

陈锋,董美莹,冀春晓,2017. 不同资料同化对登陆台风菲特(2013)短时预报的影响研究[J]. 气象,43(9):1029-1040.

不同资料同化对登陆台风菲特(2013) 短时预报的影响研究^{*}

陈 锋 董美莹 冀春晓

浙江省气象科学研究所,杭州 310017

提 要: 为定量评估地面、探空、飞机报、卫星辐射亮温、雷达反射率及径向风等不同观测资料同化对台风预报性能的影响,本文以 2013 年严重影响我国的登陆台风菲特为例,利用 WRF 模式与 GSI-3DVAR 同化系统开展观测系统试验(OSE)研究,探讨了不同类型资料同化对“菲特”(2013)路径、强度、形势场和降水短时预报的相对贡献及可能影响机理。结果表明:(1)不同类型资料同化对模拟结果贡献程度有明显差别,其中探空、雷达反射率和飞机报对模拟结果有较大影响,分别“拒绝”这三种资料后模式模拟的高空各要素均方根误差分别上升约 54.8%~62.0%、9.2%~16.5%和 6.1%~6.4%。(2)对于不同的台风预报效果评估参数,各类资料的贡献率大小排序不同。对高空场和台风路径模拟影响较大的是探空和飞机报,对台风强度模拟影响较大的依次是雷达径向风、反射率、探空和飞机报,而对降水模拟影响较大的依次是雷达反射率、探空和飞机报。(3)各类资料对降水模拟的贡献率随时间变化不同。雷达反射率资料对降水的贡献随着模式积分时间明显下降,而飞机报、探空资料等对降水的贡献在模式积分 3 h 之后开始出现。(4)资料同化对降水模拟的改进与其对台风路径、水物质及强度模拟改进有关,因此影响高空场、台风路径和强度较大的雷达反射率、探空和飞机报资料,也是对降水模拟贡献较大的资料。

关键词: 资料同化,相对贡献,台风,数值模拟

中图分类号: P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.001

Relative Impact from Surface, Radiosonde, Aircraft, Satellite, and Radar Observations on Short-Time Forecasting for Typhoon Fitow (2013) at Landfall

CHEN Feng DONG Meiyong JI Chunxiao

Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310017

Abstract: An assessment is presented on the relative forecast impact on the short-time forecasting for typhoon from six different observation data types: surface, radiosonde, aircraft, satellite, radar reflectivity, and radar radial velocity. In this paper, the landfall Typhoon Fitow, which seriously affected China in 2013, is chosen to investigate the relative impact from different data types on the typhoon track, intensity, and precipitation short-time forecasting by using Observation System Experiment (OSE) method with the Weather Research and Forecasting model (WRF) and Community Gridpoint Statistical Interpolation (GSI-3DVAR) system. The results show that: (1) the contribution of different data types to the simulation results is obviously different. On the whole, the radiosonde, radar reflectivity and aircraft report have a great influence on the simulation of temperature, humidity, and wind of the full troposphere. The root mean square error (RMSE) increases by about 54.8%—62.0%, 9.2%—16.5% and 6.1%—6.4% for the

^{*} 浙江省科技计划项目(2014C33056)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506002)、国家自然科学基金项目(41375056)和浙江省气象科技计划重点项目(2013ZD01)共同资助

2017 年 4 月 11 日收稿; 2017 年 6 月 26 日收修定稿

第一作者:陈锋,主要从事数值模式及资料同化研究. Email: fchen_zj@163.com

“denied” experiments (NRS, NRF, NAC, respectively) compared to the control experiments. (2) Different sequence of contribution rates can be found in different assessment parameters. The radiosonde and aircraft report have the greatest influence on the simulation of temperature, humidity, and wind of the full troposphere. The sequence of contributions on typhoon intensity simulation is radar radial velocity, radar reflectivity, radiosonde, and aircraft report. Radar reflectivity, radiosonde, and aircraft report have great influence on the precipitation simulation. (3) The time-variations of the contributions to precipitation simulation are different among different data types. The contribution of radar reflectivity data to precipitation decreases with the time of model integration, while the contribution of aircraft report and radiosonde data to precipitation appear after 3 h of model integration. (4) The improvement of precipitation simulation is related to the improvement of typhoon track, intensity and hydrometeors simulation. Therefore, the radar reflectivity, radiosonde and aircraft report, which have high influences on the simulation of the full troposphere, typhoon track, and intensity, also have a great contribution to the precipitation simulation.

Key words: data assimilation, relative impact, typhoon, numerical simulation

引 言

众所周知,数值预报准确性的提高主要依赖于模式性能的改进和初始条件质量的提升(Aggarwal and Kumar, 2013)。利用资料同化技术改进初始场质量,成为数值天气预报科研和业务上的关键问题(Navon, 2009; Wang et al, 2013; Evensen, 2009)。随着观测手段的进步和观测网络的逐步完善,越来越多的观测资料被用于各类复杂的数值天气预报系统中。评估这些资料在数值预报系统中的贡献,有助于多源观测资料的高效利用,对观测网络系统建设具有指导意义。

目前,资料同化技术在数值天气预报中的应用已经较为成熟,国内外已有很多关于各类观测资料对台风预报的影响研究,包括地面自动站和探空等常规资料(Gu et al, 2005)、洋面风资料(Zeng et al, 2005; Wang et al, 2009)、卫星亮温资料(Schwartz et al, 2012; Zhang et al, 2013)、微波辐射率资料(杨春等, 2017)、雷达径向风资料(陈锋等, 2012; Lin et al, 2011; Zhao et al, 2012)、雷达反射率资料(Xiao et al, 2007; Zhao and Jin, 2008)等。另一方面,多项研究(Graham et al, 2000; Bouttier and Kelly 2001; Zapotocny et al, 2002; 2007; Lord et al, 2004; Cardinali, 2009)表明观测系统试验(observation system experiments, OSEs)可有效用于探讨资料在数值预报系统中的贡献率问题。如: Benjamin et al(2010)利用 OSE 方法分析比较了地面报、飞机报、风廓线、探空、VAD 和 GPS 水汽等多种数据在 Rapid Update Cycle (RUC)系统中的相

对贡献率,发现飞机报对模式起报后 3~6 h 的预报贡献率最大,其次为探空,风廓线、GPS 水汽和地面资料也对短时预报有正贡献;Jung et al(2010)发现下投式探空仪(dropsonde)及海区的常规观测资料对台风预报有较大的正贡献。这些研究多集中于某种资料对数值预报的贡献或是主要针对非台风天气系统,对于多种资料在台风短时预报中的影响研究还较为少见。而且,由于天气系统的多样性以及预报模式的独特性,不同资料对台风短时预报的相对贡献率问题,仍需要开展大量深入研究。

台风菲特(2013)是近年来影响中国最为严重的台风之一,其路径突变和特大强降水是当时主要的预报难点(许映龙等, 2015; 谢惠敏等, 2016)。因此,本文以台风菲特(2013)为例,拟采用 OSE 方法开展数值对比试验(该方法采用相同模式、同化系统及区域参数配置,仅有观测资料类型及数量不同,可简便、清晰地进行观测资料贡献率的系统性对比),探讨不同资料对登陆台风短时预报的相对贡献率,分析各类资料对高空场、台风路径和强度以及台风降水的影响,以期进一步加深对于不同资料同化影响登陆台风预报的定量效应和物理过程的认识。

1 台风菲特(2013)

2013 年第 23 号热带风暴菲特于 9 月 30 日 12 时(UTC,下同)在菲律宾以东洋面生成,前期以西北方向移动,10 月 5 日开始以西北偏西方向移动,6 日 17:15 在福建福鼎沙埕镇登陆,登陆时强度为强台风(近中心最大风力 $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中心气压

955 hPa),登陆后向西南方向移动,强度迅速减弱,于7日01时在福建省建瓯市境内减弱为热带低压,03时停止编报(登陆前后台风路径如图1a所示)(王海平和高拴柱,2014)。

受“菲特”影响,10月5日12时至9日00时,浙江省的北部和东南部沿海出现了特大暴雨和大暴雨,全省面雨量(全省区域内单位面积上的平均降水量)207 mm,为1949年以来浙江省台风过程降水量第三位,浙北14个县(市、区)刷新当地台风过程雨量极值。过程降水大致可分为三个阶段:台风登陆前外围降水、台风登陆时本体(包括倒槽)降水和台风登陆后多系统(倒槽、冷空气和偏东急流)相互作用降水。其中第二阶段(6日12时至7日00时)降

水雨强最强,是“菲特”影响过程中的强降水最集中的时段(也是本文的研究时段)。结合逐3 h雷达组合反射率看到,随着台风中心逐步靠近大陆,强回波区首先集中出现在浙江东南沿海地区(图1a),然后逐渐扩展到浙江省中部(图1b),在台风登陆后30 dBz以上回波几乎覆盖整个浙江省(图1c),并逐渐分裂成南北两个相对独立回波带(图1d)。

2 试验方案设计

2.1 模式配置

本研究选用美国国家大气研究中心(National

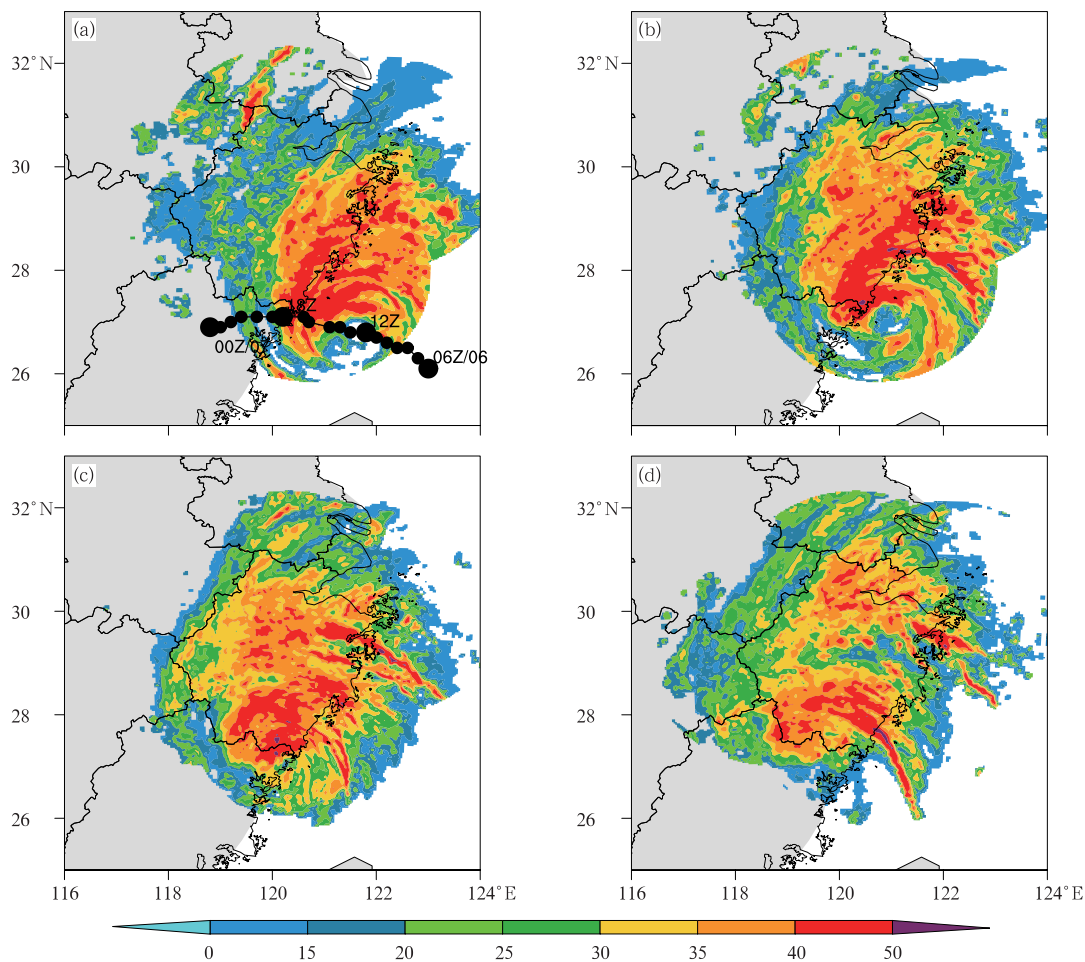


图1 2013年10月6日(a)1200 UTC, (b)1500 UTC, (c)1800 UTC和
(d)2100 UTC台风菲特登陆期间逐3 h多普勒雷达组合反射率拼图
(填色,单位: dBz)以及逐小时台风路径(黑点线)示意图

Fig. 1 The radar composite reflectivity mosaics (colored, unit: dBz) captured by Zhejiang Doppler radar network at (a) 1200 UTC, (b) 1500 UTC, (c) 1800 UTC, and (d) 2100 UTC 6 October 2013, and the hourly track (black dot line) of Typhoon Fitow at landfall

Center for Atmospheric Research, NCAR) 等机构开发的 WRF-ARW V3.7.1 (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users>; Skamarock et al, 2008) 和美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 开发的 GSI-3DVAR V3.4 (Hu et al, 2015) 作为预报模式和资料同化系统, 研究区域以 (29°N, 120°E) 为中心, 格点数为 725 × 625, 水平分辨率为 3 km, 垂直层数为 51 层, 模式顶高为 10 hPa (图 2a)。使用的主要物理参数化方

案有 Thompson 云微物理方案 (Thompson et al, 2008), RRTMG 短波和长波辐射方案 (Iacono et al, 2008), 修正的 Monin-Obukhov 表层方案 (Jiménez et al, 2012), YSU 边界层方案 (Hong et al, 2006), 以及 Noah 陆面方案 (Chen and Dudhia, 2001)。初始背景场资料 (包括初始条件和边界条件) 由 NCEP/NCAR 提供的 Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 每 6 h 一次的 0.5° × 0.5° 再分析资料 (Saha et al, 2010) 通过 WPS 初始化模块

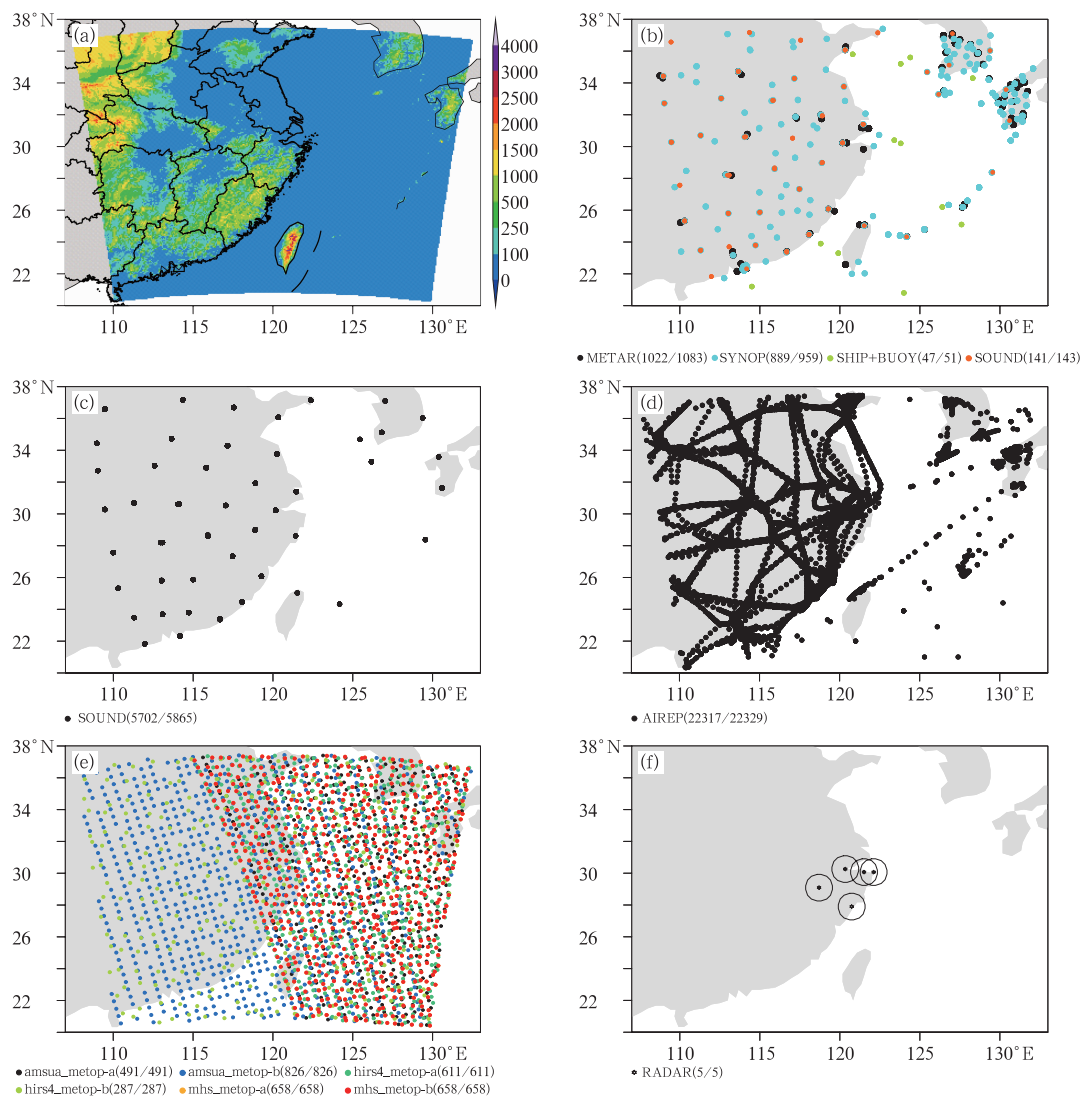


图 2 研究区域(a)及用于资料同化的观测数据分布(b~f,以 2013 年 10 月 6 日 1200 UTC 为例)各个散点分布图

(b)地面观测,(c)探空观测,(d)飞机报观测,(e)卫星观测,(f)多普勒雷达

Fig. 2 The study domain (a) and the distribution of data sources (b—f, sample data from 6 October 2013 valid within 1 h of 1200 UTC)

Dots in each plot below: (b) surface, (c) radiosonde, (d) AIREP, (e) satellite radiances, (f) Doppler radar

插值获取。

2.2 观测资料

用于资料同化的观测资料主要来自于 NCEP 提供的全球资料同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS)观测数据、中国气象局国家气象信息中心(NMIC)和浙江省气象信息网络中心(ZJMIC)的国内和浙江省内未进行国际交换的观测数据,按观测类型分为:

(1) 地面资料(图 2b):包括机场地面报(METAR)、天气站点报(SYNOP)、船舶和浮标观测(SHIP+BUOY),以及探空站(rawinsonde)的地面观测,主要来自于 NCEP 收集的全球 GTS 常规观测数据以及 NMIC 整理的部分地面观测数据,资料时间分辨率为 1 h,其观测要素为气压、温度、风和露点温度。

(2) 探空资料(图 2c):包括探空站观测(rawinsonde),主要来自于 NCEP 收集的全球 GTS 探空观测数据以及 NMIC 整理的部分探空观测数据,资料时间分辨率为 12 h(部分站点加密至 6 h),其观测要素为高度、温度、风和湿度。

(3) 飞机报资料(图 2d):包括飞机报文观测(AIREP),主要来自于 NMIC 整理的飞机报文观测数据,资料时间分辨率为 1 h,其观测要素为风、温度和湿度。

(4) 卫星资料(图 2e):包括 AMSUA、HIRS4 和 MHS 辐射亮温观测,主要来自于 NCEP 收集的

卫星数据,资料时间分辨率为 6 h,其观测要素为辐射亮温。

(5) 雷达资料(图 2f):主要来自 ZJMIC 提供的浙江省 5 部多普勒 SA/SB 波段雷达的观测数据,资料时间分辨率为 1 h,其观测要素为雷达反射率和径向风。

2.3 试验设计

为探讨不同资料同化对登陆台风菲特短期预报的影响,本研究设计了 7 组数值试验(包括 1 组控制试验和 6 组敏感性对照试验,见表 1)。

(1) 控制试验(CTL):使用 WPS 从 CFSR 再分析资料插值处理得到 2013 年 10 月 6 日 06 时的插值场作为初始背景场,从 06—12 时进行间隔 1 h 的循环同化,其中地面资料、飞机报资料、雷达反射率和径向风资料逢整点由 GSI-3DVAR 同化进入模式,探空资料和卫星辐射亮温资料只在 06 和 12 时同化。然后以 12 时结束循环同化后的分析场为初始场,向前积分 12 h 至 7 日 00 时。

(2) 敏感性试验:其余设置与控制试验相同,只是每组敏感性试验分别剔除地面资料(NSF)、探空资料(NRS)、飞机报资料(NAC)、卫星资料(NST)、雷达反射率资料(NRF)、雷达径向风资料(NRV)。

Benjamin et al(2010)已经成功证明采用“拒绝”方式设置敏感性试验,通过对比控制试验和敏感性试验结果,可以清晰看到不同资料对整个数值模式及资料同化系统的贡献。

表 1 试验设计
Table 1 Experiment design

试验名称	说明	未同化的要素
CTL	同化所有资料,包括地面、探空、飞机报、卫星辐射亮温、雷达反射率和径向风	——
NSF	同化 CTL 中除地面资料外的所有资料	气压,温度,风,露点温度
NRS	同化 CTL 中除探空资料外的所有资料	高度,温度,风,湿度
NAC	同化 CTL 中除飞机报资料外的所有资料	风,温度,湿度
NST	同化 CTL 中除卫星辐射亮温资料外的所有资料	辐射亮温
NRF	同化 CTL 中除雷达反射率资料外的所有资料	反射率
NRV	同化 CTL 中除雷达径向风资料外的所有资料	径向风

3 结果分析

台风是一个深厚的天气系统,本研究从高空场、路径和强度以及降水等三个方面的预报结果进行对比分析。

3.1 对高空场的影响

本研究选取中国气象局国家气象信息中心提供的研究区域内 46 个探空观测站(图 2c)作为实际观测的参考标准,将模式预报的温度、湿度和风速分别插值到对应的站点和层次,并统计得到高空场各要

素的均方根误差(RMSE),其定义为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{l=1}^{N_l} (X_{i,l} - O_{i,l})^2}{N_s N_l}}$$

式中, $X_{i,l}$, $O_{i,l}$ 为第 i 号站点第 l 层的模式预报值和观测值, N_s , N_l 分别为站点数目和层数。

为更加清晰地显示各个资料同化所带来的差异,图 3 给出了各个敏感性试验与控制试验之间模拟的大气温度、湿度和风速的 RMSE 的差异(敏感性试验减去控制试验)。因此,图 3 中正值表示该敏感性试验对应的资料对模拟结果有正贡献,负值则为负贡献。

分析敏感性试验与控制试验之间,模拟的高空形势场 RMSE 的差异得到(图 3): (1) 总体上看,探空资料对整层大气状态模拟的贡献率最大,

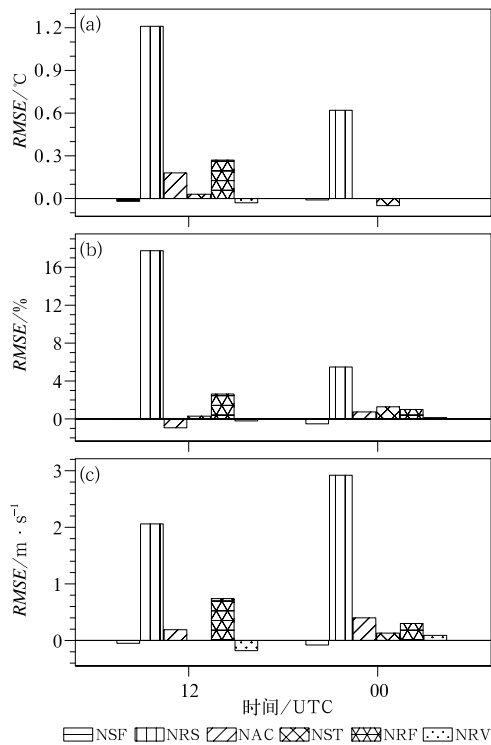


图 3 敏感性试验与控制试验对整层大气(a)温度,(b)相对湿度,(c)风速的模拟 RMSE(以探空观测为标准)的差异

Fig. 3 Differences in RMSE (vs radiosonde) between observation denial experiments listed in Table 1 and control test run for (a) temperature, (b) relative humidity, and (c) wind speed for the whole domain

“拒绝”该资料后模式模拟的温度、湿度和风速的平均 RMSE(与控制试验 RMSE 的相对值)将分别增加 0.915°C (62.0%)、10.1% (60.2%) 和 2.49 m·s⁻¹ (54.8%);其次为雷达反射率和飞机报,分别“拒绝”这两种资料后模式模拟的温度、湿度和风速的平均 RMSE 将分别增加 0.135°C (9.2%)、2.92% (16.5%)、0.52 m·s⁻¹ (11.3%) 和 0.09°C (6.1%)、-1.2% (-6.8%)、0.295 m·s⁻¹ (6.4%);地面资料、卫星资料和雷达径向风资料的贡献率很小,有时甚至是负贡献。Benjamin et al (2010) 指出贡献率最大的资料也是飞机报和探空资料(研究中没有比对雷达反射率资料),这与本研究的结论是一致的。但需要指出的是,用于同化的探空资料与用于验证的探空资料是有同源性的,这可能会导致统计探空的贡献率虚高。同时,由于雷达径向风数据覆盖范围仅有浙江省,且其探测到信息中夹杂着更多的中小尺度信息,这也可能是导致本研究中雷达径向风贡献率很小的原因。(2) 同一种资料对不同要素的贡献率也有不同,如飞机报资料对于风速模拟的正贡献比其对温度和湿度的贡献更为明显。仲跻芹等 (2010) 研究表明飞机观测资料的同化对于前 9 h 预报时效内的 925~250 hPa 高空风预报有明显的正面影响。这与本研究的结论也是基本一致的。(3) 同一种资料对不同预报时段的贡献率也有差异,如雷达反射率的贡献率在模式预报前期明显大于后期。雷达反射率通过 GSI-3DVAR 云分析系统,直接调整初始场中云水物质含量,并通过凝结潜热释放等微物理过程影响温度和风场。但由于缺乏动力尺度的响应过程,其影响程度随着积分时间呈明显下降趋势(Sun et al, 2014)。

3.2 对路径和强度模拟的影响

台风路径和强度是台风预报的重要内容,也是台风灾害影响评估的重要考虑因素(张永恒等, 2009)。本研究选取中国气象局最佳台风路径数据集并结合官方实时发布的数据作为台风路径和强度观测值。该数据是在综合考虑卫星、雷达、自动站等多项观测基础上确定出来的台风中心实际路径和强度,在台风菲特登陆期间的分辨率为 1 h。图 4a 显示控制试验较为准确地预报出“菲特”登陆期间的西行路径,登陆期间 12 h 平均误差仅为 25.1 km。各个敏感性试验预报的路径误差比控制试验均有不同程度的增大,NSF、NRV、NST、NRF、

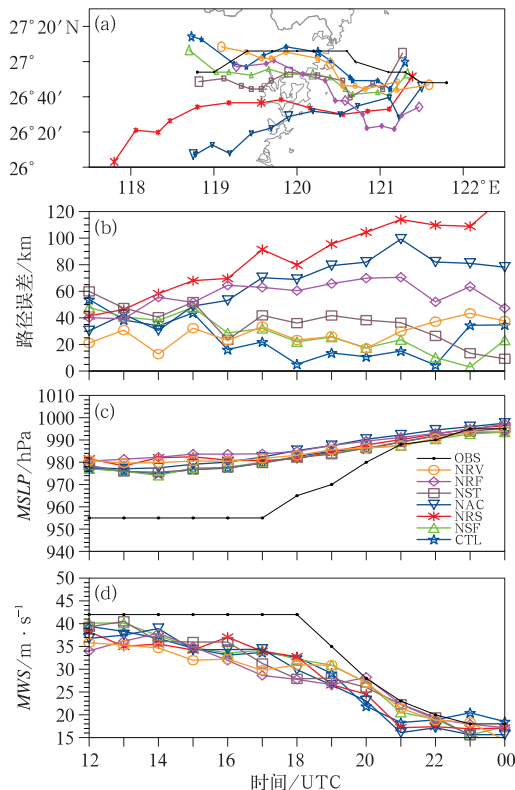


图 4 不同试验模拟的台风路径和强度对比
(a)路径,(b)路径误差,(c)中心最低气压,
(d)近中心最大风速

Fig. 4 Comparison of the typhoon track and intensity from different experiments
(a) track, (b) track error, (c) minimum sea level pressure, (d) maximum wind speed near typhoon center

NAC 和 NRS 试验的 12 h 平均路径误差分别为 27.7、28.3、35.9、57.2、65.1 和 86.1 km (图 4b)。这说明探空资料和飞机报资料对台风路径的模拟影响较大,其次是雷达反射率资料和卫星资料,雷达径向风和地面资料影响较小。这个结论与 3.1 节中主要影响高空场模拟的主要资料是一致的,也再度验证了台风路径主要受环境场引导影响。

控制试验对台风菲特登陆期间的强度模拟明显低估。表 2 显示:在台风登陆前的 6 h 内,CTL 模拟的台风中心最低气压(MSLP)和近中心最大风力(MWS)分别为 974.9 hPa 和 39.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,而实际观测值为 955 hPa 和 42 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。各个敏感性试验模拟的 MSLP 比控制试验略有增加,尤其是 NRF、NRV、NRS、NAC 试验最小,MSLP 分别为 980.5、979.6、978.4 和 977.1 hPa;相应的,各个敏感性试验模拟的 MWS 与控制试验相比虽然没有呈现一致

性的变化,但从最大 MWS 来看,NRF、NRV、NRS、NAC 四个试验有一定减小,分别为 37.9、35.8、38.2 和 38.9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这说明影响台风强度模拟的主要是雷达径向风、雷达反射率、探空资料和飞机报资料。尤其要指出的是,雷达径向风资料包含较多中小尺度信息,对台风强度的模拟较大的贡献,但对台风路径的影响并不是太大,这可能与本研究中雷达数据的覆盖度较小以及台风菲特本身特性有关。令人感到意外的是,雷达反射率资料对台风路径和强度影响较大,其可能的机理是通过复杂云分析技术改变云水物质含量同时考虑了凝结潜热释放,并通过绝热数值滤波初始化技术同化到模式中,从而进一步影响大气湿度、温度及风场等(Hu et al, 2006; Stephan et al, 2008; Weygandt et al, 2008)。

表 2 台风登陆前 6 h 各个试验模拟和观测的中心最低气压和近中心最大风速的平均值和极值

Table 2 The simulated and observed average values and extremum of the lowest pressure and maximum wind speed near typhoon center in 6 h before typhoon landfall

试验	最低气压/hPa		最大风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
	平均值	最小值	平均值	最大值
OBS	956.4	955.0	42.0	42.0
CTL	977.8	974.9	35.5	39.4
NSF	977.8	974.1	36.0	40.2
NRS	981.1	978.4	35.3	38.2
NAC	979.8	977.1	35.2	38.9
NST	978.0	975.5	35.3	40.5
NRF	982.9	980.5	33.1	37.9
NRV	980.9	979.6	33.0	35.8

3.3 对降水模拟的影响

降水是台风预报中的另一个重要内容。由于台风菲特登陆期间的降水主要集中在浙江省区域,本研究选取了浙江省气象网络信息中心提供的 2200 多个区域自动站作为降水观测值,其平均空间分辨率为 6~7 km。已有研究表明,在较高空间密度情况下,不同插值方法对结果影响有限(许变等, 2017)。因此,在定量评估降水时,本研究采用简单易行的反距离权重方法将站点降水插值到模式格点上。

台风菲特登陆期间,降水雨带从东南沿海地区(6 日 12—15 时)逐渐扩展到整个浙江中东部地区(15—18 时),在台风中心登陆后逐渐分裂成南北两个雨带(18—21 时),并在浙江南部(温州丽水)及北部(宁波嘉兴)地区形成较强降水(6 日 21 时至 7 日 00 时)(图 5a₁~5a₄)。控制试验很好地模拟出了降

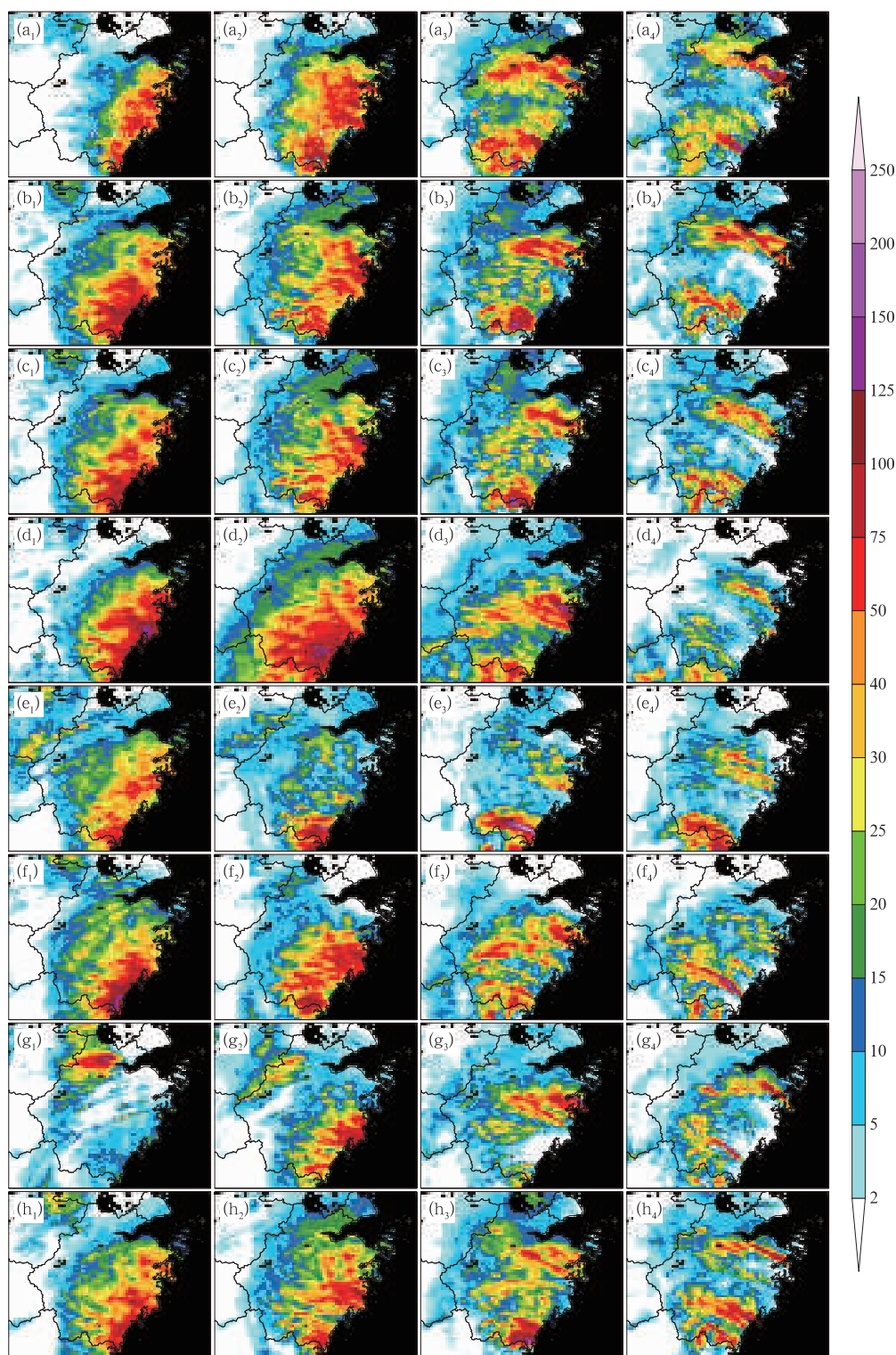


图 5 台风登陆期间逐 3 h 累计降水的模拟及实况(单位:mm)

(a)实况, (b)控制试验, (c)无地面资料试验, (d)无探空资料试验, (e)无飞机报资料试验, (f)无卫星资料试验,
(g)无雷达反射率资料试验, (h)无雷达径向风资料试验

(a₁~h₁) 1500 UTC(0~3 h), (a₂~h₂) 1800 UTC(3~6 h), (a₃~h₃) 2100 UTC(6~9 h), (a₄~h₄) 0000 UTC(9~12 h)

Fig. 5 The observed and simulated 3 h precipitation during the landfall of typhoon (unit: mm)

(a) observation, (b) CTL, (c) NSF, (d) NRS, (e) NAC, (f) NST, (g) NRF, (h) NRV

(a₁~h₁) 1500 UTC (0~3 h), (a₂~h₂) 1800 UTC (3~6 h), (a₃~h₃) 2100 UTC (6~9 h), (a₄~h₄) 0000 UTC (9~12 h)

水的落区及其空间演变趋势(图 5b₁~5b₄ 给出了模式起报后逐 3 h 的降水分布)。NSF 试验的模拟结果除了一些细节上的差异外,主要降水区域和量级与 CTL 试验相当(图 5c₁~5c₄),这说明地面资料对降水模拟的影响较小。NRS 试验主要表现为 6~12 h 雨带的南偏、3~9 h 降水明显高估与 9~12 h 降水明显低估(图 5d₁~5d₄)。NAC 试验对降水的模拟比 NRS 试验更差,主要体现在对主体雨带模拟南偏更明显,导致了 3~12 h 对宁波地区强降雨带的漏报(图 5e₁~5e₄)。这说明探空资料和飞机报资料同化对台风登陆期间的降水模拟有较大正贡献。NST 试验在 0~6 h 取得了与 CTL 相当的模拟结果,但对 6~12 h 宁波地区的强降水带模拟有较大偏差,说明卫星资料在 6~12 h 的贡献较大(图 5f₁~5f₄)。NRF 试验是所有敏感性试验中结果最差的,主要表现在对 0~9 h 强降雨带的明显漏报(图 5g₁~5g₄),这说明对于降水而言,雷达反射率资料同化贡献率是各种资料中最大的,且该资料主要影响在模式预报前期并随着时间逐步减弱。NRV 试验的模拟结果略差于 CTL 试验,说明本个例中雷达径向风在降水模拟中的作用并不大。

为定量评估各个试验的降水模拟结果,图 6 给出各个敏感性试验逐 3 h 累计降水的 RMSE 和 ETS 评分与控制试验的差异(敏感性试验减控制试验),显然 RMSE 差异正值越大、ETS 差异负值越大,说明敏感性试验对降水模拟越差,即敏感性试验对应的资料对降水模拟的影响越大。由图 6 可见,各资料对降水模拟的影响程度(以>50 mm 量级的 ETS 评分排序)由大到小依次为雷达反射率、飞机报、探空资料、卫星资料、地面资料和雷达径向风,分别“拒绝”这些资料后模式模拟的 3 h 累计降水平均 RMSE 分别增加 4.4 mm (28.9%)、4.8 mm (31.1%)、4.5 mm (29.0%)、1.8 mm (11.5%)、0.9 mm (5.6%)和 -0.4 mm (-2.4%),>50 mm 量级降水的 ETS 评分分别降低 0.15 (63.1%)、0.11 (45.4%)、0.086 (36.7%)、0.016 (6.9%)、0.046 (19.5%)和 0.018 (7.5%)。雷达反射率资料对降水的贡献随着模式积分时间呈明显的下降趋势,而飞机报、探空资料等对降水的贡献则在模式积分 3 h 之后开始出现。这可能是因为雷达反射率资料通过直接调整云水物质含量影响预报,因此在模式启动时刻对降水影响较大,但由于缺乏对应的动力条件的支持,随着模式积分延长,其影响效应逐渐下

降;而飞机报、探空等则直接通过调整水汽和动力场影响预报,其影响效应相对较长。另外,雷达径向风资料在本研究中虽然对降水的影响较小,甚至有时还会出现负效应,但值得注意的是其对大量级降水(50 mm 以上)表现出较为明显的正贡献。

由上述定性和定量分析可见,影响高空场、台风路径和强度较大的雷达反射率、探空和飞机报资料,也是对降水模拟贡献较大的资料。研究表明(陈联寿和丁一汇, 1979;陈联寿, 2010)降水是台风路径、强度、结构及微物理过程等因子影响的复杂结果,因此数值模式对台风路径、强度、结构等方面模拟的改进是使得降水改进的重要原因。图 7 给出了敏感性试验 NRF、NRS 及 NAC 与控制试验的 850 hPa 雨水混合比、台风中心位置及 3 h 累计降水的差异。从图 7c 和 7e 上可以看到,NRS 和 NAC 试验对台风中心位置的模拟比实况位置偏西南,对

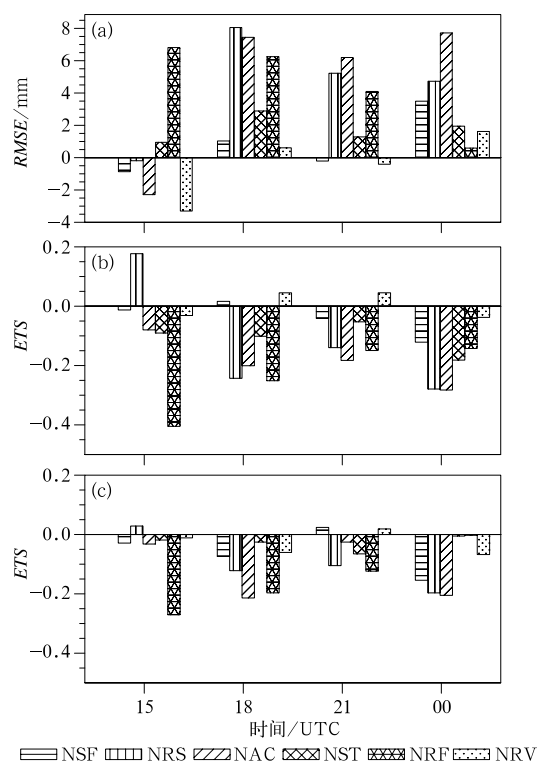


图 6 各个敏感性试验与控制试验对浙江省逐 3 h 降水模拟的(a)RMSE, (b)>10 mm 降水的 ETS 评分, (c)>50 mm 降水的 ETS 评分的差异
Fig. 6 Differences in RMSE and ETS between observation denial experiments listed in Table 1 and control run for 3 h precipitation for Zhejiang Province: (a) RMSE, (b) ETS for 10 mm threshold, (c) ETS for 50 mm threshold

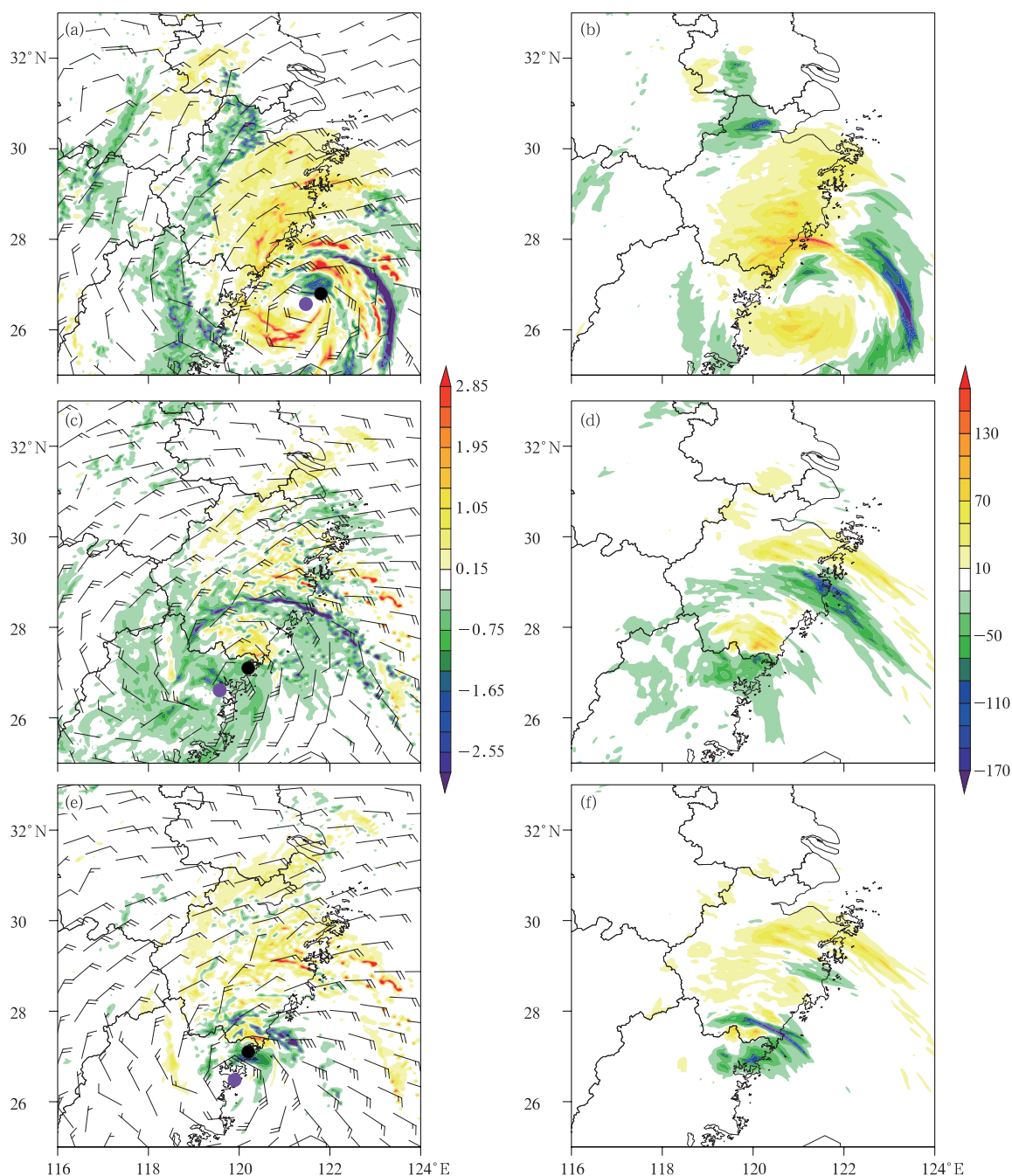


图 7 2013 年 10 月 6 日部分敏感性试验模拟的 10 m 风场以及控制试验与各敏感试验对 850 hPa 雨水混合比(a, c, e)和 3 h 累计降水(b, d, f)模拟的差异

(a, b)12 时的 NRF 试验,(c, d)18 时的 NRS 试验,(e, f)18 时的 NAC 试验

(黑色点为实际台风中心位置,紫色点为各敏感性试验模拟的台风中心位置)

Fig. 7 The simulated 10 m wind field from each observation denial experiment and the differences in rainwater mixing ratio at 850 hPa (a, c, e) and 3 h accumulated precipitation (b, d, f) between each observation denial experiment and the control experiment (control-observation denial) on 6 October 2013

(a, b) NRF at 1200 UTC, (c, d) NRS at 1800 UTC, (e, f) NRS at 1800 UTC

比图 5d₃~5d₄ 和图 5e₃~5e₄ 可见这两个试验中模拟的降水雨带也有向南偏移的现象。另外,云水物

质模拟的差异是导致降水差异的直接原因之一:以雨水混合比为例,对比不同试验雨水混合比差异与

降水差异的空间分布,可以发现两者存在非常好的相关性(图7)。这些现象说明:本研究降水模拟的改进与模式对台风路径、强度及水物质模拟改进有关,一方面探空和飞机报资料的同化引入通过改进高空场引导气流改善了台风路径,另一方面雷达反射率的同化吸收通过改进云水物质及其反馈作用完善了台风强度与结构的模拟,最终促成了降水落区和强度的改进。

4 结论与讨论

本文利用 WRF 模式和 GSI-3DVAR 同化系统开展基于 OSE 方法的数值对照试验,分析了不同资料同化对台风菲特(2013)登陆过程预报的影响。对比各敏感性试验和控制试验结果,得出以下结论:

(1) 各类资料对模拟结果有一定的正效应,但贡献程度有一定差别。综合来看,探空、雷达反射率和飞机报对模拟结果有较大影响,“拒绝”探空资料后模式模拟的温度、湿度和风速的平均 RMSE 将分别增加 0.915°C (62.0%)、 10.1% (60.2%) 和 $2.49\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (54.8%),而分别“拒绝”雷达反射率和飞机报后模式模拟的温度、湿度和风速的平均 RMSE 将分别增加 0.135°C (9.2%)、 2.92% (16.5%)、 $0.52\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (11.3%) 和 0.09°C (6.1%)、 -1.2% (-6.8%)、 $0.295\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (6.4%);而卫星辐射亮温、雷达径向风和地面资料对模拟结果影响较小。

(2) 各类资料对不同台风预报效果评估参数的影响程度不同。对高空场和台风路径模拟影响较大的是探空和飞机报,对台风强度模拟影响较大的是雷达反射率、径向风、探空和飞机报,而对降水模拟影响较大的是雷达反射率、探空和飞机报。

(3) 各类资料对降水模拟的贡献率随时间变化不同。雷达反射率资料对降水的贡献随着模式积分时间呈明显的下降趋势,而飞机报、探空资料等对降水的贡献则在模式积分 3 h 之后开始出现。

(4) 进一步分析不同资料同化对于降水模拟影响过程表明,降水模拟的改进与模式对台风路径、水物质及强度模拟改进有关,因此影响高空场、台风路径和强度较大的雷达反射率、探空和飞机报资料,也是对降水模拟贡献较大的资料。

本研究的结论与 Benjamin et al(2010)的研究结论较为一致,同时也得到一些新认识(如除了探空和飞机报资料外,雷达反射率对模拟结果也有较大贡献率),这可能与不同天气系统动力和热力结构有

关。“菲特”是个以强台风强度登陆的深厚对流系统,云系覆盖范围广,登陆期间“菲特”本身携带的水物质含量和降水尤为强大,这可能是造成雷达反射率同化在本研究中贡献率较大的原因之一。另外,用于验证的探空资料与同化的探空数据有一定的同源性,因此也可能造成结论对探空资料贡献率的高估。最后,个例研究造成的样本数量不足也可能会影响结论的普适性,更多个例或是长时间的模拟验证将有待今后研究继续开展。

参考文献

- 陈锋,冀春晓,董美莹,等,2012. 雷达径向风速同化对台风麦莎模拟的影响[J]. 气象,38(10):1170-1181.
- 陈联寿,2010. 热带气象灾害及其研究进展[J]. 气象,36(7):101-110.
- 陈联寿,丁一汇,1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社:440-481.
- 王海平,高拴柱,2014. 2013年10月大气环流和天气分析[J]. 气象,40(1):126-131.
- 谢惠敏,任福民,李国平,等,2016. 超强台风丹娜丝对1323号强台风菲特极端降水的作用[J]. 气象,42(2):156-165.
- 许变,董美莹,陈锋,2017. 基于逐时降水站点资料空间插值方法对比研究[J]. 气象与环境学报,33(1):34-43.
- 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.
- 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. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.1608.16127.
- 张永恒,范广洲,马清云,等,2009. 浙江省台风灾害影响评估模型[J]. 应用气象学报,20(6):772-776.
- 仲跻芹,陈敏,范水勇,等,2010. AMDAR 资料在北京数值预报系统中的同化应用[J]. 应用气象学报,21(1):19-28.
- Aggarwal R, Kumar R, 2013. A comprehensive review of numerical weather prediction models[J]. Int J Comp Appl, 74(18):44-48.
- Benjamin S G, Jamison B D, Moninger W R, et al, 2010. Relative short-range forecast impact from aircraft, profiler, radiosonde, VAD, GPS-PW, METAR, and Mesonet observations via the RUC hourly assimilation cycle[J]. Mon Wea Rev, 138(4):1319-1343.
- Bouttier F, Kelly G, 2001. Observing-system experiments in the ECMWF 4D-Var data assimilation system[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 127(574):1469-1488.
- Cardinali C, 2009. Monitoring the observation impact on the short-range forecast[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 135(638):239-250.
- Chen Fei, Dudhia J, 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity[J]. Mon Wea Rev, 129(4):569-585.
- Evensen G, 2009. Data Assimilation[M]. 2nd ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. DOI:10.1007/978-3-642-03711-5_1.

- Graham R J, Anderson S R, Bader M J, 2000. The relative utility of current observation systems to global-scale NWP forecasts [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126(568):2435-2460.
- Gu Jianfeng, Xiao Qingnong, Kuo Y H, et al, 2005. Assimilation and simulation of typhoon Rusa (2002) using the WRF system [J]. *Adv Atmos Sci*, 22(3):415-427.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J, 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Mon Wea Rev*, 134(9):2318-2341.
- Hu Ming, Shao Hui, Stark D, et al, 2015. Gridpoint statistical interpolation advanced user's guide version 3.4.0.0[EB/OL]. Developmental Testbed Center, (2015-07). http://www.dtcenter.org/com-GSI/users/docs/users_guide/AdvancedGSIUserGuide_v3.4.0.0.pdf.
- Hu Ming, Xue Ming, Brewster K, 2006. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of Fort Worth tornadic thunderstorms. Part I: Cloud analysis and its impact. *Mon Wea Rev*, 134:675-698.
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al, 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. *J Geophys Res*, 113 (D13): D13103. DOI:10.1029/2008JD009944.
- Jiménez P A, Dudhia J, González-Rouco J F, et al, 2012. A revised scheme for the WRF surface layer formulation [J]. *Mon Wea Rev*, 140(3):898-918.
- Jung B J, Kim H M, Kim Y H, et al, 2010. Observation system experiments for Typhoon Jangmi (200815) observed during T-PARC [J]. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 46(3):305. DOI:10.1007/s13143-010-1007-y.
- Lin H H, Lin P L, Xiao Qingnong, et al, 2011. Effect of Doppler radial velocity data assimilation on the simulation of a typhoon approaching Taiwan: a case study of typhoon aere (2004) [J]. *Terr Atmos Oceanic Sci*, 22(3):325.
- Lord S J, Zapotocny T, Jung J, 2004. Observing system experiments with NCEP's global forecast system [C]// *Proceedings of the 3rd WMO Workshop on the Impact of Various Observing Systems on Numerical Weather Prediction*. Alpbach, Austria; WMO:56-62.
- Navon I M, 2009. Data assimilation for numerical weather prediction: a review [M]// Park S K, Xu Liang. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag: 21-65. DOI: 10.1007/978-3-540-71056-1_2.
- Saha S, Moorthi S, Pan Hualu, et al, 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. *Bull Am Meteor Soc*, 91(8): 1015-1057.
- Schwartz C S, Liu Zhiqian, Chen Yongsheng, et al, 2012. Impact of assimilating microwave radiances with a limited-area ensemble data assimilation system on forecasts of typhoon morakot [J]. *Wea Forecasting*, 27(2):424-437.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al, 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR, Boulder, Colorado, USA: National Center for Atmospheric Research.
- Stephan K, Klink S, Schraff C, 2008. Assimilation of radar derived rain rates into the convective scale model COSMO-DE at DWD. *Quart J Roy Meteor Soc*, 134:1315-1326.
- Sun Juanzhen, Xue Ming, Wilson J W, et al, 2014. Use of NWP for nowcasting convective precipitation: recent progress and challenges [J]. *Bull Am Meteor Soc*, 95(3):409-426.
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al, 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization [J]. *Mon Wea Rev*, 136(12):5095-5115.
- Wang Liang, Lu Hancheng, Pan Xiaobin, et al, 2009. Correction of asymmetric strengthening of QuikSCAT wind field and assimilation application in typhoon simulation [J]. *J Trop Meteor*, 15(1):78-82.
- Wang Xuguang, Parrish D, Kleist D, et al, 2013. GSI 3DVar-based ensemble-variational hybrid data assimilation for NCEP global forecast system: single-resolution experiments [J]. *Mon Wea Rev*, 141(11):4098-4117. DOI:10.1175/MWR-D-12-00141.1.
- Weygandt S S, Benjamin S G, Smirnova T G, et al, 2008. Assimilation of radar reflectivity data using a diabatic digital filter within the Rapid Update Cycle. Preprints, 12th Conf. on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface, New Orleans, LA, Amer Meteor Soc, 8.4. <https://ams.confex.com/ams/88Annual/webprogram/Paper134081.html>.
- Xiao Qingnong, Kuo Y H, Sun Juanzhen, et al, 2007. An approach of radar reflectivity data assimilation and its assessment with the inland QPF of typhoon Rusa (2002) at landfall [J]. *J Appl Meteorol Climatol*, 46(1):14-22.
- Zapotocny T H, Jung J A, Le Marshall J F, et al, 2007. A two-season impact study of satellite and in situ data in the NCEP Global Data Assimilation System [J]. *Wea Forecasting*, 22(4):887-909.
- Zapotocny T H, Menzel W P, Nelson J P III, et al, 2002. An impact study of five remotely sensed and five in situ data types in the Eta Data Assimilation System. *Wea Forecasting*, 17(2):263-285.
- Zeng Zhihua, Duan Yihong, Liang Xudong, et al, 2005. The effect of three-dimensional variational data assimilation of QuikSCAT data on the numerical simulation of typhoon track and intensity [J]. *Adv Atmos Sci*, 2005, 22(4):534-544.
- Zhang Man, Zupanski M, Kim M J, et al, 2013. Assimilating AMSU-a radiances in the TC core area with NOAA operational HWRF (2011) and a hybrid data assimilation system: Danielle (2010) [J]. *Mon Wea Rev*, 141(11):3889-3907. DOI:10.1175/MWR-D-12-00340.1.
- Zhao Qingyun, Jin Yi, 2008. High-resolution radar data assimilation for Hurricane Isabel (2003) at landfall [J]. *Bull Am Meteor Soc*, 89(9):1355-1372. DOI: 10.1175/2008BAMS2562.1.
- Zhao Kun, Li Xinfeng, Xue Ming, et al, 2012. Short-term forecasting through intermittent assimilation of data from Taiwan and mainland China coastal radars for Typhoon Meranti (2010) at landfall [J]. *J Geophys Res*, 117(D6):D06108. DOI:10.1029/2011JD017109.