的方向较差些, 但是由于其模拟的台风西进更为合理, 而试验 DA-15 的西进则偏快, 因而路径误差反而更大。

本节的试验结果表明, 同化最多数量的卫星并不一定能取得最好的模拟结果, 不是同化的微波遥感资料量越多, 同化效果越好; 而优化组合同化卫星微波遥感资料则有可能进一步提高模拟的结果。

5 同化试验增量场分析

台风的发生和发展与温度、湿度、气压、风场都有着紧密的联系, 同化卫星微波遥感资料就是通过调整这些物理场的结构, 进而影响台风路径的模拟结果。4.1 节和 4.2 节的同化试验对台风路径模拟的不同影响就源于对物理场的不同调整, 为揭示同化不同卫星的同一种微波遥感资料对于物理场的调整, 本节对试验 DA-15、DA-18 和 DA-19 的海平面气压场、高度场、风场和温度场的多时刻增量场结构进行具体分析。

5.1 海平面气压场增量

图 6 为各同化试验在分析时刻、6 h 和 36 h 相对于试验 CTRL 的海平面气压增量场, 黑色圆点为对应时刻台风中心的观测位置, 蓝色圆点为对应时刻试验 CTRL 模拟的台风中心位置。图 6 中各同化试验在分析时刻的海平面气压增量均呈现大尺度结构, 这是由于 WRF-3DVar 中给定的背景误差协方差主要反映大尺度系统的不确定性 (闵锦忠等, 2013)。各同化试验在分析时刻的海平面气压增量场有着明显的不同, 试验 DA-15 (图 6a1) 在台风模拟位置处出现了东南—西北走向的正增量区, 正增量区以北为准纬向的负增量区, 此时台风观测位置就在模拟位置的西北方, 这样正负增量区形成的气压梯度力有利于模拟台风向西北的观测位置移动。试验 DA-18 (图 6b1) 在模拟位置附近也出现了东南—西北走向的正增量区, 然而相对于试验 DA-15 (图 6a1), 正增量区更为偏北, 同时正增量区以北并没有出现负增量区, 因此形成的南北向气压梯度力较小, 这与试验 DA-18 对模拟台风向北调整的幅度相对较小对应 (图 3)。试验 DA-18 (图 6b1) 的正增量区以西还存在一个负增量区, 由此形成的气压梯度力有利于加速台风西进, 这与试验 DA-18 前 6 h 西进距离更大对应 (图 3)。试验 DA-19 (图 6c1) 在模拟位置的西北方为大范围的正增量,

中心位于大陆上, 正增量以东为经向结构的负增量区, 负增量区的西南部为台风模拟位置, 正负增量形成的气压梯度力有利于抑制台风的西进, 这与其模拟的台风路径西移较慢相对应 (图 3)。对比图 6b1、图 6c1 的增量场, 尽管试验 DA-18 相对于试验 DA-19 更有利于台风模拟路径向北移动, 但试验 DA-18 却加大了台风的西进, 而试验 DA-19 则一定程度上抑制了台风的西进, 这与图 3 的路径模拟情况有着较好的对应, 也解释了试验 DA-19 前期路径误差为什么综合更小。

经过 6 h 的发展, 海平面气压增量场出现了中小尺度的结构。试验 DA-15 (图 6a2) 模拟位置的西南方出现了尺度较小的正增量区, 东北方出现了尺度较小的负增量区, 而此时试验 CTRL 模拟的台风位置位于观测的西南方, 因而小尺度增量场形成的气压梯度力有利于模拟台风向观测靠近。试验 DA-18 (图 6b2) 在模拟位置的东南方也出现了尺度较小的正增量区, 西北方出现了尺度较小的负增量区, 相对于试验 DA-15 这个负增量区的强度要偏小, 如此形成的气压梯度力易于使试验 DA-18 的台风西进更快, 而北抬相对较弱, 这与图 3 的模拟路径有着较好的对应。试验 DA-19 (图 6c2) 则在模拟位置的西侧出现了尺度较小的正增量区, 东侧出现了尺度较小的负增量区, 这样形成的气压梯度力有利于抑制台风西进, 其次在尺度较小的正负增量区的西侧和东侧分别出现了尺度较大的正增量和负增量区, 这进一步抑制了台风的西进, 有利于接近靠东的观测位置, 这与试验 DA-18 (图 6b2) 的加速西进相反, 这也就解释了前期为什么试验 DA-19 计算的路径误差相对较小。但是试验 DA-19 (图 6c2) 南北方向形成的气压梯度力较小, 这与试验 DA-19 向北移动的幅度较小有着较好的对应。36 h 后海平面气压增量场进一步发展。试验 DA-15 (图 6a3) 中模拟位置位于观测的西南方, 模拟位置周围为正增量区, 观测位置周围则出现了负增量区, 正负增量的强度和尺度均大于图 6a2, 这样更有利于同化后模拟位置向东北方的观测位置移动。试验 DA-18 (图 6b3) 模拟位置紧邻的西北方出现了小尺度的正增量区, 而在其紧邻的东北方为小尺度的负增量区, 观测则位于负增量区的中心处, 正负增量区相对于图 6b2 强度也有所增大, 这样形成的气压梯度力更有利于模拟位置向东移动, 靠近观测位置, 但是对台风南北向移动的影响较小。试验

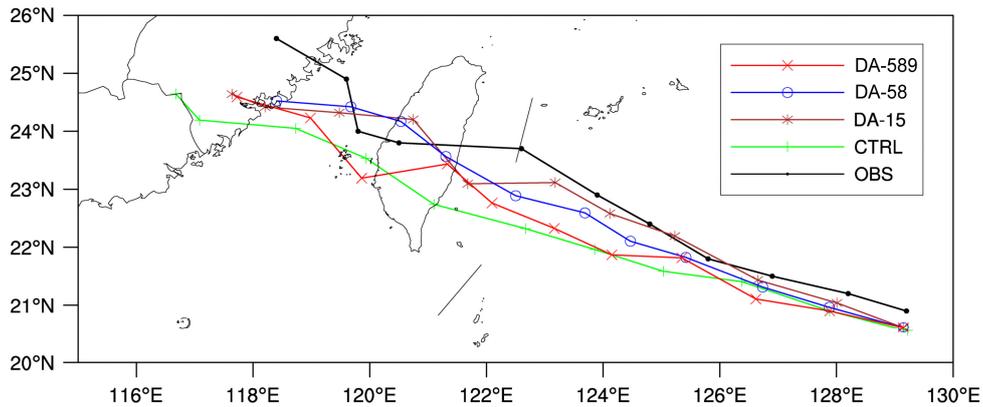


图5 试验 DA-15、DA-58、DA-589 和 CTRL 模拟的逐 6 h 台风路径以及实况 (OBS)

Fig. 5 Simulated typhoon tracks at 6-hour interval for experiments DA-15, DA-58, DA-589, CTRL, and real track (OBS)

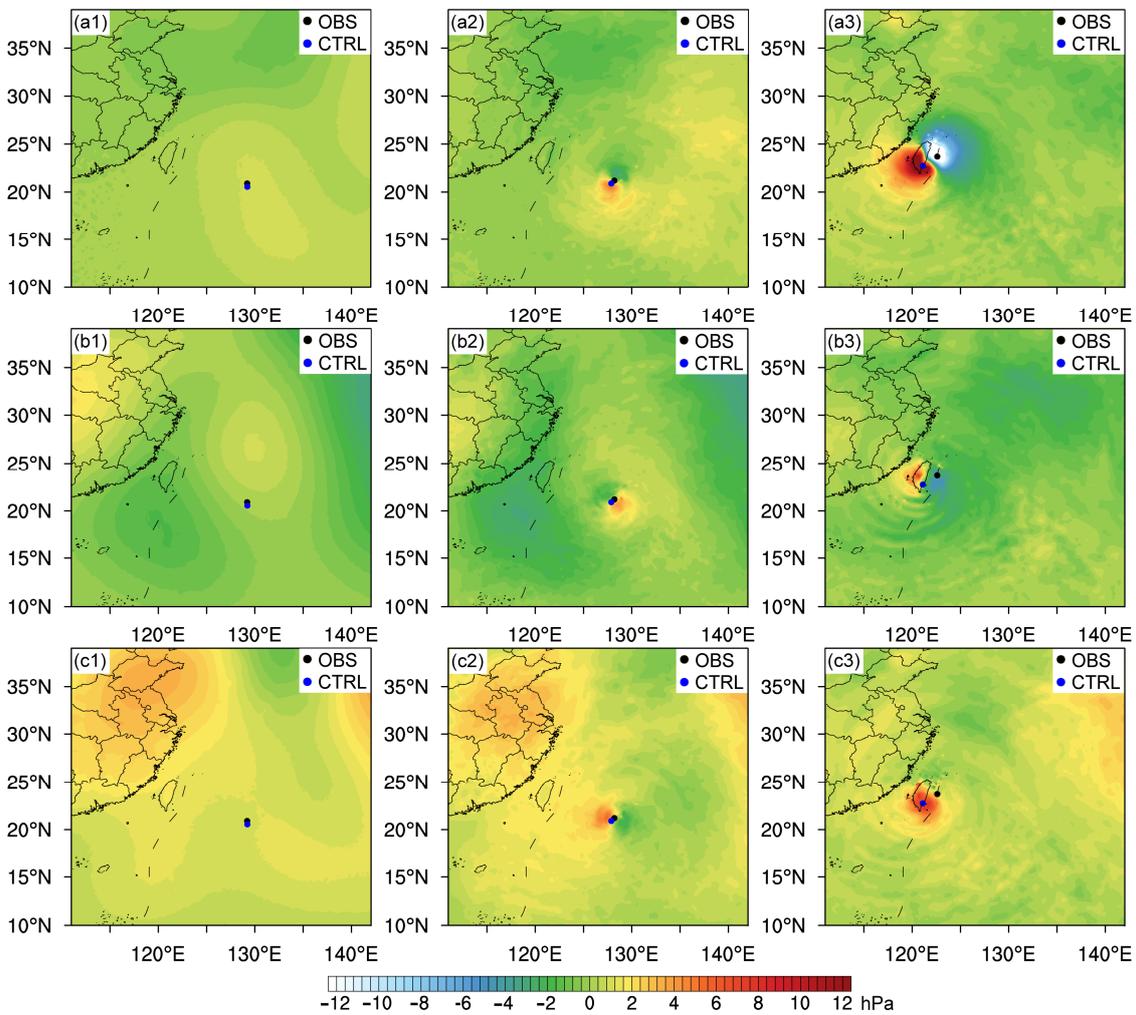


图6 (a1、a2、a3) 试验 DA-15、(b1、b2、b3) 试验 DA-18 和 (c1、c2、c3) 试验 DA-19 在 (a1、b1、c1) 初始时刻、(a2、b2、c2) 6 h 和 (a3、b3、c3) 36 h 相对于试验 CTRL 的海平面气压增量场 (单位: hPa)。图中黑色圆点为台风观测 (OBS) 位置, 蓝色圆点为试验 CTRL 模拟的位置, 下同

Fig. 6 Increment fields of sea level pressure (units: hPa) in (a1, a2, a3) experiment DA-15, (b1, b2, b3) experiment DA-18, (c1, c2, c3) experiment DA-19 in comparison to that in experiment CTRL at (a1, b1, c1) the initial time, (a2, b2, c2) the 6th hour, (a3, b3, c3) the 36th hour. Black dots represent the observed locations of typhoon (OBS), blue dots represent simulated locations of typhoon in the CTRL experiment, the same below

DA-19 (图 6c3) 模拟位置周围为正增量区, 观测位置位于正增量区的东北方, 这样的形势对模拟台风向观测位置靠近的影响较小, 这与图 3 的模拟结果相对应。

本节对各同化试验在 0 h、6 h 和 36 h 的海平面气压增量场进行了分析, 各同化试验在不同时刻的增量场结构与其对台风路径模拟的调整情况有着较好的对应; 增量场的中小尺度结构随时间逐渐出现和发展, 这有利于对台风模拟路径的调整。试验 DA-15 的增量场形成的气压梯度力最有利于改善台风的模拟路径, 试验 DA-19 主要是抑制了模拟台风的西进, 而试验 DA-18 虽然有利于台风位置北抬, 但是也夸大了台风的西进。

5.2 500 hPa 高度场和风场增量

图 7 为各同化试验在 0 h、6 h 和 36 h 相对于试验 CTRL 的 500 hPa 高度场和风场增量。分析时刻的高度场和风场增量呈现的也是大尺度的结构, 试验 DA-15 (图 7a1) 在模拟位置以北为位势高度负增量区, 负增量区以东为经向的位势高度正增量区, 正增量区向负增量区形成的偏北风在模拟位置以北有略微的辐合形式, 有利于台风向北部的观测位置发展。试验 DA-18 (图 7b1) 在模拟位置的东北方为尺度较大且较强的位势高度正增量区, 正增量区的西侧为位势高度负增量区, 模拟位置的西南方为相对较弱的位势高度正增量区, 而模拟位置处于位势高度负增量区中, 这个负增量区夹在东北方

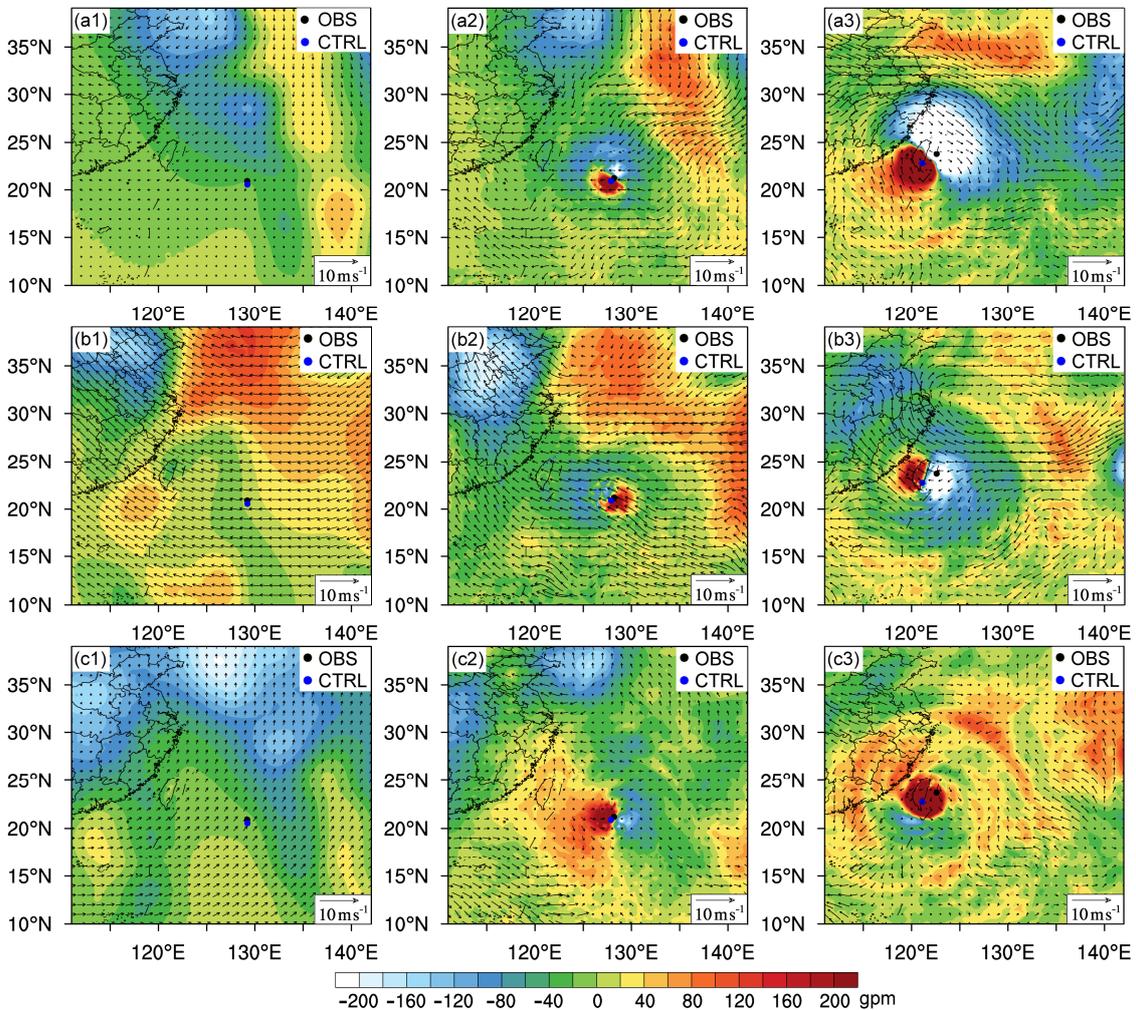


图 7 (a1、a2、a3) 试验 DA-15、(b1、b2、b3) 试验 DA-18 和 (c1、c2、c3) 试验 DA-19 在 (a1、b1、c1) 0 h、(a2、b2、c2) 6 h 和 (a3、b3、c3) 36 h 相对于试验 CTRL 的 500 hPa 高度场增量 (彩色阴影, 单位: gpm)、风场增量 (箭头, 单位: $m s^{-1}$)
Fig. 7 Increment fields of 500-hPa geopotential height (shaded, units: gpm) and 500-hPa wind (arrows, units: $m s^{-1}$) in (a1, a2, a3) experiment DA-15, (b1, b2, b3) experiment DA-18, (c1, c2, c3) experiment DA-19 in comparison to that for experiment CTRL at (a1, b1, c1) the initial time, (a2, b2, c2) the 6th hour, (a3, b3, c3) the 36th hour

和西南方的位势高度正增量区之间,这样有利于台风向西北方向移动。对于风场而言,东北方位势高度正增量区形成的反气旋环流在模拟位置处表现为较强的偏东风,这加剧了台风的西移,但是较强东风伴随的科氏力则有助于模拟台风的北抬。试验 DA-19 (图 7c1) 在模拟位置的西南部形成了位势高度正增量区,北部为较强的位势高度负增量区,模拟位置附近为西南风增量,其中南风分量相对更大,位势高度正增量区和负增量区的分布以及西南气流可以抑制台风的西进,而且也有助于台风一定程度的北抬,靠近观测,这与其模拟路径有着较好的对应。

6 h 后位势高度的增量场出现了中小尺度结构,试验 DA-15 (图 7a2) 在模拟位置的南部出现了尺度较小但较强的位势高度正增量区,紧邻的东北方为尺度较小的位势高度负增量区,这种结构有利于同化后的模拟台风向东北部的观测移动;其次位势高度负增量区的东北方为尺度较大的经向位势高度正增量区,伴随的东北风在负增量区与东风形成辐合,有利于台风向北部的观测发展。试验 DA-18 (图 7b2) 在模拟位置的东南方为较小尺度的位势高度正增量区,西北方为尺度较小的位势高度负增量,正负增量区间的东南风有利于台风向西北方向移动;其次模拟位置较远的东北方出现了较大尺度的位势高度正增量区,这个正增量区与其西侧出现的位势高度负增量区形成了较强的反气旋环流,反气旋在模拟位置紧邻北侧产生的偏东风与南部的东南风产生的辐合也有利于台风的北抬,接近观测,但也加剧了台风的西进,远离观测。试验 DA-19 (图 7c2) 在模拟位置的西侧形成尺度较小但强度较大的位势高度正增量区,紧邻的东侧为较小尺度的位势高度负增量区,这种结构有利于抑制台风的西进,靠近东北方向的观测,同时模拟位置附近形成的西风气流在东侧减弱,呈辐合形势,这也有利于抑制台风的西进,但对于台风的北抬影响较小。

36 h 后增量场的中小尺度结构进一步发展。相对于图 7a2,试验 DA-15 (图 7a3) 模拟位置附近的位势高度正增量区和其东北方负增量区的尺度和强度进一步发展,此时模拟位置位于正增量区中,其东北方的观测位置位于负增量区中,这样的增量结构有利于模拟台风向观测位置发展,同时正负增量间形成的反气旋性气流有利于减弱台风向西南

方的发展;其次位势高度负增量区的北部存在准纬向的位势高度正增量区,这个正增量区与模拟位置处的正增量区将观测位置处的负增量区夹在其中,也有利于模拟台风向东北方发展。试验 DA-18 (图 7b3) 在模拟位置的西侧为较小尺度的位势高度正增量区,紧邻的东侧为较小尺度的位势高度负增量区,观测位于负增量区中,正负增量区相对图 7b2 的尺度和强度有所增大,这样有利于抑制模拟台风西进,从而靠近观测位置,这也与 36 h 后试验 DA-18 的路径模拟改善相对应,同时增量风场在观测位置处产生的辐合也有利于同化后模拟向观测靠近。试验 DA-19 (图 7c3) 的模拟位置处于尺度较小的位势高度正增量区中心,但正增量区相对于图 7c2 进一步发展,此时观测位置位于正增量区的东北侧,正增量区的西南方出现了尺度较小的负增量区,同时风场增量在位势高度负增量区也呈现了一定的辐合,这种结果容易加剧台风向西南方移动,不利于改善台风路径模拟,这与试验 DA-19 的 36 h 后改善效果较差相对应。

本节对各同化试验 3 个时次的 500 hPa 的位势高度和风场增量场进行了分析,类似 4.1 节,各同化试验对于位势高度场和风场的调整基本与模拟的台风路径调整情况有着较好的对应。试验 DA-15 的增量场最有利于台风路径模拟的改善;试验 DA-18 前期的增量场虽然有利于台风向北部的观测靠近,但也加剧了台风的西进,因此同化综合改善效果较弱,而在 36 h 后增量场演变成抑制台风西进的结构,因而对于模拟效果的改善明显提升;试验 DA-19 前期主要是通过抑制台风西进的速度改善了路径模拟,而后期增量场结构则不利于改善台风路径的模拟,这与其模拟路径改善情况相对应。

5.3 700 hPa 温度场增量

图 8 为各同化试验在 0 h、6 h 和 36 h 相对于试验 CTRL 的 700 hPa 温度场增量。类似 4.1 和 4.2 节,分析时刻的温度增量场呈现大尺度的结构,模拟位置附近的温度均呈不同程度的下降,有利于减弱台风在模拟位置处的发展。

6 h 后温度增量场的中小尺度结构出现,试验 DA-15 (图 8a2) 在模拟位置以北的区域出现了半圆弧的正增量结构,其中东北方的正增量更强,正增量的外围为负增量区,这有利于台风向东北方的观测位置发展,这与试验 DA-15 的模拟路径调整有着较好的对应。试验 DA-18 (图 8b2) 则在模拟位

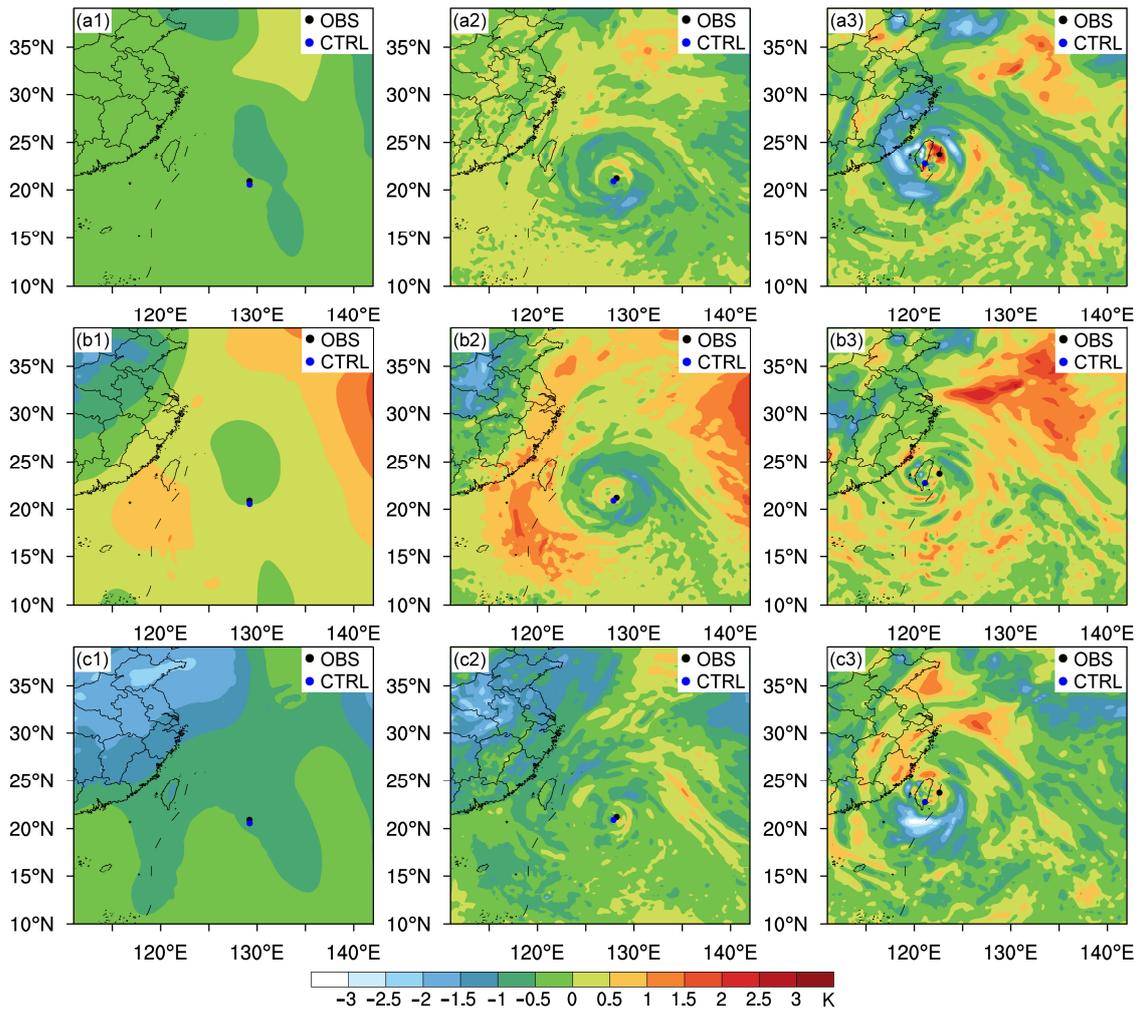


图 8 (a1、a2、a3) 试验 DA-15、(b1、b2、b3) DA-18 和 (c1、c2、c3) DA-19 在 (a1、b1、c1) 0 h、(a2、b2、c2) 6 h 和 (a3、b3、c3) 36 h 相对于试验 CTRL 的 700 hPa 温度场增量 (单位: K)

Fig. 8 Increment fields of 700-hPa temperature (units: K) in (a1, a2, a3) experiment DA-15, (b1, b2, b3) experiment DA-18, (c1, c2, c3) experiment DA-19 in comparison to that for experiment CTRL at (a1, b1, c1) the initial time, (a2, b2, c2) the 6th hour, (a3, b3, c3) the 36th hour

置的西北方出现半圆弧的正增量结构，正增量外围同样为负增量结构，这有利于台风向西北方发展，与前面的分析一致。试验 DA-19 (图 8c2) 模拟位置的东侧出现了尺度较小的半圆弧结构的正增量结构，西侧为尺度较小的负增量结构，这有利于台风向东发展，抑制台风的西进，这与 4.1 和 4.2 节的分析是一致的。

36 h 后温度增量场的中小尺度结构进一步发展。图 8a3 (试验 DA-15) 中模拟位置位于其西侧的负增量区边缘，其东侧为正增量区，最大增量在东北方，而观测就位于此处，相对于图 8a2，图 8a3 的正负增量区强度和尺度均有所增大，这更有利于台风向东北方的观测位置发展，改善台风路径的模

拟。试验 DA-18 (图 8b3) 和试验 DA-19 (图 8c2) 观测位置处的温度也有所增加，但是相对于试验 DA-15 强度要小很多，因而不易于对台风路径的发展产生较大影响。

本节对各同化试验的 700 hPa 的温度场增量进行了分析，各同化试验的对温度场的调整与模拟路径的调整有着较好的对应，但相比于海平面气压场、500 hPa 高度场和风场，温度场增量在台风模拟位置附近的尺度偏小，不易于对台风路径的模拟产生较大影响。相对于试验 DA-18 和试验 DA-19，试验 DA-15 的温度场增量更利于对台风路径模拟的改善。

从本节的分析可以看出，同化不同卫星的

AMSU-A 微波遥感资料对海平面气压场、500 hPa 高度场、风场和 700 hPa 温度场具有不同的调整,这是由于不同卫星的运行轨道不同,同一时刻不同卫星扫描探测的范围不同,这导致不同卫星在模拟区域的资料覆盖范围和数量不同,而同化的卫星资料的具体位置和数量多少会对同化效果产生直接的影响,因而同化不同卫星的 AMSU-A 微波遥感资料的增量场具有明显的不同,而增量场的不同与对台风路径预报的调整直接相联系,从而同化不同卫星的 AMSU-A 微波遥感资料对台风路径的模拟效果产生不同的影响。

6 总结

本文基于 2015 年第 13 号超强台风“苏迪罗”,利用 WRF 模式及其 3DVar 同化系统对不同 NOAA 卫星的 AMSU-A 微波遥感资料开展同化试验,考察同化不同卫星的同一种微波遥感资料对于台风模拟效果的影响。试验中具体对 NOAA15、NOAA18 和 NOAA19 三颗卫星分别同化以及组合同化,分析了同化不同卫星的微波遥感资料对台风路径模拟的影响及其对三个时刻物理场的调整,主要结论如下:

(1) 同化不同卫星的 AMSU-A 微波遥感资料对于台风模拟的路径具有不同的改善。本文中三颗卫星在模拟区域的覆盖度 NOAA19 最大,其次是 NOAA18,最后是 NOAA15,但是 NOAA15 的同化效果最好,其次是 NOAA18,最后是 NOAA19,这也说明了并不是微波遥感资料覆盖度越大,同化效果越好,这可能与各卫星的扫描区域不同有关,后续将开展相关研究。

(2) 同化卫星数量最多并不一定能够取得最好的效果,优化组合卫星的同化有可能进一步提高同化效果。本文中同时同化 NOAA15、NOAA18 和 NOAA19 三颗卫星的 AMSU-A 资料并没有取得最好的同化效果,而选择三颗卫星中效果较好的 NOAA15、NOAA18 则取得了最好的效果。

(3) 同化不同卫星的 AMSU-A 微波遥感资料对于模式的物理场具有不同的调整作用,物理场的增量的中小尺度结构随着时间逐步发展,这些与其对台风的模拟路径影响具有较好的对应关系。本文中同化 NOAA15 的 AMSU-A 资料,无论是海平面气压场增量,500 hPa 的位势高度场增量、风场增量,还是 700 hPa 温度场增量,均最有利于改善台

风路径模拟,对应的台风路径模拟效果也是最好的; NOAA18 分析时刻的路径误差虽然小于 NOAA19,然而其初期的增量场加剧了台风的西进速度,对应的模拟路径在东西方向上远离了观测位置,而 NOAA19 对应的增量场则有效抑制了台风的西进,因而前期误差更小,然而相对于同化 NOAA19,同化 NOAA18 后前期整体的模拟路径更为偏北,更接近观测,因而 36 h 后 NOAA18 的改善效果逐步增强,而 NOAA19 则开始下降。从 NOAA18 和 NOAA19 在前期的路径模拟效果评估可以看出下一步研究引入方向误差的重要性,这样可以更为合理的衡量台风模拟结果。相对于温度场,各同化试验对于海平面气压场,500 hPa 的位势高度场、风场的调整与模拟结果的对应关系更密切。

本文仅选择了 AMSU-A 资料进行对比同化,下一步将同化其他微波遥感资料对各卫星的同化效果进行评估;其次本文采用的同化方法为 3DVar,而 3DVar 中的静态背景误差协方差主要体现的是大尺度结构,对台风这类发展迅速的中尺度天气,缺乏“流依赖”信息,这对于观测信息的合理传播具有一定的局限性(Huang et al., 2009),而将 3DVar 和 EnKF(Evensen, 2003)结合的混合同化方法(Wang et al., 2008)通过引入集合预报的信息,不仅可以保留 3DVar 的优势,同时引入了“流依赖”信息,能够更为有效地同化卫星资料,改善台风路径的预报,因而下一步将考虑利用混合同化方法对微波遥感资料同化,从而更好地改善台风路径预报。

参考文献(References)

- 安成,王云峰,袁金南,等. 2014. 一种分析台风路径预报误差的新方法[J]. 海洋学报, 36(5): 46-53. An Cheng, Wang Yunfeng, Yuan Jinnan, et al. 2014. A new method for analyzing track forecast error of typhoon[J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 36(5): 46-53, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2014.05.005.
- Barker D M, Huang W, Guo Y R, et al. 2003. A three-dimensional variational (3DVAR) data assimilation system for use with MM5 [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-453+STR, 68pp, doi:10.5065/D6CF9N1J.
- Bessho K, Demaria M, Knaff J A. 2006. Tropical cyclone wind retrievals from the advanced microwave sounding unit: Application to surface wind analysis [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 45(3): 399-415, doi:10.1175/JAM2352.1.
- Brueske K F, Velden C S. 2003. Satellite-based tropical cyclone intensity

- estimation using the NOAA-KLM series advanced microwave sounding unit (AMSU) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131 (4): 687–697, doi:10.1175/1520-0493(2003)131<0687:SBTCIE>2.0.CO;2.
- English S J, Renshaw R J, Dibben P C, et al. 2000. A comparison of the impact of TOVS arid ATOVS satellite sounding data on the accuracy of numerical weather forecasts [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126 (569): 2911–2931, doi:10.1002/qj.49712656915.
- Evensen G. 2003. The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation [J]. *Ocean Dyn.*, 53 (4): 343–367, doi:10.1007/s10236-003-0036-9.
- Eyre J R. 1992. A bias correction scheme for simulated TOVS brightness temperatures [R]. Technical Memorandum. ECMWF, 186, 28pp.
- Eyre J R, Kelly G A, McNally A P, et al. 1993. Assimilation of TOVS radiance information through one-dimensional variational analysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 119 (514): 1427–1463, doi:10.1002/qj.49711951411.
- Harris B A, Kelly G. 2001. A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127 (574): 1453–1468, doi:10.1002/qj.49712757418.
- Huang X Y, Xiao Q N, Barker D M, et al. 2009. Four-dimensional variational data assimilation for WRF: Formulation and preliminary results [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (1): 299–314, doi:10.1175/2008MWR2577.1.
- Kidder S Q, Goldberg M D, Zehr R M, et al. 2000. Satellite analysis of tropical cyclones using the advanced microwave sounding unit (AMSU) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81 (6): 1241–1259, doi:10.1175/1520-0477(2000)081<1241:SAOTCU>2.3.CO;2.
- Knaff J A, Seseke S A, DeMaria M, et al. 2004. On the influences of vertical wind shear on symmetric tropical cyclone structure derived from AMSU [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (10): 2503–2510, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<2503:OTIOVW>2.0.CO;2.
- Le Marshall J F, Leslie L M, Abbey R F Jr, et al. 2002. Tropical cyclone track and intensity prediction: The generation and assimilation of high-density, satellite-derived data [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 80 (1–4): 43–57, doi:10.1007/s007030200013.
- Lee M S, Lee D K. 2003. An application of a weakly constrained 4DVAR to satellite data assimilation and heavy rainfall simulation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131 (9): 2151–2176, doi:10.1175/1520-0493(2003)131<2151:AAOAWC>2.0.CO;2.
- 李兴武, 董海萍, 郭卫东, 等. 2012. ATOVS 不同卫星资料在台风模拟中的同化试验研究 [J]. *热带气象学报*, 28 (2): 157–166. Li Xingwu, Dong Haiping, Guo Weidong, et al. 2012. Data assimilation experiments in typhoon numerical prediction using different ATOVS radiance [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 28 (2): 157–166, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2012.02.002.
- 刘贝, 卢绍宗, 钱钰坤, 等. 2014. ATOVS 亮温资料同化在台风数值模拟中的应用 [J]. *热带海洋学报*, 33 (1): 44–53. Liu Bei, Lu Shaozong, Qian Yukun, et al. 2014. An application of ATOVS radiance in data assimilation of typhoon [J]. *Journal of Tropical Oceanography (in Chinese)*, 33 (1): 44–53, doi:10.11978/j.issn.1009-5470.2014.01.006.
- 刘松涛, 严卫, 王举. 2006. 利用 AMSR-E 对台风“泰利”的初步分析 [J]. *热带海洋学报*, 25 (5): 26–30. Liu Songtao, Yan Wei, Wang Ju. 2006. A primary analysis of typhoon Talim by AMSR-E [J]. *Journal of Tropical Oceanography (in Chinese)*, 25 (5): 26–30, doi:10.3969/j.issn.1009-5470.2006.05.005.
- McNally A P, Vesperini M. 1996. Variational analysis of humidity information from TOVS radiances [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122 (535): 1521–1544, doi:10.1002/qj.49712253504.
- Okamoto K, Tada H. 2000. Recent developments in assimilation of TOVS and ATOVS at JMA [C]// Technical Proceedings of the 11th International ATOVS Study Conference. Budapest, Hungary, 20–26.
- Okamoto K, Kazumori M, Owada H. 2005. The assimilation of ATOVS radiances in the JMA global analysis system [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83 (2): 201–217, doi:10.2151/jmsj.83.201.
- Wang X G, Barker D M, Snyder C, et al. 2008. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: Observing system simulation experiment [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (12): 5116–5131, doi:10.1175/2008MWR2444.1.
- 希爽, 马刚, 张鹏. 2014. 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*, 30 (4): 700–706. Xi Shuang, Ma Gang, Zhang Peng. 2014. Preliminary evaluation of the impacts of ATOVS microwave observation in typhoon numerical forecast in 2008 [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 30 (4): 700–706, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.04.010.
- 杨春, 闵锦忠, 刘志权. 2017. AMSR2 辐射率资料同化对台风“山神”分析和预报的影响研究 [J]. *大气科学*, 41 (2): 372–384. Yang Chun, Min Jinzhong, Liu Zhiquan. 2017. The impact of AMSR2 radiance data assimilation on the analysis and forecast of typhoon Son-Tinh [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41 (2): 372–384, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1608.16127.
- Yu Hui, Chan J C L, Duan Yihong. 2006. Intensity estimation of tropical cyclones over the western North Pacific with AMSU-A temperature data [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84 (3): 519–527, doi:10.2151/jmsj.84.519.
- 袁炳, 费建芳, 王云峰, 等. 2010. 应用 ATOVS 资料和非对称 Bogus 资料对登陆台风韦帕的 4DVAR 数值模拟分析 [J]. *气象*, 36 (5): 13–20. Yuan Bing, Fei Jianfang, Wang Yunfeng, et al. 2010. 4DVAR numerical simulation analysis using ATOVS data and asymmetrical bogus data on landing typhoon Weipha [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36 (5): 13–20.
- 张斌, 张立凤, 熊春晖. 2014. ATOVS 资料同化方案对暴雨模拟效果的影响 [J]. *大气科学*, 38 (5): 1017–1027. Zhang Bin, Zhang Lifeng, Xiong Chunhui. 2014. Effects of ATOVS data assimilation schemes on the simulation of heavy rain [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (5): 1017–1027, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13215.
- Zhang B, Tian X J, Zhang L F, et al. 2017. Handling non-linearity in radar data assimilation using the non-linear least squares enhanced POD-4DVAR [J]. *Science China Earth Sciences*, 60 (3): 478–490, doi:10.1007/s11430-015-0271-4.
- Zhang H, Chou J F, Qiu C J. 2004b. Assimilation analysis of Rammasun typhoon structure over Northwest Pacific using satellite data [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49 (4): 389–395, doi:10.1007/BF02900323.
- Zhang H, Xue J S, Zhu G F, et al. 2004a. Application of direct assimilation of ATOVS microwave radiances to typhoon track prediction [J].

- Advances in Atmospheric Sciences, 21 (2): 283–290, doi:10.1007/BF02915715.
- 张晓慧, 张立凤, 熊春晖, 等. 2015. 基于集合变分混合同化方法的双台风数值模拟 [J]. 热带气象学报, 31 (4): 505–516. Zhang Xiaohui, Zhang Lifeng, Xiong Chunhui, et al. 2015. Analysis and numerical study of a hybrid ensemble-3DVvar data assimilation scheme for binary typhoons [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 31 (4): 505–516, doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2015.04.008.
- 闵锦忠, 毕坤, 陈耀登, 等. 2013. 基于物理约束扰动的EnSRF雷达资料同化 [J]. 大气科学学报, 36 (2): 129–138. Min Jinzhong, Bi Kun, Chen Yaodeng, et al. 2013. Assimilation of Doppler radar data with EnSRF based on physical constraint perturbation [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 129–138, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.02.001.