

陆续, 马旭林, 王旭光. 2015. 三维变分同化机载雷达资料对飓风预报的影响研究——2012 年 Isaac 试验 [J]. 大气科学, 39 (6): 1111–1122. Lu Xu, Ma Xulin, Wang Xuguang. 2015. A study of the impact of airborne radar data assimilated by 3DVar on the prediction of hurricane—Isaac 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (6): 1111–1122, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14262.

三维变分同化机载雷达资料对飓风预报的影响研究 ——2012 年 Isaac 试验

陆续¹ 马旭林¹ 王旭光²

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 201144

2 俄克拉荷马大学, 美国俄克拉荷马州 73072

摘 要 随着气旋内部资料 (Inner core data) 在热带气旋预报中的使用, 其重要性逐渐受到人们越来越多的关注。为了研究该资料中尾部机载雷达 (Tail Doppler Radar, TDR) 资料在业务系统中的应用效果, 本文利用 2012 年飓风等级热带气旋 Isaac 期间的 TDR 资料, 采用业务 HWRF (Weather Research and Forecasting model for Hurricane) 数值模式与业务 GSI (Grid-point Statistical Interpolation system) 三维变分同化 (Three-Dimensional Variational Data Assimilation, 3DVar) 系统对 TDR 资料进行了同化, 展开了一系列预报试验, 并对其效果进行了分析和研究。结果表明与 HWRF 的业务预报相比, GSI 系统同化 TDR 资料后对热带气旋的路径和强度预报有明显改进; 但其同化效果同时也表明业务三维变分中的静态背景误差协方差在 TDR 资料的应用中仍需要进一步的改进。

关键词 GSI (Grid-point Statistical Interpolation system) 三维变分同化 HWRF (Weather Research and Forecasting model for Hurricane) TDR (Tail Doppler Radar) 资料 热带气旋

文章编号 1006-9895(2015)06-1111-12

中图分类号 P447

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14262

A Study of the Impact of Airborne Radar Data Assimilated by 3DVar on the Prediction of Hurricane—Isaac 2012

LU Xu¹, MA Xulin¹, and WANG Xuguang²

1 Key laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 University of Oklahoma, Norman 73072, USA

Abstract Given the increasingly important role of inner-core data in tropical cyclone (TC) forecasting, the present paper investigates the impact of assimilating Tail Doppler Radar (TDR) data on the prediction of hurricanes. A series of experiments are conducted using the operational Weather Research and Forecasting model for Hurricane (HWRF) and grid-point statistical interpolation (GSI) 3D variational (3DVar) system for Hurricane Isaac (2012). It is found that the assimilation of TDR data can correct the storm center to a better position compared to without TDR assimilation. Furthermore, the better inner-core structures in the results of the experiments that assimilated the TDR data have a positive impact on the intensity forecasts. In general, the TDR data improve the TC track and intensity forecast compared to the official forecasts from the operational HWRF, and the forecasts without assimilating the TDR data. The study also suggests that further reducing the background error covariances to be consistent with the dynamical and thermodynamical structures of the hurricanes is needed to further improve analyses and predictions of TCs.

收稿日期 2014-09-11; 网络预出版日期 2015-03-15

资助项目 国家自然科学基金项目 41275111, 飓风预报改进项目 (Hurricane Forecast Improvement Project, USA)

作者简介 陆续, 男, 1988 年出生, 硕士研究生, 主要从事数值预报资料同化研究。E-mail: luxu.yb@gmail.com

通讯作者 王旭光, E-mail: xuguang.wang@ou.edu

Keywords Grid-point statistical interpolation, 3D variational data assimilation, Weather Research and Forecasting model for Hurricane, Tail Doppler Radar data, Tropical cyclone

1 引言

热带气旋是一种起源于热带或副热带洋面上的低压涡旋系统,当其持续风速达到 33 m s^{-1} 以上时,则根据生成区域的不同,可被称为台风或飓风。它是目前世界上最频繁发生的自然灾害之一,对沿海的城市和国家有着巨大的影响(蔡则怡等, 1994; 陈联寿和孟智勇, 2001; Pielke et al., 2008)。其路径、强度及结构,尤其是登陆前相关信息的准确预报对沿海地区的社会 and 经济发展非常重要。事实上,随着数值模式的发展和初始条件的改进,人们对热带气旋路径的预报,尤其是中短期路径预报已取得了较大进展,但是对于强度和结构演变的预报依然差强人意(王斌等, 1998; Houze et al., 2007; Elsberry et al., 2007; 宋金杰等, 2011)。Kaplan et al. (2010) 的研究表明,在快速加强(Rapid Intensification)的热带气旋强度预报中,大尺度环境场的信息起到的作用有限,而气旋内部更加详细准确的信息可能是有效提升热带气旋强度预报技巧的一个重要方向。

目前,气旋内部资料主要以地基和机载雷达观测为主。对于还未登陆或者远离大陆的热带气旋而言,借助飞机装载特定仪器(如机载多普勒雷达等),通过往复穿越气旋中心的方式收集数据已经是一种比较成熟的观测手段(Abersson et al., 2006)。美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)已对热带气旋进行了超过 35 年的高分辨率机载观测(Abersson et al., 2006)。虽然已经有许多关于尾部机载雷达(Tail Doppler Radar, TDR)资料在热带气旋预报中的应用和研究,并取得了一系列的成果(Marks and Houze, 1984, 1987; Franklin et al., 1993; Reasor et al., 2000; Abersson et al., 2006; Du et al., 2012)。但目前对于这种机载雷达资料在高分辨率模式中的使用和研究还相对较少(Aksoy, 2013),近年来才逐渐展开相关研究(Aksoy et al., 2012, 2013; Weng and Zhang, 2012)。

Xiao et al. (2009) 的研究表明,使用三维变分同化机载多普勒雷达资料可以在分析时刻提高对飓风结构特征的表征,并且对于飓风的强度和结构

预报改进都有重要的贡献。但可能由于缺乏流依赖(flow-dependent)的背景误差协方差结构,对快速加强阶段的飓风同化质量改进效果相对较弱。而 Rogers et al. (2012) 利用机载多普勒雷达和合成资料对热带气旋的动力学特征进行的分析,也间接证明了机载多普勒雷达对于热带气旋结构同化的有效性。此外还有一系列的研究(Marks and Houze, 1987; Reasor et al., 2000; Rogers et al., 2012)表明,多普勒雷达的径向风资料可以很好的表征热带气旋的热力和动力学结构。根据现有的数值模拟结果(Du et al., 2012; Weng and Zhang, 2012; Aksoy et al., 2012; Li et al., 2012),机载多普勒雷达的径向风资料有助于热带气旋的路径和强度预报效果的提高以及其结构特征的改善。

随着越来越多关于气旋内部资料在热带气旋预报中应用研究的展开,如何有效的同化机载多普勒雷达资料成为了改进热带气旋预报的重要研究问题(Weng and Zhang, 2012; Aksoy et al., 2013)。由于三维变分同化具有廉价且快速的特征,其目前仍是众多数值预报中心主要的业务同化系统,如中国、北美以及一些欧洲国家(薛纪善等, 2008; 马旭林等, 2008, 2009)。因此,本文利用业务的 HWRF 模式(Weather Research and Forecasting model for Hurricane)和 GSI(Grid-point Statistical Interpolation system)同化系统,采用与业务化三维变分相同的同化设置来同化 TDR 资料,以探究 TDR 资料在现有的业务三维变分模式下的应用效果。

2 模式、资料与试验设计

本文采用业务 GSI 同化系统的三维变分同化及业务化设置对 TDR 资料进行同化(业务版本号: 19214),在业务的 HWRF 区域模式(业务版本号: 6736)下进行预报。

2.1 TDR 资料

在 NOAA 的 P-3 飞机上一共装载有三部不同的雷达,分别位于机头、机身底和机尾(http://www.aoml.noaa.gov/hrd/about_hrd/HRD-P3_radar.html [2014-11-14]). 其中飞机尾部的多普勒雷达收集到的资料,即 TDR 资料是目前最受关注的研究对象,亦为本文所使用的唯一观测资料。TDR 雷达为

3.22 cm 的 X 波段雷达, 它采用前后双向交替的扫描方式。TDR 雷达的扫描束与飞机间的夹角约为 70 度左右, 扫描一圈的时间约为 6 s, 同向两圈之间的距离约为 1.4 km, 如图 1a 所示。

本文中用到的 TDR 资料为美国的飓风研究中心 (Hurricane Research Division, HRD) 提供的自动化质量控制之后 (http://www.nhc.noaa.gov/jht/2003-2005reports/DOPLRgamache_JHTfinalreport.pdf [2014-11-14]) 的雷达径向风速资料。在范围较大, 结构良好的热带气旋探测过程中, NOAA P-3 飞机通常采用蝴蝶形状的飞行轨迹来回穿越热带气旋中心 (http://www.aoml.noaa.gov/hrd/HFP2012/1_P3_TDR.pdf [2014-11-14]), 飞机的飞行高度通常为 3 km。图 1b 即为一次标准 TDR 任务的理想飞行轨迹 [图片参考 Aksoy et al. (2012)] (在实际的飞行任务中, 飞机的飞行轨迹并不是完全等边, 而是会随着飞行过程中台风中心的位置移动而进行航线调整)。在这样一个理想的飞行任务中, 一共有 5 条飞行臂 (leg), 其中, AB, CD 和 EF 因为穿越了气旋中心, 所以又被称为穿越臂 (Penetrating Leg), 而 BC 和 DE 被称为顺风臂 (Downwind Leg)。通常而言, 顺风臂收集到的资料更倾向于环境场并且分布稀疏, 而穿越臂能收集到比较详细的气旋内部结构信息且资料分布更多而密集。就同化的效果而言, 顺风臂资料对于同化效果的影响很小 (Aksoy, 2013), 故本文的同化试验选用的资料仅为穿越臂资料。在实际操作中, 一次正常而完整的飞行任务通常由 3~5 条穿越臂组成, 飞机飞行过一条穿越臂所用的时间通常在 40~60 分钟左右, 故一次比较完整的飞行任务在开启多普勒雷达后进行资料收集的时间跨度约为 3~5 小时。由于 TDR 资料依靠飞机装载的雷达进行探测, 所以受到飞行成本和飞行条件的限制, 当且仅当热带气旋靠近大陆且热带气旋的发展程度有可能达到或者已经达到飓风等级程度时, NOAA 才会派出 P-3 飞机靠近目标气旋进行资料收集, 收集的频率通常为 12 小时/次 [通常收集的起始时间为 09 时 (协调世界时, 下同) 与 21 时]。因此, 并不是每一个热带气旋都有 TDR 资料的记载, 且对于有 TDR 资料的热带气旋而言, 也并非整个生命周期都能有连续的 TDR 资料记载, 这是 TDR 资料的一个局限性。

2.2 试验方案设计

本文采用的数值预报模式为业务化的 HWRF

(Hurricane WRF) 区域模式, 垂直层共 61 层, 模式层顶为 2 hPa。试验的水平分辨率为 9 km 单网格, 区域大小为 230×450 格点 (约为 $28^\circ \times 28^\circ$), 物理方案选择与业务预报方案一致, 采用新简化的 Arakawa-Schubert 积云对流参数化方案以及 HWRF 特有的单动量六层微物理方案, 长波和短波辐射方案都为 GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) 修正方案, 陆面模式为 GFDL 方案, 边界层方案采用 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 的 GFS (Global Forecasting System) 方案。初始条件和侧边界条件为业务 GFS 系统提供的试验型 GEFS (Experimental Global Ensemble Forecast System), 该资料源于 EnKF (Ensemble Kalman Filter) 拓展的 GFS 混合资料同化系统 (Whitaker et al., 2008; Wang et al., 2013), 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 时间分辨率为 1 小时; 同化系统为业务 GSI 系统的三维变分部分, GSI 系统中的参数设置则参照 HWRF 的业务同化设置, 同化中的分析变量为地面气压, 风速、虚温和相对湿度。

在飓风 Isaac 漫长的生命周期中, NOAA 的 P-3 飞机一共进行了 9 次收集 TDR 资料的飞行任务, 每次任务的飞行路径和任务分布如图 2a。由于资料的采集时间、热带气旋的状态以及飞机飞行轨迹等问题, TDR 资料并不是均匀分布在 00 时、12 时等整点时刻的前后三小时内, 而是集中于从 21 时或 09 时起的前 2~5 小时 (如任务 4 仅持续 2 小时, 只有两条不规则的穿越臂)。本文根据飞行轨迹人为划分顺风臂和穿越的飞行臂, 并仅同化穿越臂的 TDR 资料, 同化前将进行 3~5 小时不等的启动 (具体启动时间随每次 TDR 任务最早的穿越臂资料时间变化)。以第七次飞行任务为例, 此次飞行任务的详细飞行路径如图 2b 所示, 图中灰色点为 TDR 资料的水平分布。在这次任务中, 穿越臂一共有 5 条, 其各自的资料垂直分布如图 2c。

本文的试验分为 Static 和 NoDA 两种, 其中 Static 即为业务 GSI 同化系统的三维变分同化, 并仅同化 TDR 资料; 而 NoDA 则为不同化任何资料的对照试验。由于在 TDR 雷达收集资料的时间段内, 热带气旋会发生位置移动 (Aksoy, 2013), 所以需要采取循环同化方式, 将每一条穿越臂的资料同化到此臂的中间时刻, 而后预报到下一条穿越臂的中间时刻。在将一次 TDR 任务的所有穿越臂资

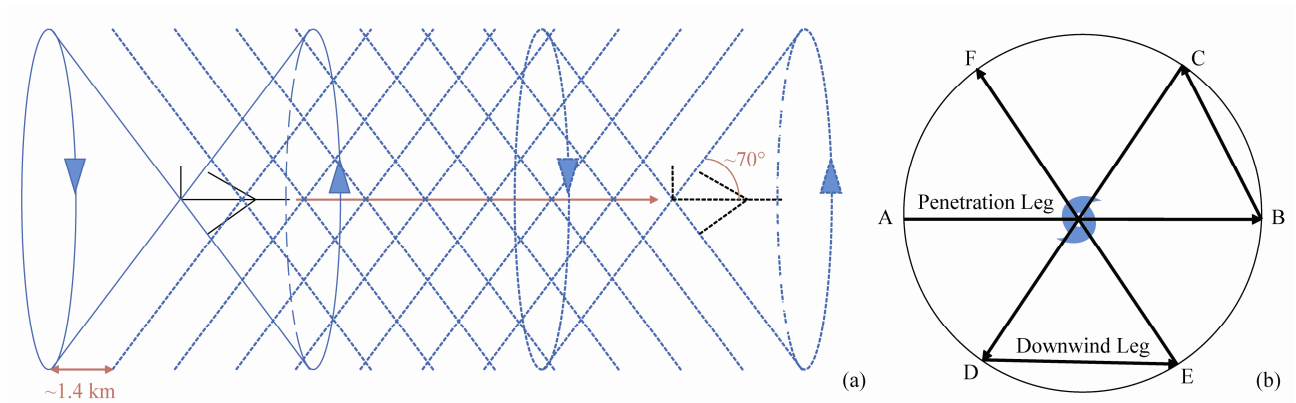


图 1 (a) TDR (Tail Doppler Radar) 雷达的扫描方式及 (b) 一次理想飞行任务的轨迹图

Fig. 1 (a) Scan scheme of the TDR (Tail Doppler Radar) radar and (b) theoretical flight track of one TDR mission

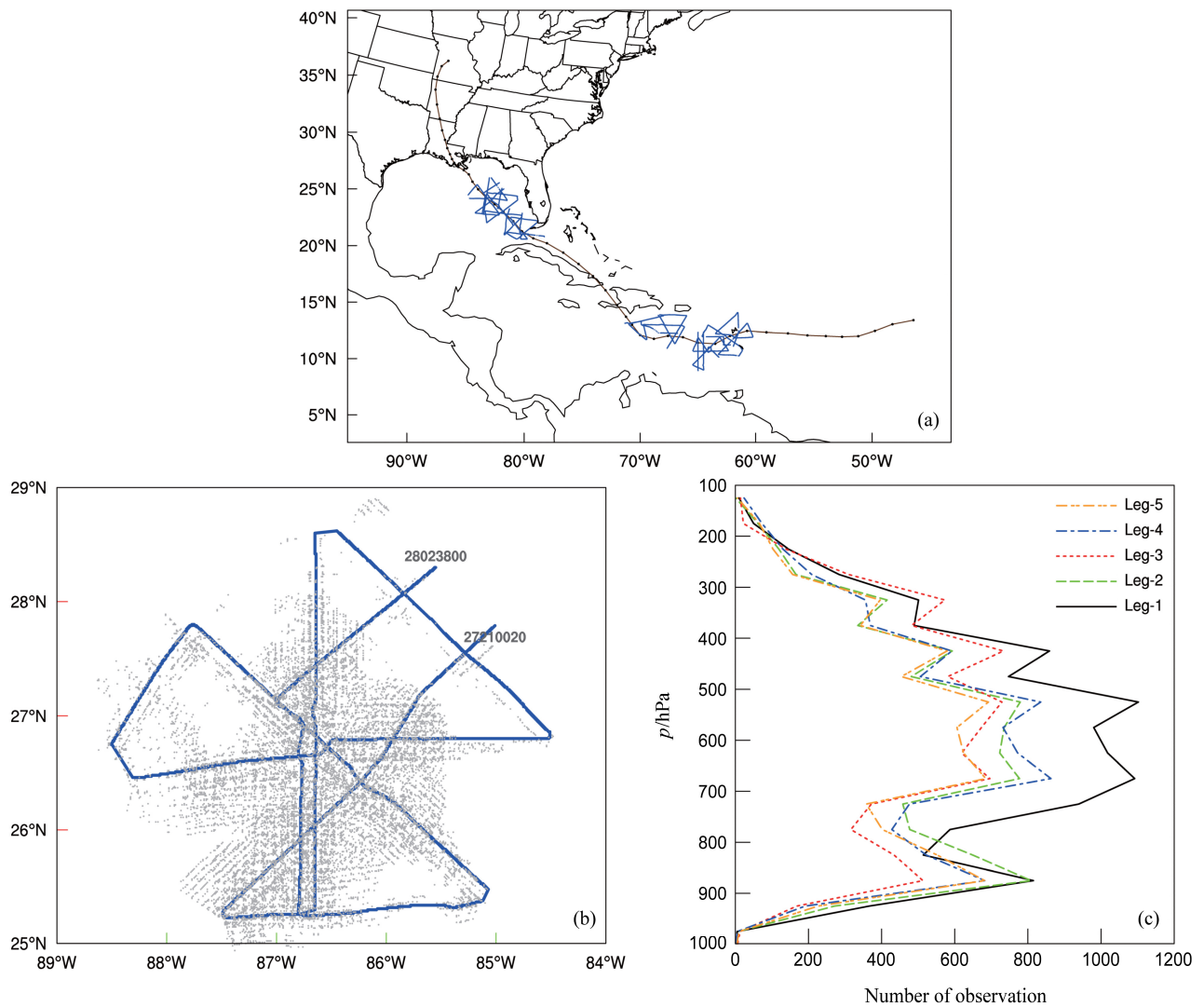


图 2 (a) 飓风 Isaac 期间 9 次 TDR 任务的飞行分布及第七次 TDR 任务雷达径向风速速度资料的 (b) 水平分布和 (c) 垂直分布

Fig. 2 (a) The flight track of nine TDR missions during Hurricane Isaac and the (b) horizontal and (c) vertical distribution of the radial velocity data of the seventh mission

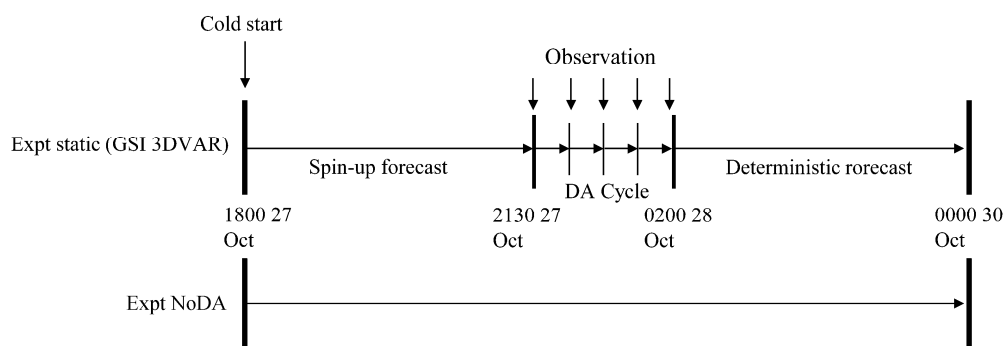


图3 试验流程

Fig. 3 Flow chart of the experiments

料同化分析完毕之后, 进行近 48 小时的自由预报。依旧以第七次任务的时间流程为例: **Static** 试验将在 10 月 27 日 18 时进行冷启动, 通过三个半小时的启动预报到 27 日 21 时 30 分, 然后将 21 时 30 分的预报场作为背景场进行三维变分同化。同化后, 将分析场预报到下一时刻 27 日 22 时 30 分, 然后重复同化+预报的步骤, 直至最后的分析时刻 28 日 02 时 00 分。全部资料同化完毕后, 将最终分析场进行近 48 小时的自由预报, 预报到 30 日 00 时。而 **NoDA** 试验则是从 27 日 18 时直接进行 54 小时的自由预报作为对照试验。具体流程可参见图 3。

3 预报结果分析

在此次飓风 Isaac 生命周期中, NOAA 一共进行了 9 次 TDR 资料的收集任务。因此, 本文共进行了 9 次同化试验。本节将对这 9 次同化预报试验的结果进行统计分析。首先, 对各次试验在飓风 Isaac 过程中做出的路径预报、海平面最低气压预报和地面 10 米最大风速预报进行统计与分析 [模式中热带气旋的中心位置以及海平面最低气压和地面 10 米最大风的计算与定位采用 DTC(Developmental Testbed Center) 提供的 GFDL 涡旋追踪程序求得]。

3.1 路径预报

图 4 为各试验对飓风 Isaac 在九次 TDR 任务期间的路径预报误差统计, 即预报的台风中心位置与实际观测到的台风中心位置之间的球面距离, 按照不同的预报时长进行的均方根误差统计 (RMSE)。每循环同化一次任务的 TDR 资料 (仅穿越臂资料) 之后就进行一次近 48 小时的自由预报。因此, 共有从 2012 年 8 月 23 日 00 时、23 日 12 时、24 日

00 时、24 日 12 时、27 日 00 时、27 日 12 时、28 日 00 时和 28 日 12 时为基准开始的 9 次近 48 小时预报, 自由预报结果每 6 小时输出一次。图中的预报误差以美国国家飓风中心 (National Hurricane Center, NHC) 发布的最佳路径资料作为实际热带气旋路径的参考, 红色 **Official** 为 HWRF 业务系统做出的业务预报, 蓝色为三维变分的 **Static** 试验, 绿色为 **NoDA** 试验。注意到图中起始的分析时刻标记的 02 时而不是 00 时, 是由于对 TDR 资料采用了循环同化的方式, 故每次同化任务的最终分析时刻通常在整 12 时和整 00 时之后的一个半小时到两个半小时 (与实际飞行任务的持续时间有关), 因而取 02 时作为标记。在实际计算中, 各次任务的起报时刻以最终分析时刻为准, 将对应任务中的 HWRF 业务预报 (3 小时一次) 和最佳路径资料 (6 小时一次) 插值到对应时刻。从图 4 中可以看到, 9 次 TDR 资料的同化试验统计表明, 与业务预报相比, 同化了 TDR 资料的 **Static** 试验在路径预报上有了明显的改进, 同化分析误差与进行了涡旋重定位 (Vortex Relocation) 的业务分析误差相仿 (相差小于 9 km, 不足一个格距), 唯有预报的最后时刻误差增大并超过了业务预报, 而整体预报误差则明显低于业务预报误差 (由于本文的试验中仅同化了 TDR 的内部资料, 并未对常规资料和卫星资料等可以改进环境场的资料进行同化试验, 因而随着预报时间的增长, 由于环境场与气旋之间的相互作用, 预报误差将会逐渐增大。而同化了环境场资料的业务预报在 36 小时之后路径预报误差逐渐减小。); 未同化任何资料的 **NoDA** 试验 (绿线) 与同化了 TDR 资料的 **Static** 试验相比, 在初始的气旋中心位置分析及前 36 小时预报中都表现出相对较差的预

报结果。36 小时之后的 NoDA 试验路径预报误差将逐渐小于 Static 试验, 与本文中发现的三维变分同化后分析场不够协调有一定联系(见第 4 节的结构分析部分)。

3.2 强度预报

对路径预报进行统计分析后, 现在对强度预报效果进行类似的统计分析。图 5 即为各试验在 9 次

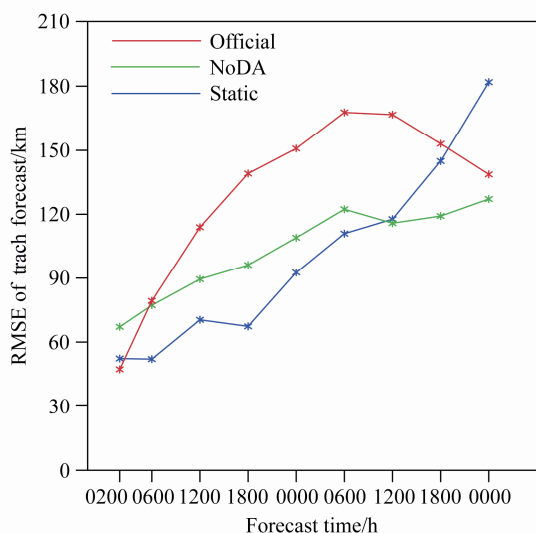


图 4 飓风 Isaac 在 TDR 任务期间内, Static (蓝)、NoDA (绿) 和 HWRF 业务预报 (红) 的 RMSE 误差统计

Fig. 4 RMSE (Root-mean-square error) statistics for official forecast (red), the Static (blue) and NoDA (green) forecasts during the TDR missions for Hurricane Isaac

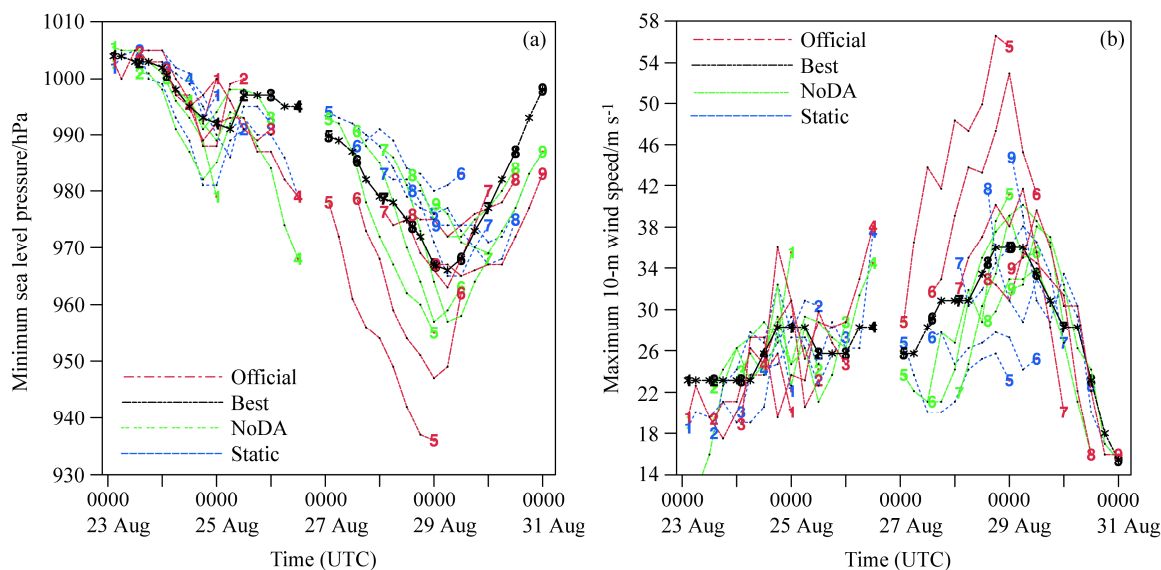


图 5 飓风 Isaac 在 TDR 任务期间内, Static (蓝) 和 NoDA (绿) 试验预报、HWRF 业务预报 (红) 以及最佳路径 (黑) 的 (a) 海平面最低气压预报和 (b) 地面 10 米最大风速预报

Fig. 5 (a) Minimum sea surface pressure and (b) maximum 10-m wind from the best track (black), official forecast (red), and the Static (blue) and NoDA (green) forecasts during the TDR missions for Hurricane Isaac

TDR 任务后的 48 小时强度预报, 分别为海平面最低气压 (图 5a) 和地面 10 米最大风速 (图 5b) 的预报 (蓝线为 Static 试验预报, 绿线为 NoDA 试验预报, 红线为 HWRF 业务预报而黑线为 NHC 提供的最佳路径资料作为实际气旋强度变化的参考)。从图中可以看出, 红色的业务预报在强度上, 尤其是在第二阶段开始的第五和第六次任务期间 (27 日 00 时和 27 日 12 时) 对 Isaac 的强度预报有明显过强偏差; NoDA 预报在第四次 (24 日 12 时) 和第五次 (27 日 00 时) 任务期间的气压预报也有较为明显的偏强趋势; 而同化了 TDR 资料的 Static 试验除了在第二阶段的第 5、6 次任务时后期的风场强度预报偏弱外, 其强度预报的效果总体上最贴近于实际的观测强度变化。这些偏弱强度的预报与业务预报出现最大预报误差的时次相同, 但他们的预报误差增长速度明显要低于业务预报。这表明采用三维变分同化 TDR 资料确实能够得到更合理的气旋结构, 因此拥有相对更合理的最大风速与最低气压关系并拥有整体上更优的强度预报效果, 不过由于 Static 试验本身依然存在着如第 4 节中发现的自身风压场不够协调等问题, 因此其强度预报并不能完全跟随实际气旋的强度变化, 还有待进一步的改进提高。

为了进一步分析强度预报的误差, 对各组试验预报的海平面最低气压减去实际海平面最低气压

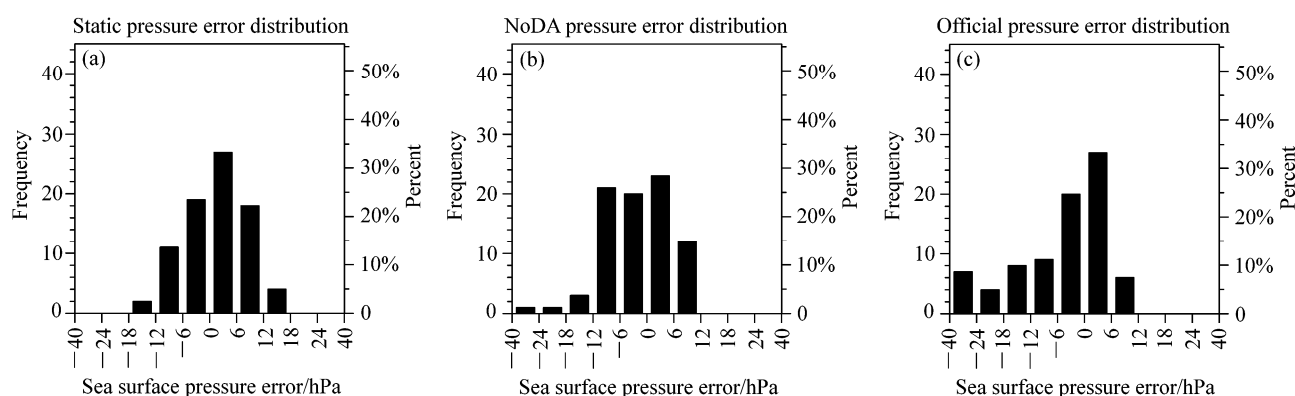


图 6 飓风 Isaac 在 TDR 任务期间内, 各组预报的海平面最低气压预报与最佳路径的海平面最低气压值之间的误差分布统计 (预报减实际, 纵坐标左为在该区间内出现的频数, 右为出现次数占总预报的百分比, 横坐标为分布区间): (a) Static; (b) NoDA; (c) HWRf official

Fig. 6 Error distribution statistics (forecast minus observation) of the minimum sea surface pressure during the TDR missions for Hurricane Isaac (the left-hand y axis means the frequency appearing in the range, the right-hand y axis means the percentage in total, and the x axis means the distribution region): (a) Static forecast; (b) NoDA forecast; (c) HWRf official forecast

的误差分布进行统计 (图 6), 图中横坐标为误差的分布区间, 纵坐标的左侧为预报误差在对应区间内出现的频率, 右侧为出现频率所占的百分比。可以看到, 与其他试验的气压强度预报相比, Static (图 6a) 试验的气压强度预报分布的峰值分布于 0~6 hPa 之间, 其误差分布比较理想 (集中于-6~6 hPa 之间, 然后随误差增大而分布降低); NoDA (图 6b) 试验和 HWRf 的业务预报 (图 6c) 则有偏强的趋势, 且分布更为分散、不规则, 这可能与未同化气旋内部 TDR 资料的情况下, 对于气旋内部的初始强度估计偏强 (参考图 5a) 有关, 因而它们所表现出来的海平面最低气压强度预报在负值区域 (预报强度大于实际强度) 的分布明显多于 Static 方案。

4 同化结果及分析

首先对同化过程中的风场和气压场变化进行分析, 以第七次任务的同化效果比较为例。从第一次同化 TDR 资料穿越臂前的背景场 (图 7a) 与同化后的分析场 (图 7b) 在 700 hPa 水平风速场 (阴影) 与位势高度场 (等值线) 的比较中可以看到, 同化第一条 TDR 穿越臂的雷达径向风资料之后, Static 试验将风速的环流中心向南进行了调整, 并且对于风场的强度和结构进行了增强与调整。但是, 三维变分同化在东北部分暂无资料的区域有过强的增量, 而西南部分则过于偏弱, 虽然气旋的最大风速得到了显著的增强 (预报的背景场风速偏

弱), 但是其气压场却几乎没有变化, 同化后的风压场中心位置有不一致性存在。这可能与业务的三维变分同化系统在同化非常密集的 TDR 资料时所采用的静态的背景误差协方差无法很好的协调不同物理量之间的关系有关。且 Static 方案同化后的风场虽然在 TDR 资料存在的中心区域有较为合理的调整, 但在 TDR 资料集中区之外的区域有不协调的风场特征存在, 如气旋中心西南约 50 km 左右处较大范围的静风区。

图 8 为同化第一条穿越臂资料 (27 日 21 时 00 分至 21 时 53 分, 同化于 27 日 21 时 30 分) 前后的风场结构独立验证。在 NOAA P-3 飞机上, 除了尾部搭载的多普勒雷达之外, 还有一些其他的仪器对风场进行独立的测量: 图 8a 中的黑色实线为步频微波辐射计 (Stepped Frequency Microwave Radiometer, SFMR) 探测到的地面风速, 图 8b 中的黑色实线为机载的 GPS (Global Positioning System) 回声系统等仪器测量后计算出的飞行高度的风速资料, 通过这些独立测量的数据与同化前后数据的比较, 我们可以对同化的效果有比较客观的了解 [图中的纵坐标为风速 (m s^{-1}); 横坐标为从此穿越臂的开始时刻到最后时刻飞机所经过的飞行距离; 绿色实线为同化前的背景场中, 沿飞机飞行轨迹上的风速情况; 红色实线则为同化之后的风速情况]。从图中可以看到, 与同化前相比, 同化了 TDR 资料之后的分析场确实能有效的将气旋中心 (风速最低值区域) 订正到正确的位置。但同样也注意到同化后分析场中

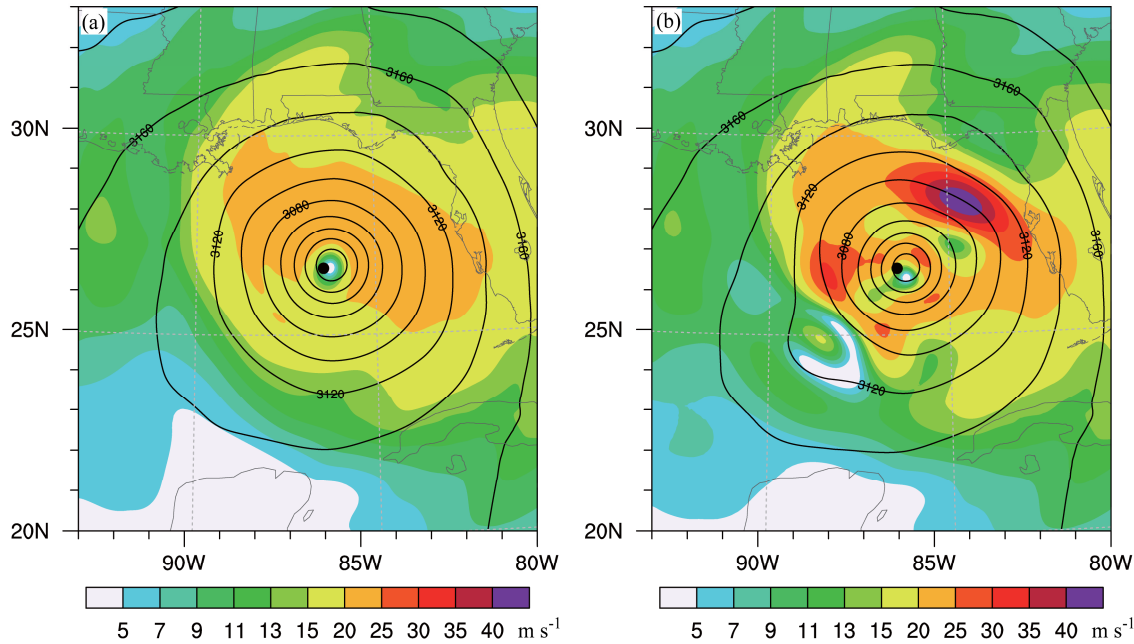


图7 飓风 Isaac 第七次任务第一条穿越臂同化前、后的 700 hPa 水平风场(阴影, m s^{-1})与 700 hPa 位势高度场(等值线, gpm): (a) 同化前; (b) 同化后

Fig. 7 700-hPa horizontal wind field (shading, m s^{-1}) and geopotential height field (contours, gpm) before and after the assimilation of the first penetrating leg during the seventh mission for Hurricane Isaac: (a) Before assimilation; (b) after assimilation

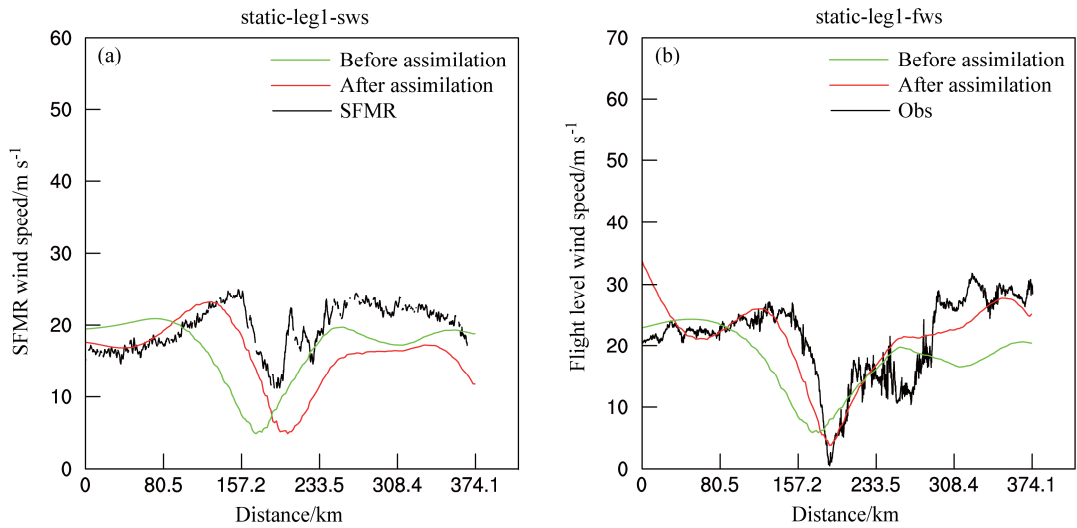


图8 飓风 Isaac 第七次任务第一条穿越臂同化前(绿)、后(红)的独立风场检验: (a) SFMR (Stepped Frequency Microwave Radiometer) 的地面风速检验; (b) 飞行高度的风速检验。横坐标为从此穿越臂的开始时刻到最后时刻飞机所经过的飞行距离(km), 纵坐标为风速(m s^{-1})

Fig. 8 Independent wind verification before (green) and after (red) the assimilation of the first penetrating leg during the seventh mission: (a) SFMR (Stepped Frequency Microwave Radiometer) surface wind; (b) flight level wind. x axis means the distance passed by the flight from the beginning to the end of this penetrating leg (km), and y axis means the wind speed (m s^{-1})

不协调性的存在: 在地面风速的验证中(图 8a), 分析场在飞行距离 200 km 之后的风场整体偏弱(对应图 7b 中气旋中心西南侧西南走向的风速小值区域), 其飞行高度风场的验证中则体现为 0~50 km 处偏强

(对应图 7b 中气旋中心东北侧的风速极大区域)。这再次表明 Static 试验的业务三维变分同化设置在同化 TDR 资料过程当中, 虽然能对气旋中心区域的强度和位置进行有效的订正, 但是其分析的风场还

具有一定的不协调性。这可能是由于直接采用业务运行的静态误差协方差, 而未对其进行如局地化尺度等针对性的调整, 因而导致了不协调性的存在。

图 9 为最后一条穿越臂 (28 日 01 时 45 分至 28 日 02 时 38 分, 同化于 28 日 02 时 00 分) 也就是最终分析场同化前后的 SFMR 和飞行高度的风场检验。在 Static 试验外, 还有作为对照试验的 NoDA 试验在对应分析时刻 (28 日 02 时 00 分), 同一位置区域的试验结果 (图 9c-d)。与图 8 相同, 图 9 a、c 和 b、d 分别对应 SFMR 的地面风速和飞行高度的风速检验。将同化前的预报场 (绿色) 与未同化任何 TDR 资料的 NoDA 试验在对应时刻的预报场 (图

9c-d) 相比较, 同化了 TDR 资料的试验预报场能更准确的描述出气旋中心的位置和强度, 这表明同化后的 Static 试验分析场在模式的预报中具有较好的稳定性。从同化后的分析场 (红色) 来看, 与第一次同化的结论相似: 在有资料的气旋中心位置, 对于气旋位置和气旋强度的描述比同化前有进一步的改进, 但是对于在远离中心的位置, 与图 7 中所描述的现象一致的不协调依然存在, 这表明原有的业务 Static 方案在高密度的 TDR 雷达径向风资料同化应用上确实还有待进一步的改进。

第七次 TDR 任务的最终分析场更为详细的结构分析如图 10, 此图为 3 km 高度水平风场结构的

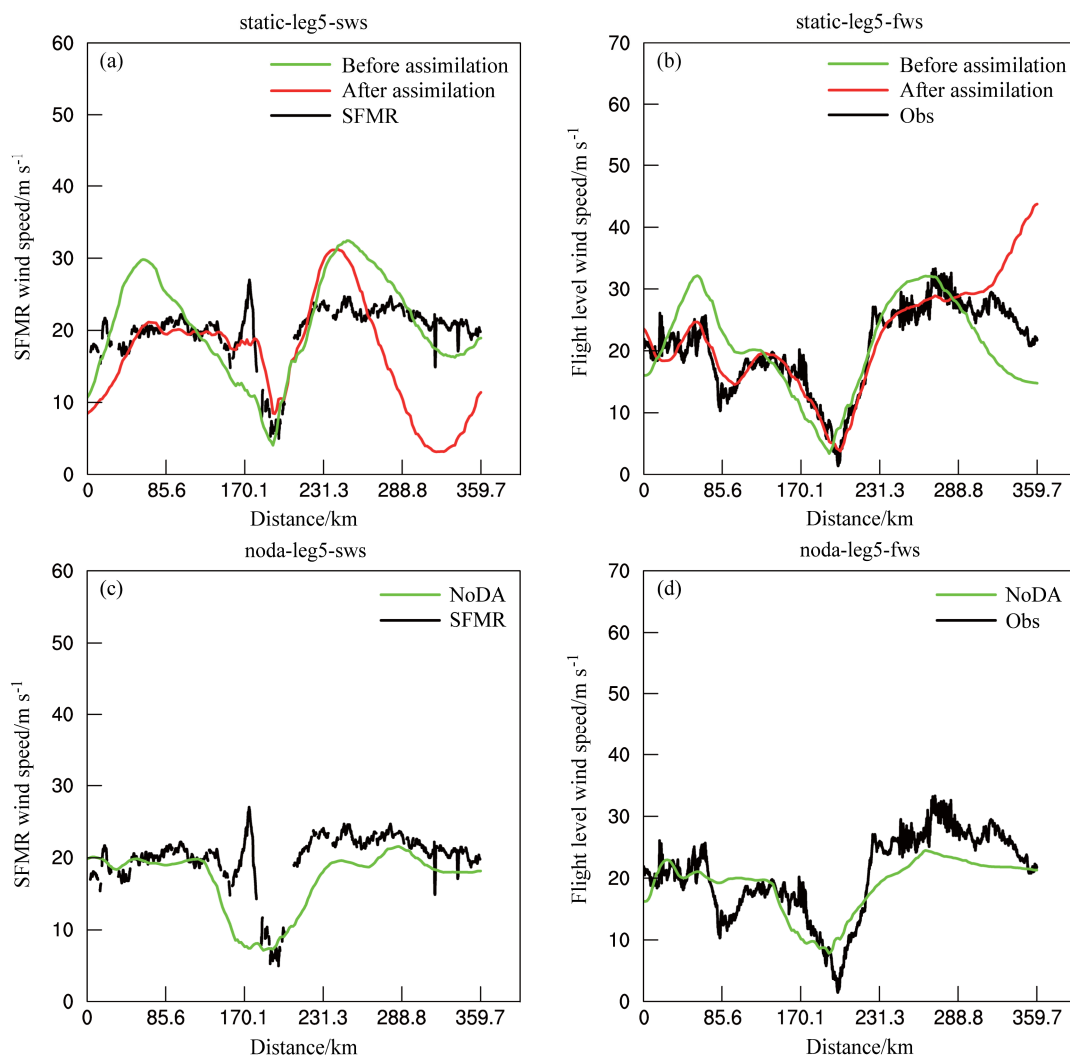


图 9 飓风 Isaac 第七次任务最后一条穿越臂同化前 (绿)、后 (红) 的独立风场检验: (a、c) SFMR 的地面风速检验; (b、d) 飞行高度的风速检验。(a、b) Static; (c、d) NoDA。横坐标为从此穿越臂的开始时刻到最后时刻飞机所经过的飞行距离 (km), 纵坐标为风速 (m s^{-1})

Fig. 9 Independent wind verification before (green) and after (red) the assimilation of the last penetrating leg during the seventh mission: (a, c) SFMR; (b, d) flight level. (a, b) Static; (c, d) NoDA forecasts. x axis means the distance passed by the flight from the beginning to the end of this penetrating leg (km), and y axis means the wind speed (m s^{-1}).

检验 (NOAA P-3 飞机的飞行高度通常亦为 3 km, 故也近似于飞机飞行高度风场结构的检验)。由图 10a (HRD 提供的合成参考图) 可知, 在 3 km 的高度上, 热带气旋呈现出非对称状态, 气旋中心的西到西南侧为弱风区, 而东侧则为大风区, 大风区之外的资料稀疏区域还有弱风区存在。与未同化任何资料的 NoDA 试验 (图 10c) 相比, 同化了 TDR 资料的 Static 试验 (图 10b) 在气旋的中心区域, 静风区更贴近于实际观察, 明显比 NoDA 预报的静风区小, 且在资料不全的大风区东侧弱风区也有较好的描述, 在 HRD 雷达合成图能够描绘的区域, TDR 资料的同化使 Static 试验的结果明显更贴近于观

测; 而 NoDA 试验的风场结构则基本处于对称特征, 且其气旋中心位置与实际观测 (图中黑色圆点) 相比较为偏南, 其整体的大风区强度偏弱, 中心静风区的范围偏大, 从而表现出来的热带气旋强度整体偏弱。

图 11 为同一时刻沿经向剖面上的水平风速垂直结构分析。从 HRD 的合成参考图 (图 11a) 中可以看到, 在这个阶段, 飓风 Isaac 在经向剖面的水平风速垂直结构上表现出静风区上大下小的倒锥形结构特征, 在气旋中心的北侧约 115 km 处 6~8 km 高度上有一个强风速中心, 南侧 112 km 处 4 km 高度上同样有一个较小的强风区。Static (图 11b)

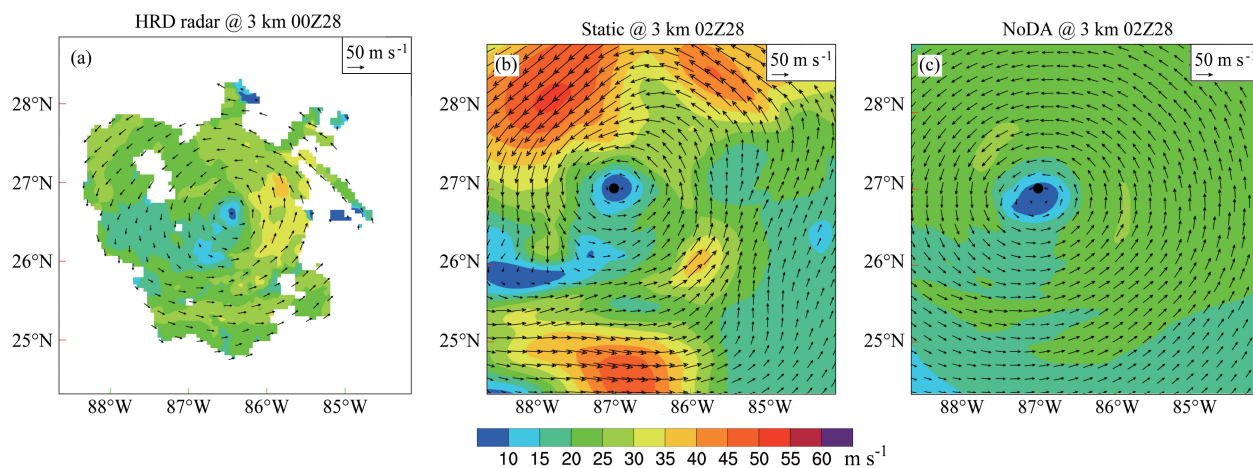


图 10 飓风 Isaac 第七次任务最终分析场的 3 km 高度水平风场分析: (a)HRD (Hurricane Research Division) 雷达合成; (b) Static; (c) NoDA

Fig. 10 The 3-km horizontal wind field of the final analysis during the seventh mission: (a) HRD (Hurricane Research Division) radar composite; (b) Static; (c) NoDA

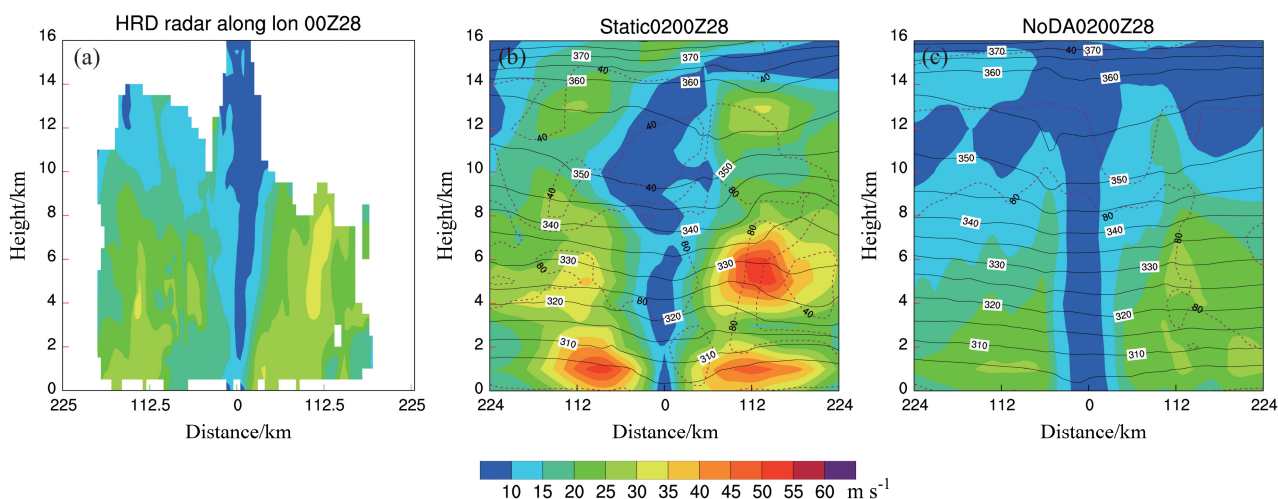


图 11 飓风 Isaac 第七次任务最终分析场的经向垂直剖面风场结构分析: (a) HRD 雷达合成; (b) Static; (c) NoDA. 图中阴影部分为合成的水平风速 (m/s); 黑色等值线为等相当位温线 (K); 红色等值虚线为相对湿度 (%). 图中横坐标为该点距离气旋中心的水平距离 (km)

Fig. 11 The meridional cross section wind field of the final analysis during the seventh mission: (a) HRD radar composite; (b) Static; (c) NoDA. The shading shows the horizontal wind speed (m/s), while the black contours are the potential temperature (K) and the red dashed contours are the relative humidity (%). x axis means the horizontal distance to the storm center from this point (km)

试验虽然在强风区域的风速过于偏强,但能够在对应的高度出现对应的强风中心,并且气旋整体能呈现出上大下小的倒锥形;而作为控制试验的 NoDA (图 11c)则表现出更大范围的静风区和上下均匀的稳定的垂直结构。

从以上的结构分析可知,业务 GSI 三维变分系统同化 TDR 资料之后,其气旋中心的位置和强度都能得到有效的改善,不过直接采用业务三维变分设置同化 TDR 资料仍然存在许多的问题:对于资料比较集中的气旋中心部分,其位置、强度和结构都能得到有效的改善,但是对于远离中心的资料缺失部分,则受到静态误差协方差难以表征实际的、高精度的背景场特征的影响,其同化后的风压场存在着较大的不协调性。对于非业务使用的三维同化研究而言,水平局地化尺度进行针对性的调整也许能更好的解决这个问题,但对于业务预报而言,也许采用具有流依赖特征的背景误差协方差方案更能有效的利用 TDR 资料。

5 总结与讨论

高时空分辨率的机载多普勒雷达资料在热带气旋预报改进中的作用日渐受重视,同时三维变分资料同化由于其较低的计算消耗等优势仍旧被许多业务机构所采纳。因此,本文采用基于 GSI 的业务三维变分资料同化系统及业务设置,通过同化 TDR 资料,利用业务 HWRf 区域模式对 2012 年飓风等级的热带气旋 Isaac 进行了同化,并设计展开了两组预报试验,分别为仅同化 TDR 资料的 Static 试验和不同化任何资料的 NoDA 试验,通过对各组试验结果的分析,探究 TDR 资料在现有的业务三维变分系统中应用的有效性。试验结果分析总结如下:

(1)在 HWRf 区域模式中,与未同化任何 TDR 资料的控制试验相比,通过三维变分同化 TDR 资料对于热带气旋中心强度和位置的分析有很好的改进作用。

(2)与 HWRf 业务预报相比,同化了 TDR 资料的 Static 试验对热带气旋的强度和路径预报都有明显的改进和提升。

(3)在仅同化 TDR 资料的 Static 试验中,采用业务静态背景误差协方差的三维变分同化 TDR 资料之后的分析场中心位置和强度比未同化任何 TDR 资料的 NoDA 试验有明显改进,但是其同化后的风压场存在着不协调等问题,还需要进一步的调

试和改进。

本文中采用业务三维变分对于高密度的 TDR 资料同化试验结果表明,目前的业务三维变分同化系统对 TDR 资料的应用依然存在不足,还需要进行一系列的后续研究工作。例如,通过引入混合资料同化来改进背景误差协方差 (Wang et al., 2013; Wang and Lei, 2014);通过调整局地化尺度来对 TDR 资料的应用进行深入的调试试验;通过同化其他的常规观测和卫星观测资料等来改善仅同化 TDR 核心资料所造成的不协调性;本文采用的 9 km 分辨率网格难以细致描述热带气旋结构,需要进一步进行分辨率更高的嵌套网格试验等。总而言之,本文的研究结果仅仅是对现有业务系统下 TDR 资料应用的一个测试研究,后续工作还需要更深入的继续探索和研究。

参考文献 (References)

- Aberson S D, Black M L, Black R A, et al. 2006. Thirty years of tropical cyclone research with the NOAA P-3 aircraft [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87 (8): 1039–1055.
- Aksoy A. 2013. Storm-relative observations in tropical cyclone data assimilation with an ensemble Kalman filter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141 (2): 506–522.
- Aksoy A, Lorsolo S, Vukicevic T, et al. 2012. The HWRf Hurricane Ensemble Data Assimilation System (HEDAS) for high-resolution data: The impact of airborne Doppler radar observations in an OSSE [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (6): 1843–1862.
- Aksoy A, Aberson S D, Vukicevic T, et al. 2013. Assimilation of high-resolution tropical cyclone observations with an ensemble Kalman filter using NOAA/AOML/HRD's HEDAS: Evaluation of the 2008–11 vortex-scale analysis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141 (6): 1842–1865.
- 蔡则怡, 徐良炎, 徐元太. 1994. 我国热带气旋灾害的分析研究 [J]. *大气科学*, 18 (S1): 826–836. Cai Zeyi, Xu Liangyan, Xu Yuantai. 1994. A study on the tropical cyclone disasters in China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmos. Sinica) (in Chinese)*, 18 (S1): 826–836.
- 陈联寿, 孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. *大气科学*, 25 (3): 420–432. Chen Lianshou, Meng Zhiyong. 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 25 (3): 420–432.
- Du N Z, Xue M, Zhao K, et al. 2012. Impact of assimilating airborne Doppler radar velocity data using the ARPS 3DVAR on the analysis and prediction of Hurricane Ike (2008) [J]. *J. Geophys. Res.*, 117: D18113.
- Elsberry R L, Lambert T D B, Boothe M A. 2007. Accuracy of Atlantic and eastern North Pacific tropical cyclone intensity forecast guidance [J]. *Wea. Forecasting*, 22 (4): 747–762.
- Franklin J L, Lord S J, Feuer S E, et al. 1993. The kinematic structure of Hurricane Gloria (1985) determined from nested analyses of dropwindsonde and Doppler radar data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121 (9):

- 2433–2451.
- Houze R A, Chen S S, Smull B F, et al. 2007. Hurricane intensity and eyewall replacement [J]. *Science*, 315 (5816): 1235–1238.
- Kaplan J, DeMaria M, Knaff J A. 2010. A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and eastern North Pacific basins [J]. *Wea. Forecasting*, 25 (1): 220–241.
- Li Y Z, Wang X G, Xue M. 2012. Assimilation of radar radial velocity data with the WRF hybrid ensemble–3DVAR system for the prediction of Hurricane Ike (2008) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (11): 3507–3524.
- 马旭林, 薛纪善, 陆维松. 2008. GRAPES 全球集合预报的集合卡尔曼变换初始扰动方案初步研究 [J]. *气象学报*, 66 (4): 526–536. Ma Xulin, Xue Jishan, Lu Weisong. 2008. Preliminary study on ensemble transform Kalman filter-based initial perturbation scheme in GRAPES global ensemble prediction [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 66 (4): 526–536.
- 马旭林, 庄照荣, 薛纪善, 等. 2009. GRAPES 非静力数值预报模式的三维变分资料同化系统的发展 [J]. *气象学报*, 67 (1): 50–60. Ma Xulin, Zhuang Zhaorong, Xue Jishan, et al. 2009. Development of 3-D variational data assimilation system for the nonhydrostatic numerical weather prediction model—GRAPES [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 67 (1): 50–60.
- Marks F D Jr, Houze R A Jr. 1984. Airborne Doppler radar observations in Hurricane Debby [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 65 (6): 569–582.
- Marks F D Jr, Houze R A Jr. 1987. Inner core structure of Hurricane Alicia from airborne radar observation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44 (9): 1296–1317.
- Pielke R A Jr, Gratz J, Landsea C W, et al. 2008. Normalized hurricane damage in the United States: 1900–2005 [J]. *Nat. Hazards Rev.*, 9 (1): 29–42.
- Reasor P D, Montgomery M T, Marks F D Jr, et al. 2000. Low-wavenumber structure and evolution of the hurricane inner core observed by airborne dual-Doppler radar [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128 (6): 1653–1680.
- Rogers R, Lorsolo S, Reaso P, et al. 2012. Multiscale analysis of tropical cyclone kinematic structure from airborne Doppler radar composites [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (1): 77–99.
- 宋金杰, 王元, 陈佩燕, 等. 2011. 基于偏最小二乘回归理论的西北太平洋热带气旋强度统计预报方法 [J]. *气象学报*, 69 (5): 745–756. Song Jinjie, Wang Yuan, Chen Peiyan, et al. 2011. A statistical prediction scheme of tropical cyclone intensity over the western North Pacific based on the partial least square regression [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 69 (5): 745–756.
- 王斌, Russell L E, 王玉清, 等. 1998. 热带气旋运动的动力学研究进展 [J]. *大气科学*, 22 (4): 535–547. Wang Bin, Russell L E, Wang Yuqing, et al. 1998. Dynamics in tropical cyclone motion: A review [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmos. Sinica)* (in Chinese), 22 (4): 535–547.
- Wang X G, 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.
- Wang X G, Lei T. 2014. GSI-based four dimensional ensemble-variational (4DensVar) data assimilation: Formulation and single resolution experiments with real data for NCEP Global Forecast System [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142 (9): 3303–3325.
- Weng Y H, Zhang F Q. 2012. Assimilating airborne Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter for convection-permitting hurricane initialization and prediction: Katrina (2005) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (3): 841–859.
- Whitaker J S, Hamill T M, Wei X, et al. 2008. Ensemble Data Assimilation with the NCEP Global Forecast System [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (2): 463–482.
- Xiao Q N, Zhang X Y, Davis C, et al. 2009. Experiments of hurricane initialization with airborne Doppler radar data for the advanced research hurricane WRF (AHW) model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (9): 2758–2777.
- 薛纪善, 庄世宇, 朱国富, 等. 2008. GRAPES 新一代全球/区域变分同化系统研究 [J]. *科学通报*, 53 (20): 2408–2417. Xue Jishan, Zhuang Shiyu, Zhu Guofu, et al. 2008. Study on a new-generation global/regional variational assimilation system of GRAPES [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 53 (20): 2408–2417.