

李昕, 王元, 明杰, 等. 2016. 雷达径向风和反演风联合同化在台风灿都(2010)数值预报中的研究. 气象, 42(6): 649-663.

雷达径向风和反演风联合同化在台风 灿都(2010)数值预报中的研究^{* 1}

李 昕^{1,2} 王 元² 明 杰² 梅海霞¹ 王文兰¹ 周嘉陵¹

1 江苏省气象科学研究所, 南京 210009

2 南京大学大气科学学院中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京 210093

提 要: 基于 WRF 模式及其 Hybrid 集合-变分同化系统, 比较研究了雷达径向速度(V_r)同化和 T-TREC(Typhoon-Tracking radar echoes by correlation)反演风同化对台风灿都(2010)分析和预报的影响。为了探索最适合登陆台风预报的雷达资料同化策略, 在研究 V_r 循环同化和 T-TREC 循环同化的基础上, 考虑到两种雷达风场资料各自的优势, 提出了合理利用两种雷达风场资料的联合同化策略, 即在循环同化的首次分析中同化 T-TREC 风, 而在之后的分析中同化 V_r 资料。研究三种不同的雷达资料同化策略发现, V_r 直接同化虽能改善台风分析和预报, 但其依赖于较多的同化次数, 这会导致确定性预报的启动时间较晚, 不利于台风业务预报。相比之下, 由于 T-TREC 资料观测范围远、风场结构完整, T-TREC 循环同化策略只经过较少次数的同化分析即能显著改善台风强度预报; 然而受 T-TREC 资料自身反演误差的影响, 增加同化次数反而不利于提高预报效果。当联合利用这两种雷达风场时, 联合同化策略在不同同化时间窗下的预报表现均最优。

关键词: 台风, Hybrid 集合-变分同化, 径向速度同化, T-TREC 反演风同化, 雷达风场联合同化

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.06.001

A Combined Radar Data Assimilation Strategy of Radial Velocity and Retrieved Wind and Its Impact on the Forecasting of Tropical Cyclone Chanthu (2010)

LI Xin^{1,2} WANG Yuan² MING Jie² MEI Haixia¹ WANG Wenlan¹ ZHOU Jialing¹

1 Jiangsu Research Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009

2 Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather/MOE and School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract: Based on WRF model and the Hybrid ensemble-3Dvar data assimilation system, this study compares radar radial velocity (V_r) assimilation with T-TREC (Typhoon-Tracking radar echoes by correlation) retrieved wind data assimilation and their impacts on the analyses and forecasts of tropical cyclone (TC) "Chanthu (2010)". In addition to the cycling strategy of V_r assimilation and T-TREC wind data assimilation, a combined radar data assimilation strategy is proposed, which assimilates T-TREC winds at the first cycle and assimilates V_r data during the rest cycles. Concerning the respective advantages of two types of radar wind, the new cycling strategy aims at exploring the suitable radar data assimilation strategy for the forecasting of landfalling TCs. Comparing three different cycling strategies, the cycled assimilation of V_r data requires more analysis cycles, which leads to delayed starting time for the deterministic forecast.

* “十二五”国家科技支撑计划(2014BAG01B01)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB452801)、江苏省青年气象科研基金(Q201514、Q201407)、山东省气象科学研究所开放研究基金项目(SDQXKF2015M10)、江苏省科技支撑计划项目(BE2013730)、江苏省气象科研基金项目(KZ201502、KZ201202)共同资助

2015 年 12 月 4 日收稿; 2016 年 4 月 7 日收修定稿

第一作者: 李昕, 主要从事资料同化和数值预报研究. Email: kimi_spa@126.com

通信作者: 王元, 主要从事中尺度灾害性天气分析、中尺度数值模式、变分资料同化理论和动力学研究. Email: yuanasm@nju.edu.cn

By contrast, the assimilation of T-TREC data produces better analyses and intensity forecasts than the assimilation of V_r data during the earlier assimilation, due to the larger data coverage and more complete wind fields for TC circulation. However, as the T-TREC winds contain retrieved errors, the increase of analysis cycles leads to degraded TC forecast. When the two types of radar wind data are jointly used, the combined radar data assimilation strategy provides favorable forecast results no matter how long the analysis cycles are.

Key words: typhoon, Hybrid ensemble-3Dvar, radial velocity data assimilation, T-TREC wind data assimilation, combined radar data assimilation

引 言

对登陆台风进行准确的路径、强度和降水预报关乎生命和财产安全。除了提高数值模式的预报水平外,改善初始场也是提高台风预报能力的关键因素,而这依赖于观测资料同化(朱国富,2015)。目前已有许多研究从多源观测资料同化(苏捷等,2013;郝民等,2014;张晶等,2014)的角度来改进台风预报(王云峰等,2003;庄照荣等,2004;梁旭东等,2010)。Xiao等(2000)提出了人造涡旋同化方法(BDA),通过改善初始涡旋结构提高台风预报能力。丁伟钰等(2010)、刘瑞等(2012)、Zou等(2013)和刘君等(2013)研究了卫星资料同化对台风路径和强度预报的影响。

在所有观测手段中,多普勒雷达是唯一能够观测到台风三维结构且具有高时空分辨率的观测平台,被广泛应用于中小尺度天气模拟(李媛等,2011;秦琰琰等,2012)。国内外研究表明雷达径向速度(V_r)直接同化能够显著改善台风分析和预报能力(Xiao et al, 2005; Zhang et al, 2009; 顾建峰, 2006; 施丽娟等, 2009; 李新峰等, 2013; 陆续等, 2015)。然而,由于 V_r 资料只能观测到雷达径向方向的风场,直接同化很难精确地分析垂直于雷达波束的风场分量(Zhao et al, 2012; Li et al, 2013)。在传统的直接同化之外,一些研究关注了雷达反演风同化对台风预报的影响(万齐林等, 2005; 陈峰等, 2012; Li et al, 2013; Wang et al, 2014)。Li等(2013)针对登陆台风莫兰蒂(2010),利用WRF(Weather Research and Forecasting)模式和3Dvar(three dimensional variational)进行了雷达T-TREC(Typhoon-Tracking radar echoes by correlation)反演风(王明筠等, 2010)和 V_r 资料的单次同化对比研究。由于T-TREC风场基于反射率反演,其最大观测范围达到460 km,当台风离海岸较远时,T-TREC反演风同

化能得到较为完整的涡旋分析场,相比传统的 V_r 直接同化能够更显著地改善台风路径、强度和降水预报。这些研究结果意味着,在传统的 V_r 观测之外,雷达反演风对于台风业务预报也具有重要的应用意义。

由于雷达资料具备着高时空分辨率的优势,无论是T-TREC反演风还是 V_r 观测,都可以通过循环同化的方式被数值模式利用。近年来,国内外已有许多关于雷达资料循环同化的研究。Zhao等(2012)在对台风莫兰蒂(2010)的3Dvar(三维变分)同化研究中发现,提高 V_r 循环同化的分析频数、增加分析次数都有利于对预报结果的改善;Zhang等(2009)在对飓风Humberto(2007)的EnKF(集合卡尔曼滤波)同化试验中指出,9 h以上的 V_r 循环同化对于风暴分析场和确定性预报的改善十分必要,并且随着同化循环的增多,路径和强度的确定性预报误差逐渐减少。这些研究都表明,循环同化对提高台风预报能力起重要作用。然而,在实际的业务预报中,从节省计算资源和提前预警时间的角度考虑,往往希望同化分析次数尽可能少,预报启动时间尽可能早。因此,有必要利用 V_r 和T-TREC反演风这两种雷达资料来研究最优的循环同化策略。考虑到单次的T-TREC同化能够快速建立和改善涡旋尺度的台风环流结构(Li et al, 2013),而随着台风靠近登陆,沿海多部雷达的 V_r 观测又能够提供更准确的风场信息,本文尝试将两种雷达风场资料进行联合同化,即在首次分析中同化雷达T-TREC反演风,而在之后的分析循环中同化雷达 V_r 资料。

在以往的台风同化研究中,Wang(2011),闵锦忠等(2015)和沈菲菲等(2015)都指出,由于Hybrid集合-变分同化方法将流依赖背景误差协方差矩阵引入变分同化框架(Hamill et al, 2000; Lorence, 2003),同化分析增量能够体现与台风相关的流依赖特征,使得分析场更合理,有助于台风路径和强度预报;此外,基于变分同化框架,动力约束和流依赖背

景误差协方差可以在 Hybrid 同化方法中同时实现,有助于对台风初始场进行更有效的调整。Li 等(2015)将准梯度风平衡方程以弱约束的形式加入到 WRF Hybrid 同化系统中以进行台风同化研究,动力约束使得台风分析场在动力和热力上更加平衡,改善了台风强度预报。基于 Hybrid 同化方法在台风数值研究方面的这些优势,本文将 2010 年登陆我国广东省的台风灿都为例,利用 Hybrid 同化方法研究 V_r 循环同化策略、T-TREC 循环同化策略以及雷达风场联合同化策略的预报表现。

1 资料方法与试验设计

1.1 Hybrid 集合-变分同化方法

Wang 等(2008a;2008b)基于变分同化框架,发展了 Hybrid 集合-变分同化方案,通过求解代价函数极值得到最优分析场。代价函数定义为:

$$\begin{aligned} J &= J_a + \beta_1 J_b + \beta_2 J_c \\ &= \frac{1}{2}(\mathbf{d} - \mathbf{H}\mathbf{x}')^T \mathbf{O}^{-1}(\mathbf{d} - \mathbf{H}\mathbf{x}') + \\ &\quad \beta_1 \frac{1}{2}(\mathbf{x}_1')^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x}_1') + \beta_2 \frac{1}{2}(\mathbf{a})^T \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{a}) \quad (1) \end{aligned}$$

式中, J_a 代表观测惩罚项,观测增量由 $\mathbf{d} = \mathbf{y}_0 - \mathbf{H}(\mathbf{x}_b)$ 定义,其中 \mathbf{y}_0 是观测向量, \mathbf{x}_b 是背景向量, \mathbf{H} 是非线性观测算子 H 的切线性算子, \mathbf{x}' 表示分析增量; J_b 代表与静止背景误差协方差矩阵对应的背景场惩罚项;而 J_c 代表与集合误差协方差相对应的背景场惩罚项,集合误差协方差通过扩展的控制变量 \mathbf{a} 被引入到变分框架中。静止背景误差协方差和集合背景误差协方差的权重由可调参数 β_1 和 β_2 的大小决定。为了满足总的背景误差协方差守恒,

$$\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} = 1 \quad (2)$$

当 $1/\beta_1 = 1$ 时,背景误差协方差全部来自静止协方差部分;当 $1/\beta_2 = 1$ 时,背景误差协方差来自集合协方差部分。基于 Li 等(2012)对飓风 Ike(2008)的研究,由于静止背景误差协方差无法反映与台风相关的中尺度结构与对流结构,Hybrid 代价函数中保留静止协方差不能对台风分析和预报起到正面的改善作用。因此,本文采用 $1/\beta_1 = 0$ 、 $1/\beta_2 = 1$ 作为 Hybrid 同化的权重函数设置。

1.2 雷达 T-TREC 反演风简介

传统的 TREC(Tracking Radar Echo by Corre-

lation)方法是一类根据雷达回波移动来估算三维水平流场的风场反演方法,最早由 Rinehart 等(1978)提出并应用于反演风暴内部的流场。Tuttle 等(1999)首次将 TREC 方法引入台风领域,通过计算相邻时刻 Z 资料的相关系数来追踪水平移动,成功地反演了台风环流。在此基础上,王明筠等(2010)提出了 T-TREC(Typhoon-Tracking Radar Echo by Correlation)风场反演方法,将径向速度信息作为额外的反演条件,用来客观地确定建立相关系数矩阵时的搜索区域,较好地解决了台风眼墙回波相对均匀所引起的反演风速低估问题。T-TREC 风场反演算法同时利用了雷达反射率因子(Z)和径向速度(V_r)资料,以台风中心为原点建立水平方向半径为 300 km 的柱坐标网格,在该坐标系下进行 T-TREC 风场反演,最终的 T-TREC 反演风由台风中心坐标插值到笛卡尔坐标系,得到水平分辨率 10 km、垂直分辨率 1 km 的 CAPPI(constant Plan Position Indicator)产品,垂直分布从 1 km 高度到 8 km 高度。具体的 T-TREC 风场反演方法请参考王明筠等(2010)。

1.3 台风灿都(2010)以及雷达资料概述

台风灿都(2010)于 2010 年 7 月 19 日在我国南海海域生成成为热带低压;7 月 19 日 1200 UTC 加强为热带风暴并向西北方向移动;7 月 21 日 1800 UTC 加强为台风,其在 7 月 22 日 0600 UTC 于鼎盛时期登陆广东省吴川市。登陆时中心附近最大风力 12 级($36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),中心最低气压 970 hPa。登陆后风雨猛烈,给广东、广西等地带来强降水。

同化的雷达 V_r 资料来自海口(以下简称 HKRD)和阳江(以下简称 YJRD)两部多普勒雷达。如图 1 所示,在台风灿都登陆过程中, HKRD(19.9°N 、 110.2°E)位于其西侧, YJRD(21.8°N 、 111.9°E)位于其北侧,两部雷达保证了“灿都”的环流能够被很好地捕捉。雷达 V_r 资料在通过质量控制处理后,被插值到水平分辨率为 4 km 的笛卡尔坐标网格。而雷达 T-TREC 风场资料来自于 HKRD 雷达资料的反演,图 2 给出了 7 月 21 日 1800 UTC 的 T-TREC 反演风。为了检验其反演效果,将 T-TREC 反演风投影到 HKRD 径向方向(图 2a)与观测 V_r (图 2b)作对比。在 HKRD 的 V_r 资料覆盖范围内, T-TREC 风场投影的 V_r 与观测 V_r 呈现相似的结构,表明 T-TREC 反演质量较好。相比观测 V_r , T-TREC 风场提供更为完整的台风环流结构。

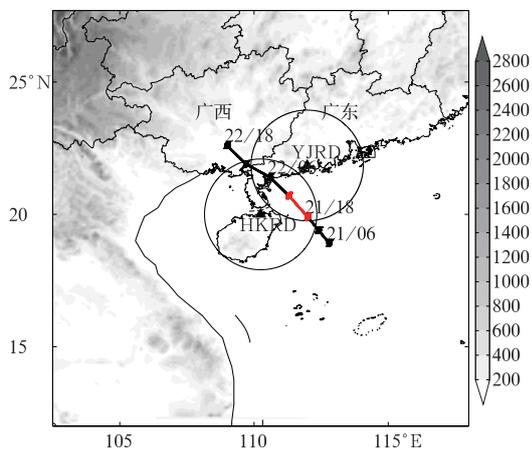


图 1 WRF 模拟区域以及台风灿都(2010)的 JTWC 最佳路径观测

(红线表示循环同化时间窗,圆圈代表 HKRD 和 YJRD 的多普勒观测范围。阴影表示地形高度)

Fig. 1 WRF domain and the best track for typhoon Chanthu (2010)

(Red line represents the assimilation window and the shaded area is the height of terrain)

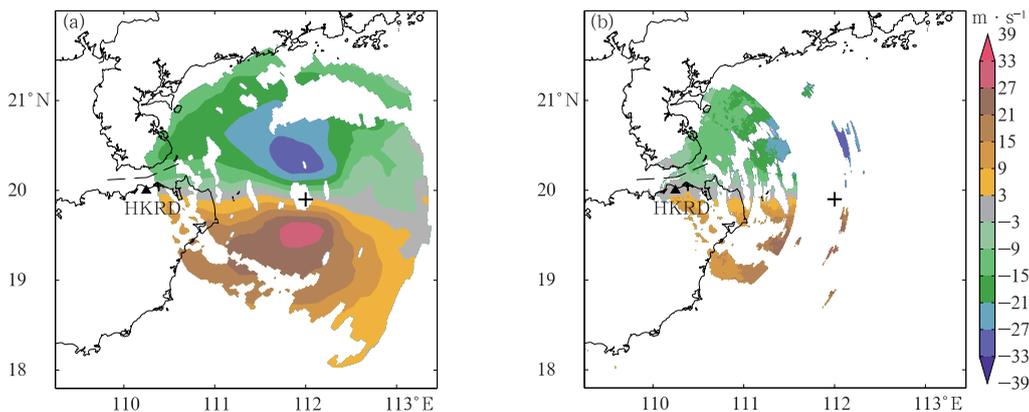


图 2 2010年7月21日1800 UTC时刻3 km高度(a) T-TREC反演风投影的径向速度分量, (b) HKRD观测径向速度

(‘+’表示台风中心位置)

Fig. 2 (a) T-TREC retrieved V_r and (b) the observed V_r from

HKRD at 3 km height at 1800 UTC 21 July 2010

(‘+’ stands for the observed center of typhoon)

测资料上加高斯型分布的随机扰动,产生 K 组独立的扰动观测; (4) 对每个集合成员进行同化,得到分析场集合作为下一个预报步的初始场集合。其中,首次分析循环的集合扰动来自 12 h 前的“初始扰动”集合预报,利用 WRFDA 系统中的 random-cv 程序在 12 h 前的 GFS 初始场中加入具备变量平衡的随机扰动,得到初始集合。此外,为了维持集合成员的离散度,在每一步同化后采用 Zhang 等(2004)提出的“松弛法”进行集合协方差“膨胀化”处理。

1.4 同化流程和试验设置

采用 WRF 模式 3.4.1, 网格的水平分辨率设为 4 km(图 1), 水平方向 463×463 个格点, 垂直方向 35 层, 模式顶设为 50 hPa。参数化方案(Skamarock et al, 2008)采用 Lin 微物理方案、Monin-Obukhov 近地层方案、Noah 陆面方案、YSU(Yonsei University)行星边界层方案、RRTM(Rapid Radiative Transfer Model)长波辐射方案和 Duahia 短波辐射方案。

本文采取的 Hybrid 循环同化流程(图 2)与 Li 等(2012)一致, 在分析步采用“扰动观测法”(Houtekamer et al, 1998)来更新每个集合成员。同化流程的每个分析循环都包含 4 个步骤: (1) 在预报步中产生 K 组($K=40$)集合预报, 作为下一个分析步中各成员的同化背景场; (2) 由集合预报计算出集合扰动, 为 Hybrid 方法提供集合协方差; (3) 在观

$\mathbf{x}_{\text{new}}' = (1-\alpha)\mathbf{x}_f' + \alpha'\mathbf{x}_a'$, 新的集合扰动 \mathbf{x}_{new}' 为同化前的集合扰动 \mathbf{x}_f' 和同化后的集合扰动 \mathbf{x}_a' 的加权平均, 松弛系数 α 设为 0.5。

设置了 3 组循环同化试验 ExpVr、ExpTrec 和 ExpTrecVr, 同化分析时段均为 21 日 1800 UTC 至 22 日 0000 UTC, 同化间隔为 1 h。ExpVr 试验同化 HKRD/YJRD 两部雷达的 V_r 资料, ExpTrec 试验同化 HKRD 雷达的 T-TREC 反演风资料, 而 ExpTrecVr 试验在首次分析中同化 T-TREC 反演风资

料,余下的循环中同化 V_r 资料。为了研究不同的起报时间对台风登陆预报的影响,每组同化试验各选择 21 日 2000、2200 UTC 和 22 日 0000 UTC 作为启动时间进行确定性预报,预报结束时间均为 22 日 1800 UTC,确定性预报包含了“灿都”登陆前后整个过程,试验流程如图 4 所示。为了便于与观测资料进行对比检验和分析,本文在同化和预报阶段,均采用集合平均场作为模式结果。

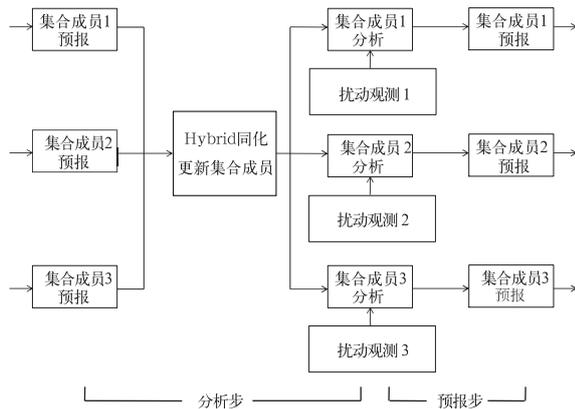


图 3 以 3 个集合成员为例的 Hybrid 循环同化流程图

Fig. 3 Schematic diagram of the hybrid forecast-analysis cycle for a hypothetical three-member ensemble

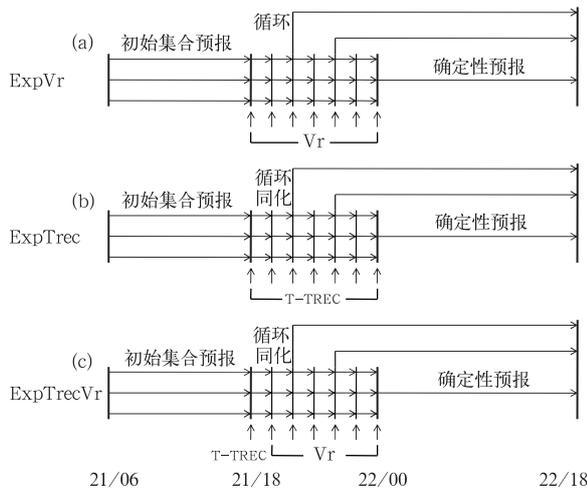


图 4 (a) ExpVr 试验, (b) ExpTrec 试验和 (c) ExpTrecVr 试验的流程示意图

Fig. 4 Flow charts for (a) ExpVr, (b) ExpTrec and (c) ExpTrecVr experiments

与以往研究(Zhao et al, 2009; Li et al, 2013)类似, V_r 资料的观测误差设为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对于 T-

TREC 反演风的观测误差设置,图 5 给出了同化阶段 T-TREC 风场与 HKRD 径向速度观测的均方根偏差(RMSD),大约 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。考虑到 V_r 资料自身含有误差,因此将 T-TREC 风场的观测误差设为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。为了适应台风同化,且更合理地体现 T-TREC 风场/ V_r 资料的影响范围,集合协方差的水平和垂直局地化半径分别设为 $50 \text{ km}/20 \text{ km}$ 和 $4 \text{ km}/2 \text{ km}$ (Zhang et al, 2009; Wang et al, 2014)。

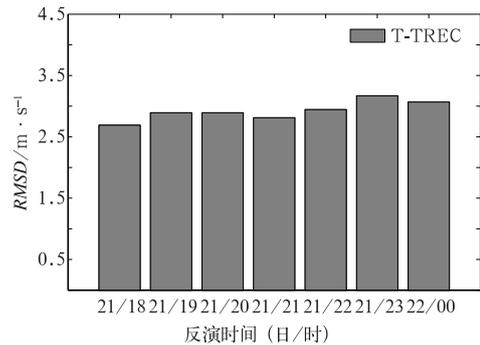


图 5 循环同化阶段 T-TREC 风场与 HKRD 径向速度的均方根偏差(RMSD)
Fig. 5 The RMSD for T-TREC winds during forecast-analysis cycles

2 雷达资料循环同化策略对台风灿都(2010)结构分析的影响

2.1 同化更新量的统计分析

在循环同化阶段,通过每一步同化前后的模式 V_r 与观测 V_r 的 RMSD 来分析模式对雷达资料的响应及误差在同化分析窗内的增长情况。其中模式 V_r 由三组试验的水平风场分别投影到 HKRD 和 YJRD 的径向方向求得。此外,利用美国联合台风预警中心(JTWC)的最佳路径(best-track)资料对比检验模式海平面最低气压(MSLP)和近地面最大风速(MSW)在每次同化前后的表现。

图 6 分别给出了三组试验上述变量的“锯齿图”。首次分析前,模式 V_r 与 HKRD 和 YJRD 的 RMSD 均很大,分别为 8.5 和 $9.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明初始场环流误差较大。同化 V_r 资料后,ExpVr 试验的 RMSD 大幅下降至 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6a~6c);而同化 T-TREC 风后,ExpTrec 和 ExpTrecVr 试验的

$RMSD$ 也有明显下降,与 HKRD 的 $RMSD$ 大约 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6a),这也从侧面表明 T-TREC 风相比同化前的背景场更接近雷达 V_r 观测,具备同化应用价值;但由于 T-TREC 风场仅来自 HKRD 单部雷达的反演,与 YJRD 的 $RMSD$ 仍较大,约 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6b)。首次分析后,ExpVr 试验的误差迅速增长,第二次分析前的 $RMSD$ 增长至 $5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6c),表明合理的台风环流在预报过程中未能有效维持;而 ExpTrec 和 ExpTrecVr 试验误差增长较慢,第二次分析前的 $RMSD$ 只有 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6c)。在之后

的几次分析循环中,ExpTrecVr 试验的预报误差明显低于 ExpVr 试验(图 6a~6c),这说明在首次分析中同化 T-TREC 风场对于台风涡旋结构的建立和维持具有积极作用,预报误差增长较慢。经过了大约 5 次分析循环后,ExpVr 试验的预报误差增长才与 ExpTrecVr 试验基本一致。而对于 ExpTrec 试验,虽然前两次分析循环后的预报误差较低(图 6a~6c),但由于 T-TREC 资料存在反演误差(图 5),随后的同化分析并没有进一步降低预报误差, $RMSD$ 基本维持在 $3 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的水平(图 6c)。

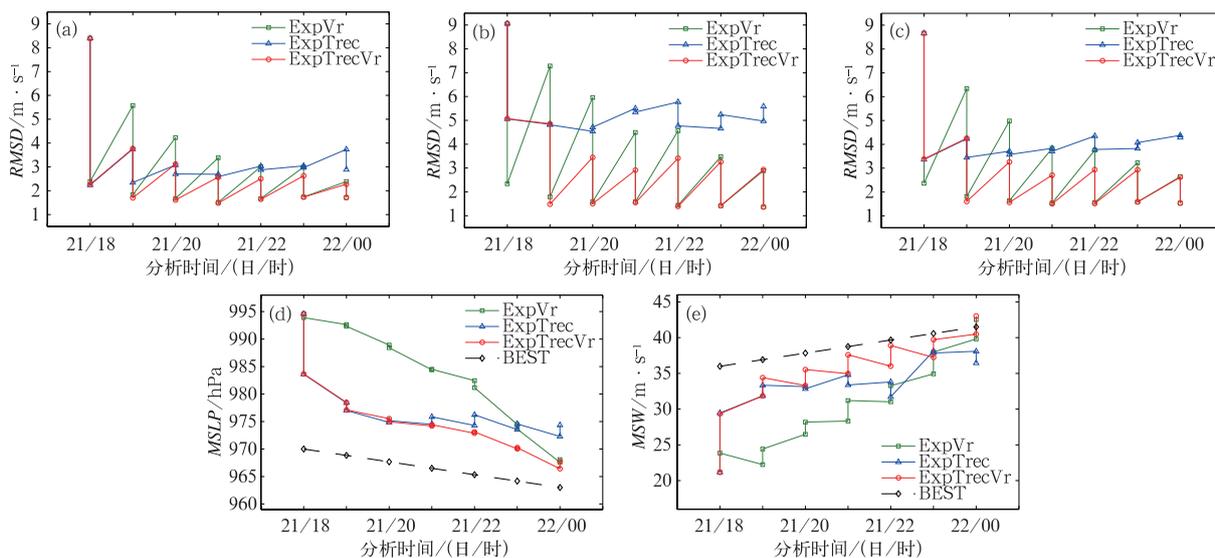


图 6 循环同化阶段 ExpVr, ExpTrec 和 ExpTrecVr 试验的模式 V_r 与 (a) HKRD 观测 V_r 的 $RMSD$, (b) YJRD 观测 V_r 的 $RMSD$ 和 (c) 两部雷达观测 V_r 的平均 $RMSD$; 以及 (d) $MSLP$ 和 (e) MSW 的变化 (图 6d 和 6e 中黑色虚线为 JTWC 观测的台风强度)

Fig. 6 The forecast-analysis (sawtooth pattern during cycling) of (a) $RMSD$ of HKRD V_r , (b) $RMSD$ of YJRD V_r , (c) $RMSD$ of two radars, and (d) the minimum sea level pressure (unit: hPa) and (e) the maximum surface wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) together with JTWC best track, for ExpVr, ExpTrec and ExpTrecVr (The black dashed line represents the strength of typhoon)

图 6d 和 6e 表明,分析前的初始场台风明显偏弱, $MSLP$ 和 MSW 分别比观测高(低) 25 hPa ($15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。首次同化 T-TREC 风后, ExpTrec 和 ExpTrecVr 试验的 MSW 受风场同化的直接影响加强到大约 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 气压场也显著调整至 983 hPa 。而首次同化 V_r 后, ExpVr 试验的 MSW 只加强至 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $MSLP$ 只降低至 992 hPa 。在随后的分析循环中, ExpTrecVr 试验的 $MSLP$ 和 MSW 更快地接近 best-track, 台风强度呈稳步增强的趋势。而 ExpTrec 试验虽然在首次分析后台风强度明显加强, 但随后的 T-TREC 循环同化并没有进一步改善台风强度, 其最终分析时刻的 $MSLP$ 和 MSW 相比

ExpTrecVr 都较弱。相比之下, ExpVr 试验的台风强度虽然能够逐步接近观测, 但需要经历较多的同化次数。

2.2 水平风场结构分析

本节将分别针对 ExpVr, ExpTrec 和 ExpTrecVr 这三组试验 21 日 1800 UTC (第一次分析)、2000 UTC (第三次分析)、2200 UTC (第五次分析) 和 22 日 0000 UTC (第七次分析), 同化前后的 3 km 高度风场结构做分析。

图 7 给出了 ExpVr 试验 3 km 高度的风场和同化增量。第一次分析, 同化前的风场环流很弱(图

7a),最大风速只有 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,环流中心偏离观测位置较远。同化后环流整体增强不明显(图 7b),台风西北侧局部增强,同化影响集中在雷达 V_r 资料的覆盖区域(图 7c)。第三次分析,同化前的环流中心依然偏离观测位置较远,风场结构不对称,最大风速位于台风内核东侧,大约 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7d),成熟的台风环流并没有形成;同化后风场继续改善,内核西南侧风场加强,最大风速增量大约 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7f)。第五次分析,同化前的环流结构已较为完整,中心距观测很近,说明前 4 h 的 V_r 循环同化对于台风结构已有显著改善(图 7g)。第七次分析,同化前最大风速位于内核东侧,最大风速达到 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7j);同化后环流结构和位置改善较小(图 7k);内核南侧风速略增强,风场增量主要体现为次涡旋尺度的结构(图 7l)。

图 8 给出 ExpTrec 试验 3 km 高度的风场和增

量结构。第一次分析,同化后的风场呈现完整的涡旋环流,最大风速达到 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8b),增量的涡旋中心和 best-track 观测中心十分吻合(图 8c),可见单次的 T-TREC 同化已能十分有效地改善涡旋尺度的环流结构。第三次分析,ExpTrec 试验在同化前的台风环流结构完整,中心较接近观测,说明台风环流在最初的 1~2 次 T-TREC 循环同化后能有效维持;同化后,台风内核西侧风速加强、东侧风速减弱(图 8f),使得同化后的涡旋结构更加对称(图 8e)。第五次和第七次分析,同化前环流中心位置与观测中心有些偏离(图 8g,8j),同化后环流中心与观测位置吻合(图 8h,8k)。同化 T-TREC 风的作用主要体现在对台风环流位置的调整(图 8i,8l)。

图 9 展示了 ExpTrecVr 试验 3 km 高度的风场和增量结构。首次同化 T-TREC 风的结果与 ExpTrec 一致。第三次同化前的台风环流结构(图 9d)

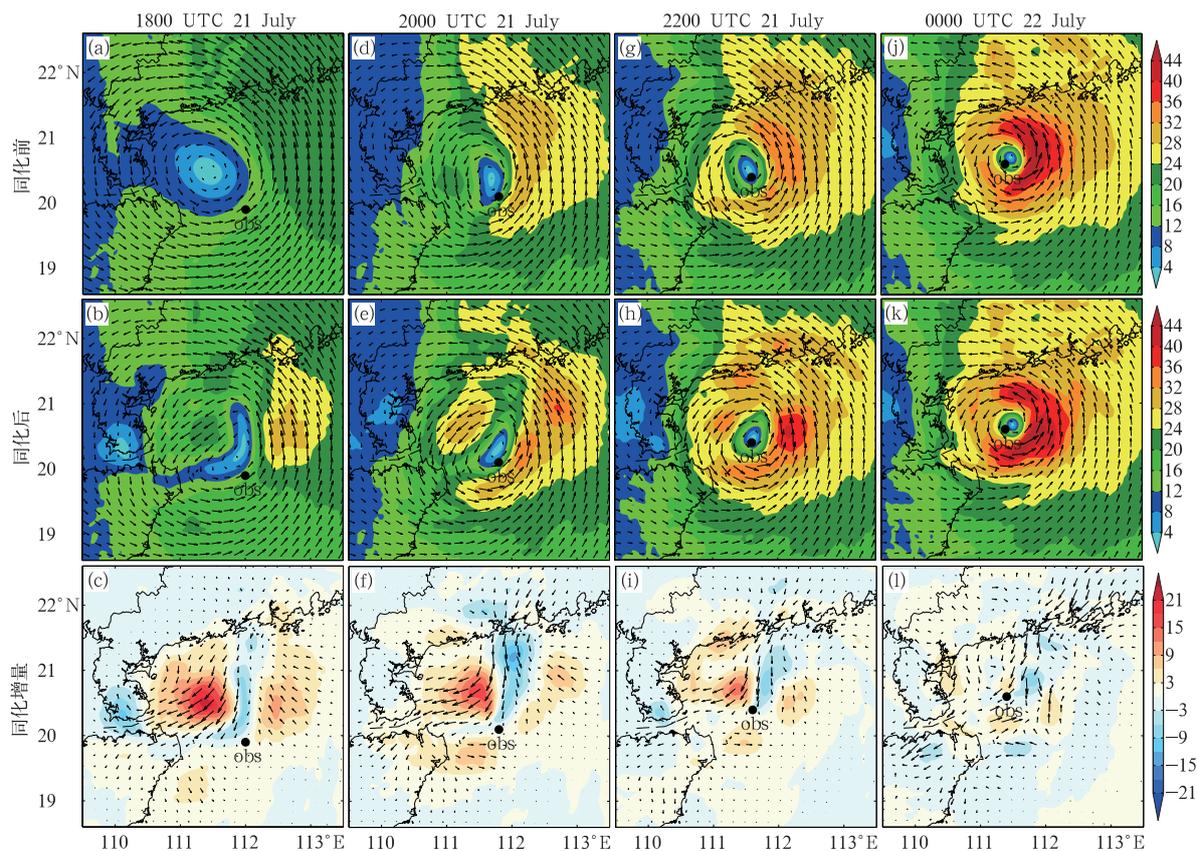


图 7 ExpVr 试验 3 km 高度水平风速(阴影,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和风矢量

(a, b, c) 21 日 1800 UTC, (d, e, f) 21 日 2000 UTC, (g, h, i) 21 日 2200 UTC 和 (j, k, l) 22 日 0000 UTC; (a, d, g, j) 同化前, (b, e, h, k) 同化后和 (c, f, i, l) 同化增量

Fig. 7 The 3 km height wind speed (shaded area, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and vector for ExpVr (a, b, c) 1800 UTC 21, (d, e, f) 2000 UTC 21, (g, h, i) 2200 UTC 21 and (j, k, l) 0000 UTC 22; from top to bottom are the field before assimilation (a, d, g, j), the field after assimilation (b, e, h, k) and the increment (c, f, i, l)

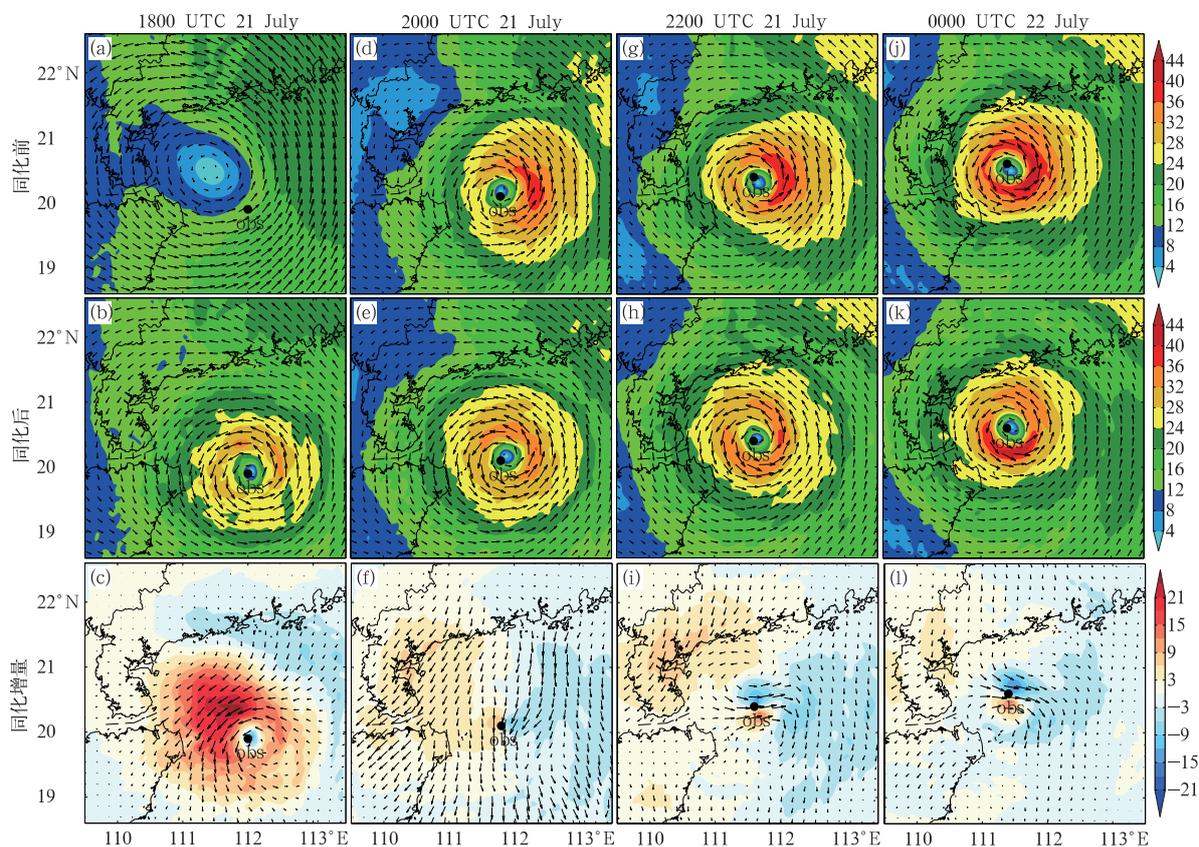


图 8 同图 7, 但为 ExpTrec 试验

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for ExpTrec experiment

相比 ExpTrec 试验(图 8d)具有一定的不对称性;同化后的环流结构(图 9e)比同化前对称,风场增量在台风内核西侧出现气旋性加强(图 9f)。第五次分析,同化前后的风场环流较为接近(图 9g, 9h),同化增量较小且体现次涡旋尺度结构(图 9i),说明前 4 h 的循环同化已使台风环流结构与观测较为接近。第七次分析,ExpTrecVr 试验在同化前后(图 9j, 9k)的涡旋结构也较为接近,表现为对台风次涡旋尺度结构的改善。相比 ExpVr 试验,其在首次同化之后每一步的同化增量都明显较小,表明前一步的预报误差较低。

2.3 垂直结构分析

选择 21 日 2000、2200 UTC 和 22 日 0000 UTC 各组试验的同化分析场来研究台风的垂直结构。图 10 为轴对称切向风和水平温度异常(台风中心极坐标 150 km 以内的温度异常平均值)。经过 3 次同化后,ExpVr 试验(图 10a)轴对称环流相比 ExpTrec(图 10b)和 ExpTrecVr(图 10c)弱,且台风眼半径较大;ExpTrec 试验(图 10b)的眼墙大风速区结构明显,最大风速半径(RMW)位于 40 km;

ExpTrecVr 试验(图 10c)涡旋环流最强,最大风速达到 $37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,位于 1 km 高度,最大温度异常中心位于 8 km 高度,大约 9 K。经过 5 次同化后,ExpVr 试验(图 10d)台风环流强度有所加强,轴对称最大风速值达到 $34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,RMW 大约 55 km;ExpTrec 试验(图 10e)环流加强不明显,RMW 依然位于 40 km 左右;ExpTrecVr 试验(图 10f)环流依旧最强,轴对称最大风速超过 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,位于边界层内。经过 7 次同化后,ExpVr(图 10g)和 ExpTrecVr(图 10i)的涡旋环流强度很接近,说明当同化时间窗较长时,持续的 V_r 同化对改善台风结构占主导作用,1 km 高度最大风速达到 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;而 ExpTrec 试验(图 10h)的环流强度虽然也有所增强,但整体比 ExpVr 和 ExpTrecVr 弱。

ExpTrec 和 ExpTrecVr 试验相比 ExpVr 能较早地建立台风眼墙环流和高层暖心结构。在首次同化 T-TREC 风之后,持续的 V_r 同化则有助于台风环流结构的改善和维持,而持续的 T-TREC 风对环流强度的改善却不明显。此外,ExpVr 试验在经历多次的同化分析后,最终也能形成成熟的台风环流结构。

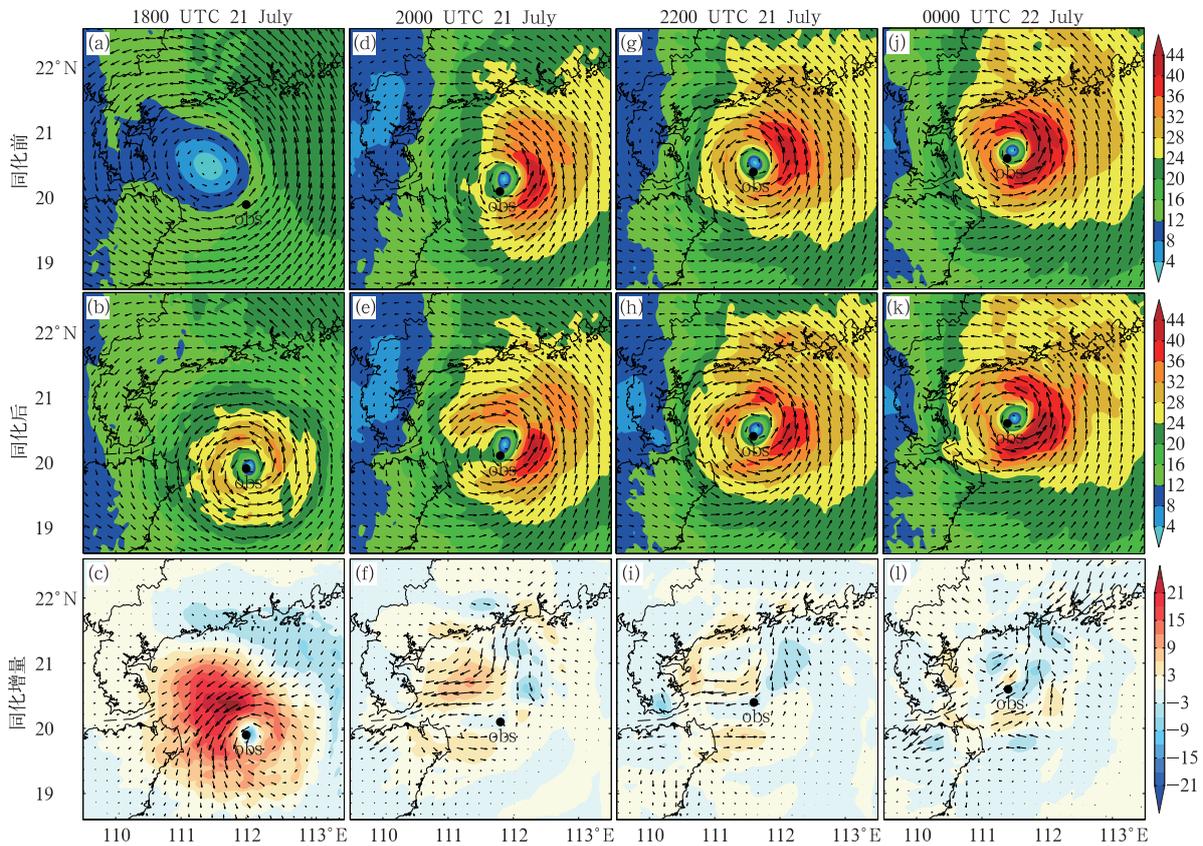


图 9 同图 7, 但为 ExpTrecVr 试验

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for ExpTrecVr experiment

3 雷达资料循环同化策略对台风灿都(2010)确定性预报的影响

对三种同化策略各选择 21 日 2000、2200 UTC 和 22 日 0000 UTC 作为确定性预报的启动时间,以相应时刻的同化分析场作为各自确定性预报的初始场(表 1),来研究这 9 组确定性预报试验在台风路径、强度,环流结构以及降水预报方面的表现。

3.1 路径和强度预报

图 11 展示了 9 组试验在“灿都”登陆过程中路径、路径误差、MSLP 和 MSW 的预报结果。起报时间为 21 日 2000 UTC 时,ExpVr2h 试验的路径平均误差最高,达到 38 km;ExpTrec2h 误差为 30 km,登陆后路径有较明显的偏北;而 ExpTrecVr2h 试验台风移动趋势与 best-track 吻合的最好,路径平均误差只有 25 km。在强度预报方面,由于 ExpVr2h 的初始场环流结构较弱(图 10a),其在预报过程中的 MSLP(MSW)平均误差达到 10.2 hPa($5.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。相比之下,ExpTrec2h 和 Exp

TrecVr2h 试验的强度预报明显优于 ExpVr2h 试验,MSLP 预报趋势与 best-track 一致,平均误差分别为 2.9 和 4.6 hPa;而 MSW 预报结果在登陆前相比 best-track 有一定的偏强,平均误差分别为 4.5 和 $3.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

起报时间为 21 日 2200 UTC 时,ExpTrec4h 和 ExpTrecVr4h 试验路径平均误差分别为 30 和 34 km,路径预报能力依然强于 ExpVr4h 试验(38 km)。从强度预报来看,ExpVr4h 试验相比 ExpVr2h 试验有明显提高,MSLP(MSW)平均误差为 4 hPa($4.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$);但 MSW 在登陆前相比 best-track 存在较明显的偏强。相比之下,ExpTrec4h 和 ExpTrecVr4h 试验的 MSLP 预报更接近 best-track 观测,平均误差分别只有 2.8 和 2.9 hPa。2 组试验的 MSW 平均预报误差分别为 5.1 和 $4.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。ExpTrec4h 相比 ExpTrec2h 未体现出明显优势,MSW 预报甚至略差。整体而言,ExpTrecVr4h 在路径和 MSLP、MSW 强度预报方面均有良好表现。

起报时间为 22 日 0000 UTC 时。ExpTrec6h 试验的路径平均误差(44 km)最大,其在登陆后路径偏北明显,且相比 ExpTrec2h 和 ExpTrec4h 试验

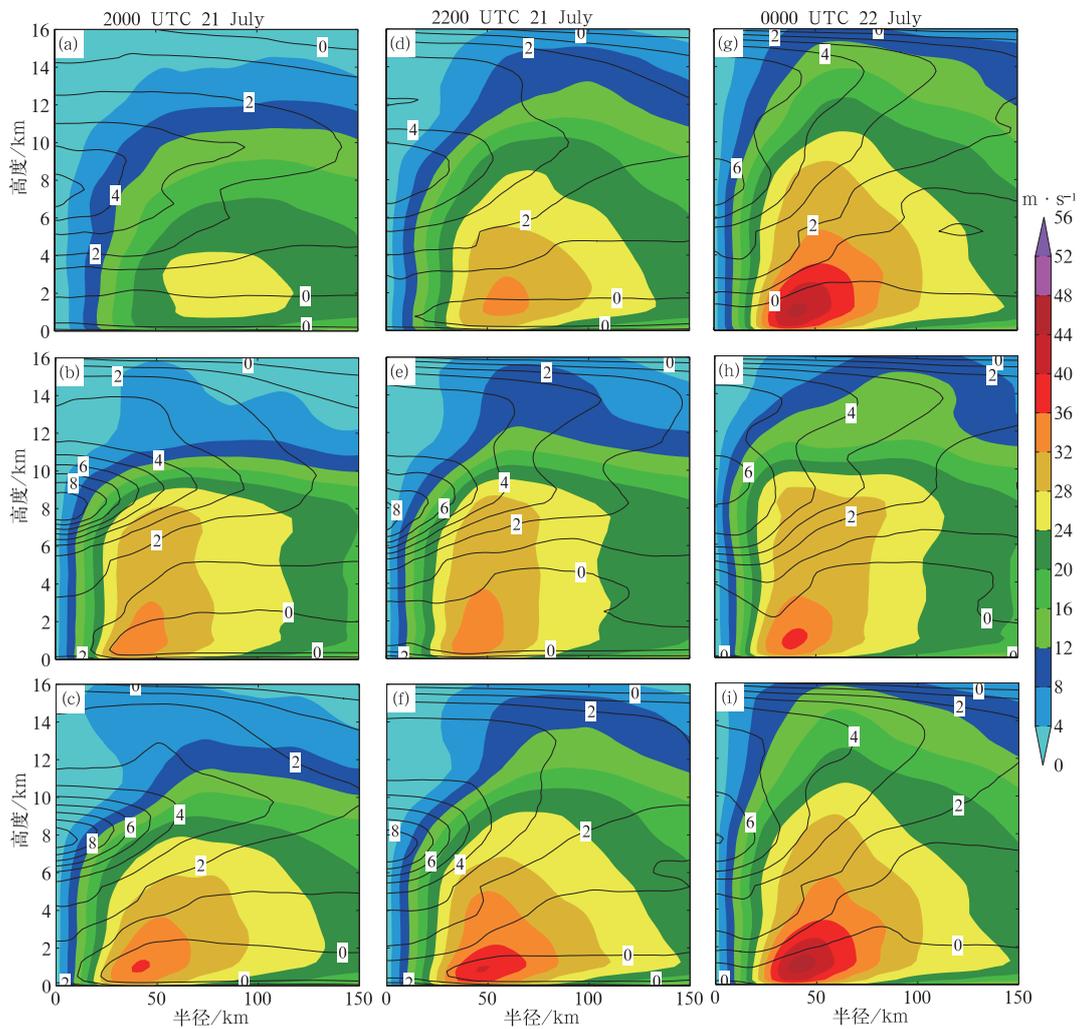


图 10 分析场台风轴对称切向风速(阴影,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、水平温度异常(等值线,单位: K)
(a, b, c) 21 日 2000 UTC, (d, e, f) 21 日 2200 UTC, (g, h, i) 22 日 0000 UTC;
(a, d, g) ExpVr 试验, (b, e, h) ExpTrec 试验, (c, f, i) ExpTrecVr 试验

Fig. 10 Azimuthal mean tangential wind speed (shaded area, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and temperature deviation from horizontal mean (solid contours, unit: K)

(a, b, c) 2000 UTC 21, (d, e, f) 2200 UTC 21 and (g, h, i) 0000 UTC 22. From top to bottom are the experiments of ExpVr (a, d, g), ExpTrec (b, e, h) and ExpTrecVr (c, f, i)

表 1 确定性预报试验列表

Table 1 The deterministic forecast experiments

试验名称	试验描述
ExpVr2h	ExpVr 循环同化 2 h 后启动
ExpTrec2h	ExpTrec 循环同化 2 h 后启动
ExpTrecVr2h	ExpTrecVr 循环同化 2 h 后启动
ExpVr4h	ExpVr 循环同化 4 h 后启动
ExpTrec4h	ExpTrec 循环同化 4 h 后启动
ExpTrecVr4h	ExpTrecVr 循环同化 4 h 后启动
ExpVr6h	ExpVr 循环同化 6 h 后启动
ExpTrec6h	ExpTrec 循环同化 6 h 后启动
ExpTrecVr6h	ExpTrecVr 循环同化 6 h 后启动

有一定的增大,表明增加 T-TREC 循环同化次数并

没对改善预报起到积极的作用。ExpTrecVr6h 试验路径误差为 35 km, 优于 ExpVr6h 试验 (39 km)。在 MSLP 强度预报方面, ExpVr6h 比 ExpVr2h 和 ExpVr4h 有较明显的进步, 说明增加 V_r 同化次数对强度预报有正面改善作用; ExpTrecVr6h 试验与 ExpVr6h 试验展现出了较为一致的趋势, 强度减弱都比 best-track 观测晚, 其平均误差分别为 3.2 和 2.8 hPa。相比之下, ExpTrec6h 试验的 MSLP 预报强度在登陆前明显弱于 best-track 观测, 然而其在登陆后的 MSLP 减弱趋势却和 best-track 吻合的最好, 其平均误差为 2.5 hPa。从 MSW 强度预报

来看, ExpVr6h、ExpTrec6h 和 ExpTrecVr6h 试验的平均误差分别为 4.2、5.2 和 3.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 3 组试验在登陆前都存在一定的高估。

整体而言, 所有试验的路径预报趋势均与 best-track 大体一致, 台风向西北方向移动, 登陆位置有一定偏差, 联合同化策略在路径预报方面的表现略优。对于强度预报, V_r 循环同化策略的预报能力随同化次数的增加而显著提高。相比之下, T-TREC

循环同化策略随着同化次数增加, 路径和强度预报误差反而增大, 表明 T-TREC 风场反演误差(图 5)在多次同化后的累积会对预报结果产生负面影响。而对于联合同化策略, 较少的同化次数即能提供合理的强度预报, 并且随着同化次数增加, 预报能力依然能够持续改善。此外, 三种同化策略的 MSW 预报相比 best-track 在登陆前都存在一定的高估, 这可能是由预报路径偏北, 登陆位置偏差所导致的。

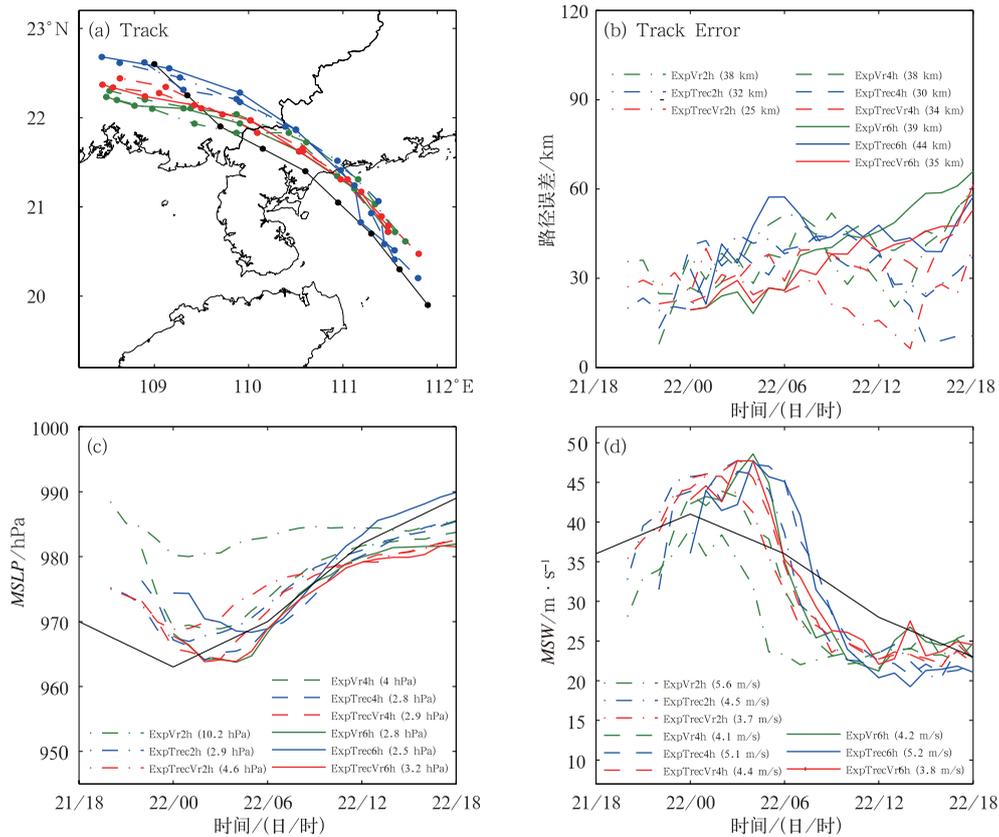


图 11 台风灿都(2010)(a)路径, (b)路径误差, (c)MSLP 和(d)MSW 预报
(图 11b, 11c 和 11d 中的数字分别表示平均路径误差, MSLP 误差和 MSW 误差。点划线、虚线和实线分别表示 2 h 循环同化、4 h 循环同化和 6 h 循环同化的预报试验; 绿色、蓝色和红色分别代表 ExpVr、ExpTrec 和 ExpTrecVr 试验)

Fig. 11 The predicted (a) tracks, (b) track errors, (c) MSLP, and (d) MSW, for Typhoon Chanthu (2010)

[The numbers in (b), (c) and (d) represent the mean track errors, MSLP errors and MSW errors, respectively. The dotted line, dashed line and solid line represent the forecasting experiments 2 h, 4 h and 6 h cycled assimilation respectively; the green, blue and red are for ExpVr, ExpTrec and ExpTrecVr, respectively]

3.2 台风环流结构预报的误差检验

由于 MSW 预报不能反映台风三维风场结构, 因此利用雷达 V_r 观测来检验各组试验对台风整体环流的预报能力。将预报风场分别投影至 HKRD

和 YJRD 的径向方向, 得到模式 V_r 。图 12 展示了 9 组试验的风场预报与 HKRD/YJRD 两部雷达 V_r 观测资料的 RMSD 随预报时间的增长, 检验时间从预报初始时刻至登陆时刻(22 日 0600 UTC)。

对于 2 h 循环同化试验, 尽管 ExpVr2h 初始

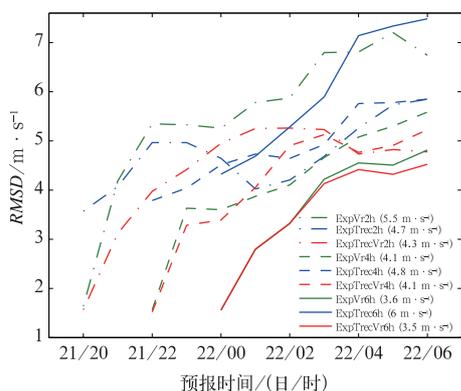


图 12 确定性预报试验与 HKRD/YJRD 观测 V_r 的 $RMSD$

(点划线、虚线和实线分别表示 2 h 循环同化、4 h 循环同化和 6 h 循环同化的预报试验；绿色、蓝色和红色分别代表 ExpVr、ExpTrec 和 ExpTrecVr 试验)

Fig. 12 The $RMSD$ between deterministic forecast and the observed V_r from HKRD/YJRD for all experiments

(The dotted line, dashed line and solid line represent the forecasting experiments via 2 h, 4 h and 6 h cycled assimilation respectively; the green, blue and red are for ExpVr, ExpTrec and ExpTrecVr, respectively)

$RMSD$ 只有大约 $1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 然而其误差在预报过程中快速增长, 到 22 日 0600 UTC 时刻已增长至 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均误差为 $5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。相比之下, ExpTrec2h 虽然初始 $RMSD$ 较高 ($3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 其预报误差随时间增长较慢, 平均误差为 $4.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而 ExpTrecVr2h 的预报误差最低 ($4.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 误差随时间增长较慢, 说明其分析场结构更合理 (图 10c)。

对于 4 h 循环同化试验, ExpTrec4h 与 ExpTrec2h 的表现类似, 初始 $RMSD$ 大约 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 预报误差随时间增长不明显, 平均误差为 $4.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。ExpVr4h 相比之前的 ExpVr2h 有明显改善, 然而其在初始的 1 h 内 $RMSD$ 从 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 快速增长至 $3.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均预报误差为 $4.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。ExpTrecVr4h 初始 $RMSD$ 也为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其在初始 1 h 内误差增长至大约 $3.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 低于 ExpVr4h 试验, 其平均预报误差为 $4.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对于 6 h 循环同化试验, ExpTrec6h 的初始 $RMSD$ 为 $4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 到 22 日 0600 UTC 时增长至 $7.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其平均误差为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 高于 ExpTrec2h 和 ExpTrec4h 试验, 再次证明增加

T-TREC 同化分析次数对预报有负面影响。而 ExpVr6h 和 ExpTrecVr6h 的预报误差增长情况相近, 这是由于两组试验的台风分析场结构已较为接近 (图 10g, 10i), 误差从初始的 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增长至登陆时刻的 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 其平均误差分别为 3.6 和 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ExpTrecVr6h 试验依然稍稍具有优势。

整体而言, 当同化次数较少时, T-TREC 循环同化策略对台风环流结构的预报较好, 而 V_r 循环同化策略的预报误差较大; 当同化次数增多时, T-TREC 循环同化策略的预报能力下降, 说明多次的循环同化会使得 T-TREC 风场的误差累积, 对预报产生负面影响。而 V_r 循环同化策略则较为显著地降低了预报误差, 体现出多次同化的必要性。相比之下, 联合同化策略在不同的同化次数下, 均能有较好的预报表现。

3.3 降水预报评估

为了对比和评估各组试验在台风登陆过程中的降水预报能力, 我们利用高分辨率的地面自动站降水观测, 计算了每组试验 18 h 累积降水的 ETS (equitable threat scores) 评分和预报偏差。图 13a~13c 分别给出了 9 组试验对应降水等级为 30, 60, 90 和 120 mm 的 ETS 评分。对于 2 h 循环同化试验, ExpVr2h 的 ETS 评分略高于 ExpTrec2h; 而 ExpTrecVr2h 对所有降水等级的预报都优于 ExpVr2h 和 ExpTrec2h 试验, 降水等级越高, 其预报优势越明显 (图 13a)。对于 4 h 循环同化试验, ExpVr4h、ExpTrec4h 和 ExpTrecVr4h 试验对 30 和 60 mm 降水等级的预报能力相当, 然而在大雨 (90 和 120 mm) 预报方面, ExpTrecVr4h 试验依然优势明显, ExpTrec4h 试验的预报能力则明显弱于其余 2 组试验 (图 13b)。对于 6 h 循环同化试验, ExpVr6h 和 ExpTrecVr6h 同样优于 ExpTrec6h; 而在大雨预报能力方面, ExpTrecVr6h 明显优于 ExpVr6h (图 13c)。为了更清晰地了解各同化试验对台风降水预报的强弱偏差, 图 13d~13f 给出了 9 组试验在 0.1~30, 30~60, 60~90 mm 以及 90~120 mm 各降水等级的预报偏差。整体而言, 当观测降水等级达到 90~120 mm 时, T-TREC 循环同化试验 ExpTrec2h, ExpTrec4h 和 ExpTrec6h 对降水有较严重的低估。由台风风场预报误差 (图 12) 可知, 持续的 T-TREC 反演风同化会降低台风结构预报的准

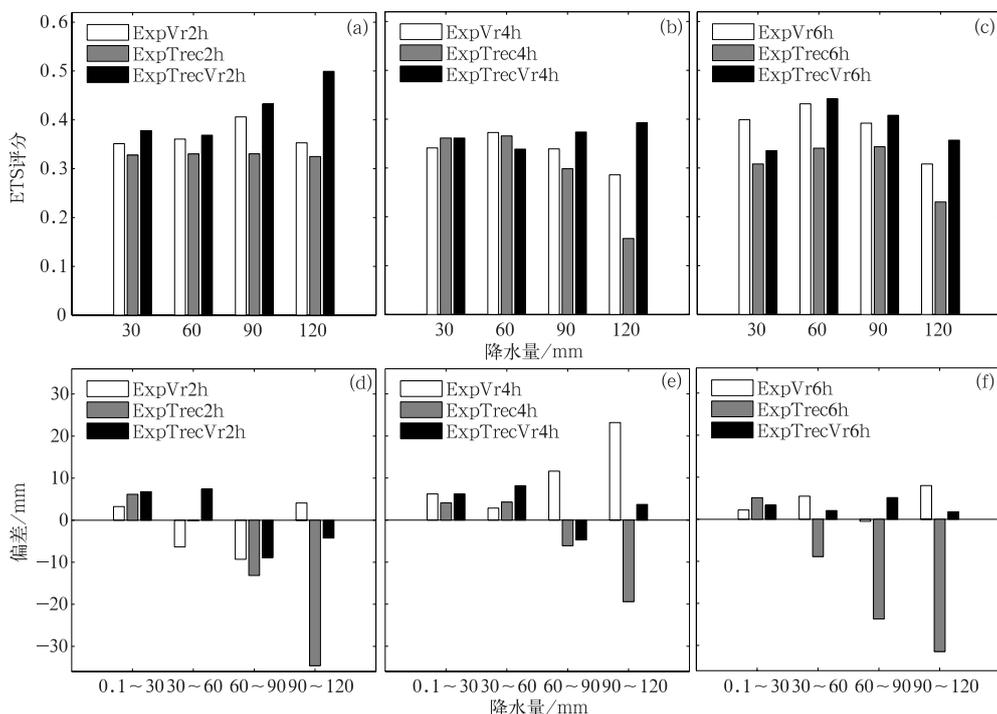


图 13 确定性预报试验 22 日 0000—1800 UTC 的 18 h 累积降水的 ETS 评分:

(a) 2 h 循环同化, (b) 4 h 循环同化, (c) 6 h 循环同化;

预报降水偏差: (d) 2 h 循环同化, (e) 4 h 循环同化, (f) 6 h 循环同化

Fig. 13 The ETS scores for 18 h accumulated precipitation valid from 0000 UTC to 1800 UTC 22 July:

(a) 2 h assimilation window, (b) 4 h assimilation window and (c) 6 h assimilation window; the predicted precipitation bias: (d) 2 h assimilation window, (e) 4 h assimilation window and (f) 6 h assimilation window

准确度,很大程度上导致了台风降水预报的偏差。对比 V_r 循环同化试验和联合同化试验的预报偏差可以看出,在 0.1~30 和 30~60 mm 降水等级,两种同化策略的预报水平接近,整体上存在微弱的正偏差;而在 90~120 mm 等级,ExpVr4h 和 ExpVr6h 试验的降水预报有较明显的正偏差,而 ExpTrecVr4h 和 ExpTrecVr6h 试验的预报偏差很小(图 13e,13f),再次体现了联合同化策略在台风降水预报上的优势。

定量降水预报结果表明,相比 T-TREC 循环同化,采用 V_r 循环同化更有利于降水预报,其主要原因是两部雷达的径向速度观测提供了更多、更精确的台风结构,并且 T-TREC 风场存在一定反演误差,多次循环同化会影响同化分析和预报效果。而联合同化的降水预报能力强于 V_r 循环同化,尤其是 2 h 循环同化试验,这说明在同化分析次数较少的情况下,首次分析时刻的 T-TREC 同化对于预报过程中台风结构的迅速建立十分重要;当同化分析次数增多时, V_r 循环同化策略的降水预报表现逐渐接

近联合同化策略;但总体来说,在大雨预报方面,联合同化策略依然有一定优势。

4 结论和讨论

本文以登陆台风灿都(2010)为例,基于雷达径向速度(V_r)观测和 T-TREC 反演风,利用 Hybrid 集合-变分同化方法研究了适合于登陆台风预报的雷达资料同化策略。在比较研究 T-TREC 循环同化策略和 V_r 循环同化策略的基础上,考虑到 T-TREC 反演风和雷达 V_r 资料各自的优势,提出了合理利用两种雷达风场资料的联合同化策略,即在首次分析中同化 T-TREC 风,而在随后的分析循环中同化 V_r 资料。对三种不同的雷达资料循环同化策略,分别以 2、4 和 6 h 后的同化分析场作为预报初始场进行确定性预报,研究了其对“灿都”登陆过程中路径、强度、结构和降水预报的影响。主要试验结果和结论如下:

循环同化阶段, V_r 循环同化策略在最初几次同

化分析后的海平面最低气压(MSLP)和近地面最大风速(MSW)改善不明显。经历大约 4~5 次同化分析后,其台风强度才逐渐接近 best-track。而 T-TREC 循环同化策略和联合同化策略经过首次的 T-TREC 同化分析后,MSLP(MSW)明显下降(上升),台风强度迅速增强。但在随后的“分析-预报”循环中,T-TREC 循环同化策略的台风强度没有明显改善;相比之下,联合同化策略在随后 V_r 同化的作用下,MSLP(MSW)持续下降(上升)。在整个循环同化过程中,联合同化策略的台风强度变化趋势最接近 best-track。

为了研究三种循环同化策略在不同起报时刻下的预报表现,分别选择 2、4 和 6 h 的循环同化分析场作为预报初始场对台风“灿都”进行确定性预报。对于 V_r 循环同化策略,2 h 同化分析场的台风环流较弱,导致台风强度预报明显弱于 best-track;随着同化分析次数的增加,4 和 6 h 同化分析场的台风环流明显加强,台风强度和环流结构预报的改善明显。而对于 T-TREC 循环同化策略,2 h 同化分析场已呈现出较为成熟的台风环流,其对应的台风强度预报远优于 V_r 循环同化策略;但随同化次数增加,4 和 6 h 同化分析场的台风环流加强不明显,持续的 T-TREC 循环同化反而降低了确定性预报水平。联合同化策略则兼顾了 T-TREC 风和 V_r 两者的优势,在同化次数较少的情况下,2 h 同化分析场的台风环流结构合理,强度预报与 best-track 接近,相比 V_r 循环同化策略优势明显;随着同化次数的增加,4 和 6 h 同化分析场的台风结构持续改善,环流结构的预报也得到进一步改进,优于 T-TREC 循环同化策略。

本文针对两种雷达风场资料在循环同化中的不同配置,研究了适合于登陆台风预报的雷达资料同化策略。 V_r 循环同化策略虽然可以有效改善台风预报,但 4~5 次同化分析对于提高预报能力是必要的,较长的同化时间窗意味着确定性预报的启动时间较晚,不利于台风业务数值预报。相比之下,T-TREC 循环同化策略受益于 T-TREC 反演环流观测范围远、风场结构完整等优势,1~2 次的循环同化即能显著改善台风强度预报;但由于 T-TREC 资料存在一定的反演误差,增加同化次数反而不利于台风预报。若考虑合理利用这两种雷达资料,本文提出的联合同化策略在首次的 T-TREC 风场同化后即能显著改善台风的涡旋尺度结构,并且随后的

V_r 资料同化又能持续改善次涡旋尺度结构,相比 V_r 循环同化策略,其在预报启动时间较早的情况下具有明显优势。

本文针对登陆台风灿都(2010)比较了不同的同化时间窗对确定性预报的影响。为了得到详实的结论,选择台风靠近登陆的不同时间点,进行了路径、强度、降水和风场预报的对比。对于业务预报,由于尽早地启动预报具有现实意义,先同化雷达 T-TREC 反演风场,后同化 V_r 观测的联合同化策略可以达到较优的台风分析和预报效果。实际上,我们也利用同样的方法对另一台风莫兰蒂(2010)进行了数值预报研究,并且得到了相一致的结论。然而,仍有一些科学问题值得注意。严格来说,对于 T-TREC 雷达反演风场而言,当天气系统中回波强度发生很大变化时,T-TREC 风矢量与空气质点运动会有差异,这将影响反演的准确程度,因此,今后的工作有必要进一步改进 T-TREC 反演算法,使之更具有空气质点运动的代表性。但考虑到 T-TREC 反演风场的观测范围比径向速度远,其在业务应用方面具备明确的优势,因此本文根据现有的两种雷达风场资料(V_r 径向速度和 T-TREC 反演风),旨在研究最优的循环同化配置。此外,今后的工作有必要通过批量的台风数值模拟研究,更好地衡量两种雷达资料在数值模式中的应用价值。为此,我们将尝试更多的台风个例,对不同强度等级的台风进行同化试验,以期得到更为普适的结论。

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莎莎模拟的影响. 气象, 10: 1170-1181.
- 丁伟钰,万齐林,张诚忠,等. 2010. 有云条件下 HIRS/3 资料的同化及其对“珍珠”台风的影响. 气象学报, 68(1): 70-78.
- 顾建峰. 2006. 多普勒雷达资料三维变分直接同化方法研究(Doctoral dissertation, 北京: 中国气象科学研究所).
- 郝民,田伟红,龚建东. 2014. L 波段秒级探空资料在 GRAPES 同化系统中的应用研究. 气象, 40(2): 158-165.
- 李新峰,赵坤,王明筠,等. 2013. 多普勒雷达资料循环同化在台风“鲇鱼”预报中的应用. 气象科学, 3(3): 255-263.
- 李媛,刘健文,董佩明,等. 2011. GRAPES-3Dvar 雷达资料直接同化对江淮暴雨数值预报影响的分析研究. 气象, 37(4): 403-411.
- 梁旭东,王斌. 2010. 基于模式约束三维变分技术的连续循环同化试验研究. 气象学报, 68(2): 53-61.
- 刘君,黄江平,董佩明,等. 2013. 卫星资料循环同化应用对区域数值预报效果影响分析. 气象, 39(2): 156-165.
- 刘瑞,翟国庆,王彰贵,等. 2012. FY-2C 云迹风资料同化应用对台风预报的影响试验研究. 大气科学, 36(2): 350-360.

- 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. *大气科学*, 39(6):1112-1122.
- 闵锦忠,刘盛玉,毕坤,等. 2015. 基于 Hybrid EnSRF-En3DVar 的雷达资料同化研究. *大气科学学报*, 38(2):213-221.
- 秦琰琰,龚建东,李泽椿. 2012. 集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的观测系统模拟试验. *气象*, 38(5):513-525.
- 沈菲菲,闵锦忠,许冬梅,等. 2015. WRF-Hybrid 背景误差协方差调整在台风同化及预报中的应用研究. *气象科学*, 2(2):150-159.
- 施丽娟,许小峰,李柏,等. 2009. 雷达资料在登陆台风“桑美”数值模拟中的应用. *应用气象学报*, 20(3):257-266.
- 苏捷,朱克云,张杰. 2013. RTTOV 散射模块在 FY-3MWHS 资料同化中的应用. *气象*, 39(11):1461-1472.
- 万齐林,薛纪善,陈子通,等. 2005. 雷达 TREC 风的三维变分同化应用与试验. *热带气象学报*, 5(5):449-457.
- 王明筠,赵坤,吴丹. 2010. T-TREC 方法反演登陆中国台风风场结构. *气象学报*, 2010, 68(1):114-124.
- 王云峰,王斌,马刚,等. 2003. 多种观测资料的四维变分同化对台风路径预报的影响. *科学通报*, 48(z1):82-86.
- 张晶,顾松山,楚志刚,等. 2014. LAPS 同化 GPS/PWV 资料在暴雨预报中的应用研究. *气象*, 40(1):76-85.
- 朱国富. 2015. 数值天气预报中分析同化基本方法的历史发展脉络和评述. *气象*, 41(8):986-996.
- 庄照荣,薛纪善. 2004. 云迹风资料的三维变分同化及对台风预报的影响试验. *热带气象学报*, 3(3):225-236.
- Hamill T M, Snyder C. 2000. A hybrid ensemble Kalman filter-3D variational analysis scheme. *Mon Wea Rev*, 128:2905-2919.
- Houtekamer P L, Mitchell H L. 1998. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Mon Wea Rev*, 126(3):796-811.
- Li Y, Wang X, Xue M. 2012. Assimilation of radar radial velocity data with the WRF ensemble-3DVAR hybrid system for the prediction of hurricane Ike (2008). *Mon Wea Rev*, 140:3507-3524.
- Li X, Ming J, Wang Y, et al. 2013. Assimilation of T-TREC-retrieved wind data with WRF 3DVAR for the short-term forecasting of typhoon Meranti (2010) near landfall. *J Geophys Res*, 118:10361-10375.
- Li X, Ming J, Xue M, et al. 2015. Implementation of a dynamic equation constraint based on the steady state momentum equations within the WRF hybrid ensemble-3DVar data assimilation system and test with radar T-TREC wind assimilation for tropical Cyclone Chanthu (2010). *J Geophys Res Atmos*, 120:4017-4039.
- Lorenc A C. 2003. The potential of the ensemble Kalman filter for NWP—A comparison with 4D-VAR. *Quart J Roy Meteor Soc*, 129:3183-3203.
- Rinehart R E, Garvey E T. 1978. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature*, 273:287-289.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. Description of the Advanced Research WRF version 4, Rep. NCAR/TN-475++STR, Natl. Cent. for Atmos Res, Boulder, Colo.
- Tuttle J, Gall R. 1999. A single-radar technique for estimating the winds in tropical cyclones. *Bull Amer Meteor Soc*, 80:653-668.
- Wang M, Xue M, Zhao K, et al. 2014. Assimilation of T-TREC-retrieved winds from single-Doppler radar with an EnKF for the forecast of Typhoon Jangmi (2008). *Mon Wea Rev*, 142(5):1892-1907.
- Wang X. 2011. Application of the WRF hybrid ETKF-3DVAR data assimilation system for hurricane track forecasts. *Wea Forecasting*, 26:868-884.
- Wang X, Barker D, Snyder C, et al. 2008a. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model, Part I: Observing system simulation experiment. *Mon Wea Rev*, 136:5116-5131.
- Wang X, Barker D, Snyder C, et al. 2008b. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model, Part II: Real observation experiments. *Mon Wea Rev*, 136:5132-5147.
- Xiao Q, Kuo Y H, Sun J, et al. 2005. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. *J Appl Meteorol Climatol*, 44:768-788.
- Xiao Q, Zou X, Wang B. 2000. Initialization and simulation of a landfalling hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *Mon Wea Rev*, 128:2252-2269.
- Zhang F, Snyder C, Sun J. 2004. Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. *Mon Wea Rev*, 132(5):1238-1253.
- Zhang F, Weng Y, Sippel J A, et al. 2009. Cloud-resolving hurricane initialization and prediction through assimilation of Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. *Mon Wea Rev*, 137:2105-2125.
- Zhao K, Xue M. 2009. Assimilation of coastal Doppler radar data with the ARPS 3DVAR and cloud analysis for the prediction of Hurricane Ike (2008). *Geophys Res Lett*, 36, doi:10.1029/2009GL038658.
- Zhao K, Li X, Xue M, 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 Geophys Res*, 117, D06108, doi:10.1029/2011JD017109.
- Zou X, Weng F, Zhang B, et al. 2013. Impacts of assimilation of ATMS data in HWRF on track and intensity forecasts of 2012 four landfall hurricanes. *J Geophys Res Atmos*, 118(11):558-576.