



北京大学

# 博士研究生学位论文

题目：集合卡尔曼滤波同化方法  
同化高时空分辨率观测对  
热带气旋预报影响的研究

姓 名：朱磊  
学 号：1401110210  
院 系：物理学院大气与海洋科学系  
专 业：气象学  
研究方向：中尺度气象学与数值天气预报  
导师姓名：孟智勇 教授

二〇一八年六月

## 版权声明

任何收存和保管本论文各种版本的单位和个人，未经本论文作者同意，不得将本论文转借他人，亦不得随意复制、抄录、拍照或以任何方式传播。否则，引起有碍作者著作权之问题，将可能承担法律责任。

## 摘要

热带气旋(tropical cyclone, 简称 TC)登陆引起的灾害是影响我国及全世界最严重的自然灾害之一。然而目前的业务数值天气预报对 TC 的预报还远未达到理想状态,尤其在 TC 的结构、强度以及伴随 TC 降水预报方面。其重要原因之一是 TC 生成于海上且生命期的绝大部分时间同样在海上度过,而海洋上观测资料不足,数值预报的初始场无法准确描述 TC 的精细结构。随着我国沿海地区多普勒雷达观测网的不断完善,以及新一代高时空分辨率静止气象卫星的逐渐业务化,气象雷达和静止卫星已成为 TC 精细结构观测信息的重要来源。将这些高时空分辨率的观测用于改善数值模式初始场以期改善 TC 的预报能力是当前全世界 TC 业务和科学研究的难点。然而目前,这方面的工作还十分有限。

本文使用基于先进的对流可解析高分辨率数值预报模式 WRF (Weather and Research Forecast)的集合卡尔曼滤波同化(Ensemble-based Kalman Filter, 简称 EnKF)系统考察了我国地基多普勒雷达径向风、美国上一代静止气象卫星 GOES-13 以及世界上第一个业务运行的新一代静止气象卫星向日葵 8 号的全天气条件下红外水汽通道观测资料的同化对 TC 预报特别是强度、结构和降水的影响。

鉴于我国地基多普勒雷达资料还从未被用于 EnKF 资料同化系统研究对 TC 预报的影响,本文详细探讨了我国广州站地基多普勒雷达径向风的 EnKF 同化对 2012 年台风“韦森特”模拟结果的影响,发现在台风“韦森特”登陆前最强阶段,以 30 分钟间隔同化雷达径向风超级观测(superobservation, 简称 SO)得到的集合平均分析场能够快速捕捉到与实际观测十分接近的紧密深厚的台风暖核结构。同化雷达径向风观测能有效地减小台风周围大尺度风场和温度场误差。基于同化后的集合平均分析场所做的确定性预报中,台风的路径、结构、强度以及伴随着的强降水分布预报都得到了显著提高。此外,本文还通过对基于同化后的集合分析场所做的集合预报的敏感性分析,进一步探索了影响台风“韦森特”路径、强度以及降水预报的关键性因子。发现台风“韦森特”的强度和降水预报都十分依赖于初始场中台风涡旋的强度和位置与引导气流的关系。

尽管地基雷达能够有效地改善台风的预报特别是强度预报,然而地基雷达不能覆盖距离海岸线 100 km 以外的区域,静止卫星观测则可以作为强有力的补充。本文接着考察了全天气条件下的静止卫星观测资料同化对 2015 年大西洋飓风 Joaquin 和 2017 年登陆我国的台风“天鸽”的强度和结构模拟的可能影响。结果表明,不论是新一代静止气象卫星还是上一代静止气象卫星,连续循环同化其全天气条件下的高层水汽通道观

测都能极大地提高数值模式对 TC 强度和结构的预报。同时同化卫星观测和常规观测试验相较于仅同化常规观测资料试验的预报结果对 TC 的强度预报误差减小了超过 50%，并能够很好地预报出 TC 的快速增强过程。此外，还发现同化时空分辨率更高的新一代静止卫星能够更加快速地模拟出 TC 的结构和强度。这为我国新一代风云四号 (FY-4A) 静止卫星的 EnKF 同化应用研究奠定了重要基础。

关键词：热带气旋，雷达径向风，静止卫星，资料同化, EnKF

# Impacts of high-resolution observation on the forecasts of tropical cyclones (TCs) using ensemble Kalman Filter (EnKF)

Lei Zhu (Meteorology)

Directed by Prof. Zhiyong Meng

## ABSTRACT

The disaster caused by the landfalling tropical cyclone (TC) is one of the deadliest natural disasters in China as well as over the world, while the current forecasts on TC by operational numerical weather prediction (NWP) model is far from being perfect, especially on the forecasts of TC structure, intensity and precipitation. One of the most important reasons is that TCs are generated on the tropical ocean and spend most of their lifetime on the ocean where there is a severe lack of observations, so the initial conditions of NWP can not accurately describe the detailed structures of TCs. With the development of the Doppler radar observation network in the coastal areas of China and the gradual operationalization of the new generation of high-resolution geostationary satellites, the observations are able to provide the detailed structures of TCs. However, the capability of NWP in using the high-resolution observations to improve TC prediction is still very limited.

Using a WRF-based (Weather and Research Forecast) EnKF (Ensemble Kalman Filter) system through a series of numerical experiments, this work explored the impacts of observations from ground-based Doppler radar in mainland China, last-generation geostationary satellite GOES-13 (America) and the first operational new-generation geostationary satellite Himawari-8 (Japan), on the forecasts of TC, particularly on the intensity and structure.

This is the first time that the Doppler radar observations in Mainland China were used to study those impacts on TC through a convection-permitting WRF-EnKF system. The case used in this study is Typhoon Vicente (2012) and only Guangzhou radar radial velocity data was assimilated. With every 30-minute interval data assimilation, the ensemble means of EnKF analyses are able to capture the detailed warm-core structure of Vicente well. The radial velocity observations can efficiently decrease the errors in large-scale wind and temperature fields. The deterministic forecasts initialized from the EnKF analyses can significantly improve forecasts of TC track, structure, intensity and precipitation. In addition, the ensemble forecasts and sensitivity analyses were further used to explore the key factors that controlled the prediction and predictability of TC track, intensity, and rainfall during and after its landfall.

Results showed that TC Vicente's intensity and precipitation forecasts were largely dependent on the initial relationship between TC intensity and location and the initial steering flow.

Though the ground-based radar data can efficiently improve the forecasts of TCs, particularly on the intensity forecasts, the ground-based radar can only cover quite limited region off the coast. Geostationary satellite observation is a complement. This study explored the possible influence of the geostationary satellite observations under all-sky condition on the forecasts of the intensity and structure of Hurricane Joaquin (2015) and Typhoon Hato (2017). Through continuously assimilating the satellite radiance from water vapor channel of the GOES-13 and Himawari-8 data under all-sky condition, the forecasts of the TC intensity and structure were improved significantly. The high-resolution observations of satellites are particularly useful in improving the simulation of the rapid intensification. Results also showed that the observations from the new generation satellite Himawari-8 were able to improve the forecasts more rapidly. These results paved the way to study the impact of assimilating new generation stationary satellite FY-4A using EnKF.

**KEY WORDS:** tropical cyclone, Doppler radar, geostationary satellite, data assimilation, EnKF

## 目录

摘要.....	1
ABSTRACT.....	3
目录.....	5
第一章 引言.....	7
1.1 研究意义.....	7
1.2 研究进展和科学问题的提出.....	8
1.3 研究内容与创新点.....	13
1.4 文章结构.....	14
第二章 模式介绍.....	15
2.1 数值预报模式.....	15
2.2 资料同化系统.....	16
2.3 辐射传输模式.....	18
第三章 我国雷达径向风的同化.....	21
3.1 引言.....	21
3.2 个例介绍.....	21
3.3 研究方法.....	22
3.3.1 试验设置.....	22
3.3.2 广州站多普勒雷达数据处理和超级观测制作方法.....	23
3.3.3 试验流程.....	23
3.4 同化雷达径向风前后结果分析.....	24
3.4.1 台风路径和最低海平面气压.....	24
3.4.2 台风“韦森特”的三维结构.....	26
3.5 同化后分析场做的确定性预报结果分析.....	32
3.5.1 台风“韦森特”的路径和最低海平面气压.....	32
3.5.2 降水及其危害.....	33
3.6 集合预报和敏感性分析.....	36
3.6.1 台风路径和最低海平面气压.....	36
3.6.2 24 小时累积降水.....	37
3.6.3 基于集合预报的敏感性分析.....	40
3.7 本章小结.....	45

第四章 美国静止卫星 GOES-13 全天气条件下红外水汽通道观测的同化 .....	47
4.1 引言 .....	47
4.2 个例介绍 .....	47
4.3 试验设计和方法 .....	49
4.4 检验同化系统同化全天气条件下卫星观测效果 .....	50
4.5 试验结果分析 .....	51
4.5.1 EnKF 集合平均分析场做的确定性预报 .....	51
4.5.2 检验水汽红外辐射 .....	53
4.5.3 红外辐射观测对飓风 Joaquin 的风场和湿度结构的影响.....	55
4.5.4 全天条件下的卫星水汽通道观测对 Joaquin 暖核结构的影响.....	59
4.5.5 Rad 和 NoRad 试验对飓风结构模拟的差异 .....	61
4.6 本章小结 .....	66
第五章 新一代静止卫星向日葵 8 号全天气条件下红外水汽通道观测的同化.....	69
5.1 引言 .....	69
5.2 个例介绍 .....	69
5.3 试验设置与方法 .....	70
5.4 试验结果分析 .....	72
5.4.1 同化前后集合平均分析场与观测对比 .....	72
5.4.2 同化卫星观测对水平风场和可降水量的影响 .....	74
5.4.3 同化卫星观测对预报的影响 .....	76
5.5 本章小结 .....	77
第六章 总结 .....	79
参考文献 .....	83
致谢 .....	89
北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明 .....	91

## 第一章 引言

### 1.1 研究意义

热带气旋(tropical cyclone, 简称 TC)引起的灾害是世界上最严重的自然灾害之一。中国平均每年有 7 个热带风暴级别及以上的 TC 登陆, 往往造成巨大的经济损失和人员伤亡(Zhang et al. 2009)。准确的 TC 路径、强度及其伴随的强降水预报对于提醒公众提前做好防范, 以减少人民的生命财产损失极为重要。

过去几十年中, 数值模式对于 TC 预报的提高主要表现在路径上, 而对 TC 强度、结构以及伴随的降水预报几乎没有实质性的改善(Rappaport et al. 2009; 张守峰 等 2015)。如今 48 小时业务路径预报误差已经减小到甚至低于 10 年前 24 小时的路径预报误差(Chan and Gray 1982; Cangialosi and Franklin 2016)。虽然数值模式能够对 TC 的路径预报得很好, 但是 TC 强度、结构和降水方面的预报误差往往会造成巨大灾害, 如 2012 年台风“韦森特”和 2017 年台风“天鸽”。因此, 提高 TC 的强度、结构和降水的预报准确度是当前 TC 数值预报的关键。

数值模式对 TC 强度、结构和降水的预报困难主要来自初始场对 TC 内核(距离中心 300 km 以内的区域)结构的描述不够准确。通过机载雷达观测分析表明, TC 眼墙区域存在很小尺度的涡旋对流, 这些涡旋对流对 TC 动力结构的形成有重要影响 (Mark and Houze 1984), 它们之间及其与其他尺度系统的相互作用会影响 TC 强度和结构的演变 (Reasor et al. 2005)。云解析数值模拟结果也显示, TC 的内核结构具有很强的随机非对称性, 其中的对流涡旋常常仅为几公里尺度(Nguyen et al. 2008; Fang and Zhang 2011)。因此, 准确的 TC 强度和结构预报需要能够有效同化反应 TC 涡旋结构的高时空分辨率观测信息的高分辨预报模式。

由于 TC 生成于海上, 其生命期的绝大部分时间都在海上, 遥感探测是较常用的能够描述 TC 内核结构的观测手段。美国的研究显示, 随着观测技术、数值天气预报模式和资料同化方法的巨大进步, 使用先进的集合同化方法同化高时空分辨率的多普勒雷达遥感观测资料能够显著地提高数值模式对 TC 强度的预报(Zhang et al. 2011; Weng and Zhang 2012; Zhang and Weng 2015)。我国沿海地基多普勒气象雷达观测网已经建设得很完善, 尤其在东南沿海区域的雷达密度甚至超过美国沿海(Zhu et al. 2016), 然而, 这些多普勒雷达获得的高时空分辨率观测还没有通过先进的集合同化系统应用到对登陆或沿海岸 TC 预报研究中, 因而考察我国沿海多普勒雷达在数值模式中的同化对登陆我国 TC 强度预报的影响意义重大。

尽管地基多普勒雷达能够有效地改善台风的预报特别是强度预报, 然而地基雷达

不能覆盖距离海岸线 100 km 以外的区域。静止卫星观测则可以作为强有力的补充，特别是新一代静止气象卫星能够提供反应 TC 内核精细结构的高时空分辨率资料。前人关于静止卫星的同化研究多局限于晴空条件下观测，对包含能够反应 TC 内核结构的有云条件下的观测资料的同化工作刚刚起步，目前的研究还没有展示出新一代静止卫星全天气条件下辐射资料的同化对 TC 强度预报的明显改善效果。因而随着日本向日葵 8 号和我国新一代风云四号(FY-4A)静止卫星被依次投入业务运行，考察新一代静止卫星全天气条件下红外辐射观测资料的同化对 TC 强度预报的影响有着十分重要的科学意义和实际应用价值。

总而言之，使用先进的 EnKF 同化手段考察我国地基多普勒雷达以及静止卫星特别是新一代静止卫星全天气条件下的红外辐射观测对 TC 强度预报的可能影响，具有重要的科学意义和实际应用价值，研究结果将为我国未来 TC 强度预报能力的提高以及业务资料同化系统的改善提供重要的科学参考。

## 1.2 研究进展和科学问题的提出

提高 TC 强度预报准确率的重要手段之一是改善数值预报初始场，使其能够较准确地反应 TC 的初始结构。实现这一点的关键手段就是使用先进的资料同化方法有效同化能够反应 TC 内核结构的高时空分辨率观测资料。前人无论是在观测资料的使用还是同化方法的改进上都做了大量的工作。

在能够获得 TC 内核结构的有限观测平台中，多普勒雷达观测的同化对 TC 强度预报的影响首先引起了人们的关注。多普勒雷达的径向风观测与模式的动力和热力变量有比较好的相关性，有可能通过资料同化改善模式初始场中 TC 的结构从而改善 TC 强度的预报。多普勒雷达可分为地基和机载两种。沿海地基多普勒雷达对于登陆 TC 以及靠近陆地移动的 TC 具有着很强的监测能力。

地基多普勒雷达资料的同化在 TC 中的应用初期多使用变分方法。然而由于变分方法使用气候态的背景误差协方差，主要针对天气尺度特征有比较好的改善，并不能准确反映 TC 真实的结构尤其内核区域具有强随机非对称性结构特征，因而地基多普勒雷达资料的同化对 TC 强度的预报一直没有明显的提高(Zhao and Xue 2009; Zhao et al. 2012a, 2012b; Lin et al. 2011; 沈菲菲 等 2015)。

90 年代末开始，另一种先进的基于集合的资料同化方法，Ensemble Kalman Filter (EnKF) 开始用于大气科学领域(Houtekamer and Mitchell 1998)，并因其具有流依赖的背景误差协方差、不需要切线性和伴随模式因而易于植入各种数值模式、与集合预报结合紧密、能够用于非线性系统等优势很快得到广泛关注与应用。EnKF 同化方法初期主要用于全球模式的大尺度天气系统(Evensen 2003; Hamill and Whitaker 2005)。

针对对流尺度使用 EnKF 对多普勒雷达资料的同化开始于 2003 年。Snyder and Zhang (2003)在观测系统模拟试验(observation system simulation experiment, 简称 OSSE) 框架下首次将 EnKF 方法应用到云分辨模式中, 通过对模拟的多普勒雷达径向风的同化显著改善了一次超级单体雷暴过程的风场、温度和湿度等变量。Caya et al. (2005)显示 EnKF 在对流尺度模式中同化相同的观测得到的分析场明显优于 4DVar (four-dimensional variational data assimilation)同化效果。很多研究表明, EnKF 在更加复杂的对流尺度数值模式中同化各种不同的观测资料均能改善预报效果(Tong and Xue 2005; 许小永 等 2006; Fujita et al. 2007; 陈杰 等 2012; 秦琰琰 等 2012; 闵锦忠 等 2013)。

由于中尺度和区域尺度系统往往是各种尺度系统复杂相互作用的结果, 相较于大尺度和对流尺度的众多研究, EnKF 直到 2006 年才首次在中尺度区域模式同化预报中得到研究与应用(Zhang et al. 2006; Meng and Zhang 2007, 2008a, 2008b; Torn and Hakim 2008a, 2009a; Aksoy et al. 2009, 2010)。个例试验和长期同化预报试验研究表明, EnKF 能够在复杂的中尺度系统中有效同化各种不同的常规观测, 显著减小初始场中的动力和热力变量误差, 从而提高预报能力。同时发现, 在同样的模式框架下使用 3DVar (three-dimensional variational data assimilation)和 4DVar 同化相同的观测, EnKF 效果明显优于传统的 3DVar, 且在长期预报中甚至优于 4DVar。

使用中尺度 EnKF 方法针对 TC 的地基多普勒雷达资料的同化试验首先开始于美国。Zhang et al. (2009) 在云解析尺度 WRF(Weather and Research Forecasting)模式中首次使用 EnKF 同化地基多普勒雷达径向风观测, 对飓风 Humberto (2007)进行初始化并做预报。研究发现, 同化地基多普勒雷达径向风后的集合平均分析场中的飓风位置和强度与观测很一致, 且以同化后的分析场为初始场的预报能够捕捉到 TC 快速增强过程。此外还发现, EnKF 同化结果明显优于使用 3DVar 同化相同的雷达观测。Weng et al. (2011)检验了目前最常见和最先进的三种同化方法(EnKF、4DVar 和 3DVar)在云解析模式中同化地基多普勒雷达径向风实际观测对飓风 Katrina (2005)预报的改善效果, 发现不同的初始化方法同化相同的观测得到的分析场中飓风结构、强度和位置相差很大, 其中 EnKF 和 4DVar 同化后的分析场中的飓风涡旋结构与观测十分接近, 而通过 3DVar 得到的分析场中的涡旋结构则偏离了实际观测。根据同化后分析场做的确定性预报表明, 不论路径还是强度预报, EnKF 和 4DVar 都明显好于 3DVar, 且 EnKF 的预报结果更优于 4DVar 的预报。然而, 目前几乎所有的雷达资料同化研究都是从 TC 的生成或发展阶段开始进行同化试验, 而登陆 TC 常常以最强强度或近最强强度登陆并被地基雷达观测网监测到, 因此研究在 TC 最强时刻或接近最强时刻同化雷达观测对 TC 的预报尤其是强度预报有怎样的影响具有十分重要的意义, 这是本文要研究的一个科学问题。

相对于地基多普勒雷达资料的 EnKF 同化, 机载雷达资料的 EnKF 同化对 TC 强度

预报的改善效果更加明显。目前世界上只有美国拥有针对 TC 的机载多普勒雷达径向风业务观测系统。美国已经开展了一系列机载雷达 EnKF 资料同化的研究。Weng and Zhang (2012)使用对流可解析尺度的 WRF-EnKF 系统首次检验了使用 EnKF 同化机载雷达径向风观测对飓风 Katrina (2005)预报的影响。结果表明, 基于同化后分析场做的预报在整个预报时间中都能显著减小路径和强度误差。使用飞机上独立的观测对比 EnKF 分析场中飓风涡旋结构演变特征发现, 同化机载雷达径向风观测得到的分析场能够成功捕捉到真实的飓风内核动力(风场)和热力(温度和湿度场)结构。Aksoy et al. (2012)将 Weng and Zhang (2012)的 EnKF 同化系统移植到 HWRF(Hurricane WRF)的集合资料同化系统(HWRF Ensemble Data Assimilation System, 简称 HEDAS)中, 用来在 HWRF 业务预报中实时同化 TC 内核区域观测进行涡旋初始化, 他们对飓风 Paloma (2008)的同化预报试验表明, 该系统同化机载雷达径向风观测可以显著改善分析场中的涡旋结构。

相较于上述个例研究, 批量长期的机载多普勒雷达径向风的 EnKF 同化试验进一步系统地展示了其对 TC 强度预报的显著改善效果。Zhang et al. (2011)使用云解析分辨率模式针对 2008-2010 年间大西洋上生成的 61 个 TC 使用机载多普勒雷达径向风的 EnKF 同化进行初始化并做预报, 发现使用机载雷达高分辨率径向风的 EnKF 同化对 TC 强度预报误差比业务预报误差减小近 40%。该系统第一次实时同化机载雷达观测成功地预报出了飓风 Ike (2008) 的路径和强度演变。Aksoy et al. (2013) 系统地检验了 HEDAS 同化机载雷达径向风观测对 TC 预报的影响, 他们对 2008-2011 年 83 个包含了热带低压到四级飓风的 TC 进行了初始化并做预报, 发现该系统同化高分辨率观测可以得到更加接近真实的飓风环流结构, 从而改善了 TC 的预报尤其是强度预报。Zhang and Weng (2015)对 2008-2012 年的所有登陆美国的飓风做了进一步的检验, 发现基于同化后分析场做的提前四天的强度预报误差相较于业务预报减小了 28%。这是第一次通过大量完整的试验证明, 先进的集合同化技术能够有效地将高分辨率内核区域的雷达观测同化到模式初始场中, 提高初始场中的 TC 涡旋结构, 从而提高数值预报模式对 TC 的强度和结构预报。

上述使用 EnKF 同化雷达资料对 TC 强度预报的改善均来自对雷达径向风观测的同化, 使用 EnKF 同化雷达反射率对 TC 强度预报的影响研究则相对较少。这是由于径向风观测与模式变量尤其风场存在直接的相关关系, 而反射率观测与模式变量的相关存在很大的不确定性, 模式微物理过程的描述也存在很大误差, 因此反射率观测的改善效果十分有限。Dong and Xue (2013) 检验了在 Advanced Regional Prediction System (ARPS)模式中使用 EnKF 系统同化美国两个地基多普勒雷达径向风和/或反射率观测对飓风 Ike (2008)的影响, 发现径向风和反射率观测的同化都能够提高预报能力, 但是同化径向风观测对预报的改善效果明显优于同化反射率对预报的改善。Xue and Dong

(2013) 发现仅同化最佳路径观测中的最低海平面气压(minimum sea level pressure, 简称 MSLP) 优于仅同化雷达反射率观测对飓风强度和路径预报, 在这个个例中甚至超过仅同化径向风观测对强度的预报; 同化径向风和反射率观测的同时还同化 MSLP 对于路径和强度预报的提高效果最显著。

由于世界上只有美国实现了机载雷达对 TC 的业务探测, 而受 TC 影响的国家大多都有越来越发达的地基多普勒雷达监测网, 因而开展地基多普勒雷达的 EnKF 同化是世界上大部分国家提高 TC 强度预报能力的必由之路。Wang et al. (2014)测试了台湾雷达的 EnKF 同化对台风 Jangmi (2008)预报的影响, 发现同化反演的径向风观测得到的台风结构和强度比直接同化径向风观测更接近观测, 从而更加有效地改善了台风路径、强度、结构以及降水预报。Wang et al. (2016)进一步发现反演的径向风观测在循环同化前期对台风涡旋结构和强度的改善更大, 而在后期则是同化原始径向风观测对其改善更显著。而同时同化反演的径向风观测和原始径向风观测比单独同化其中一种观测能够更好地模拟出台风结构、强度以及降水。Wang et al. (2014)还发现, 同化径向风观测的同时额外同化反射率观测对结果几乎没有影响。Yue and Meng (2017)考察了台湾地基多普勒雷达原始径向风的 EnKF 同化对台风 Morakot (2009)登陆中国大陆后的预报影响, 发现同化台湾雷达径向风观测能够提高环境流场和引导气流结构以及 TC 的位置和结构, 从而改善了后续的路径和降水预报, 同时发现位于台风内核区域的观测是提高中国大陆降水预报的决定性因素。基于同样的同化预报系统, Yue et al. (2017)进一步显示在 TC 登陆前 6 小时内同化所有雷达站观测对于路径和降水预报改善效果最理想。而且, 同化不同雷达站观测会获得差异很大的预报效果。

我国大陆有着非常稠密的地基多普勒气象雷达监测网, 尤其在沿海岸地区的雷达密度甚至超过美国。然而, 前人关于我国雷达观测对 TC 预报的影响主要使用传统的变分同化方法, 对台风的强度和结构的改善十分有限(Zhao et al. 2012a, 2012 b; 沈菲菲 等 2015), 在本研究开展之前还没有任何考察我国大陆雷达观测的 EnKF 同化对 TC 预报的影响研究。使用高效的雷达质量控制程序和先进的集合同化方法研究中国大陆沿海雷达是否能够改善登陆 TC 的预报, 尤其是 TC 强度、结构以及降水的预报, 是本文重点关注的另一个科学问题。

虽然雷达资料的 EnKF 同化能够显著提高 TC 的强度预报, 但是雷达仅能在某个较小的区域进行探测, 相较于雷达, 静止气象卫星可以实时持续地监测全球范围内的 TC, 并获得高分辨率的 TC 内核观测。类似于雷达资料的同化, 前人关于静止卫星资料同化在 TC 中的应用主要使用的也是变分方法, 虽然通过显著改善大尺度环境流场和大尺度涡旋结构减小了路径预报误差, 但没有得到对 TC 强度的显著改善(Zou et al. 2000; 2001; Zou et al. 2015)。由于卫星的辐射观测与模式变量没有很好的相关关系, 使用 EnKF 直接同化卫星辐射观测难以减小预报误差。初期, 人们关于静止卫星的 EnKF 同化主

要利用卫星反演资料(水汽和云导风等)对模式进行初始化并在一定程度上改善了对 TC 的预报。随着辐射传输模式(radiation transfer model, 简称 RTM)的发展, RTM 可以用作同化卫星观测的观测算子, 使得数值预报模式可以直接同化卫星的辐射观测。

之前关于静止卫星观测 EnKF 同化的研究主要局限在使用晴空条件下的辐射资料。这是由于受到云和降水影响的卫星观测具有非线性和不连续性, 因而存在较大误差, 同时 RTM 用于受云和降水影响的观测具有更大的误差和不确定性。Yang et al. (2017) 使用基于 WRF 模式的混合同化系统(En3DVar)同化美国上一代静止卫星 GOES-13 在晴空条件下的观测发现, 同化 GOES-13 卫星观测能够获取更加真实的大尺度湿度场和温度场, 从而进一步提高了降水预报。由于晴空条件下的观测剔除了云区的资料, 而 TC 的内核正是为云和降水覆盖的区域, 因此考察全天气条件下静止卫星观测资料的 EnKF 同化对 TC 强度预报准确度的提高十分重要。

前人使用 EnKF 同化全天气条件下的静止卫星观测首先是在理想试验的框架下进行的。Otkin (2010; 2012)针对温带气旋和对流系统, 首次在理想模式中使用 EnKF 同化受到云和降水影响的模拟红外通道观测, 显著提高了对高层云的模拟, 他们发现同化高层水汽通道观测能够最大限度地改善风场和温度场, 而低层水汽通道观测对云的结构和湿度场分布的影响更大。全天气条件下卫星资料的同化使得所有阈值的降水预报评分都得到了提高。Zhang et al. (2016)首次检验了直接同化静止卫星全天气条件下水汽通道观测资料对 TC 预报的影响。该研究使用宾州州立大学(Penn State University, 简称 PSU)的 WRF-EnKF 同化预报系统同化了美国新一代静止气象卫星 GOES-16 在全天气条件下水汽通道观测的模拟数据对飓风 Karl (2010)的影响, 同化后的分析场中飓风强度和结构相比于没有同化卫星观测试验有显著改善, 同时显著减小了温度场、湿度场与风场的分析误差和预报误差。为了合理考虑观测资料由于受云和降水影响而产生的巨大代表性误差, 该研究提出了适应性观测误差松弛法(adaptive observation error inflation, 简称 AOEI), 在背景场和观测出现很大的偏差时, 通过改变观测误差有效地同化了受云和降水污染的观测, Minamida and Zhang (2017) 进一步系统性展示了该方法的有效性, 特别是对有云和降水的区域改善效果更加明显。

相对于模拟的观测资料, 全天气条件下真实的静止卫星观测资料的 EnKF 同化对 TC 预报的影响研究还非常少, 目前还没有研究展示其对 TC 强度预报明显的改善效果。Zhang et al. (2016)显示全天气条件下真实的静止卫星观测资料的 EnKF 同化可以改善分析场中的 TC 结构和强度, 但是没有考察对 TC 预报效果的影响。Honda et al. (2018a; 2018b) 考察了日本新一代静止卫星全天条件下的真实水汽通道观测对台风 Soudelor (2015)路径、强度、结构以及降水预报的影响。结果表明, 同化卫星观测后分析场中台风内核结构和外围雨带的预报都得到了提高, 台风的强度预报也得到了一定程度的改善, 但是由于没有同化卫星资料的对照试验的强度预报误差本就不大, 静止卫星全天

气条件下的红外辐射观测资料的同化对 TC 强度预报的改善幅度很小。这些仅有的全天气条件下真实静止卫星观测资料的 EnKF 同化工作主要证明了同化全天气条件下的真实卫星观测对提高数值模式的 TC 强度预报具有很大潜力, 但还没有展示出其对 TC 强度预报明显的改善能力, 而且也没有分析同化全天气条件下的静止卫星观测对 TC 动力和热力结构特别是 TC 内核结构的改善作用。本文将针对这一问题进行探索和解答。

除了使用雷达和卫星的 EnKF 资料同化改善 TC 的预报效果, 本文还将基于集合预报结果, 探究初始场中对 TC 路径、强度以及降水预报的可能影响因子, 以提高我们对 TC 机理和可预报性的认识。前人的研究表明, TC 强度预报的不确定性可能由中层湿度场的差异和低层对流不稳定引起(Sippel and Zhang 2010), 也可能源于初始涡旋强度和上层环境场中干空气的作用(Munsell et al. 2013)。垂直风切变也可能是 TC 强度预报出现很大发散度的重要因素(Zhang and Tao 2013), 在 TC 快速增强前深层切变强度的微小差别可导致模式对快速增强过程的预报出现巨大的差异(Munsell et al. 2017)。初始场中的低层位势涡度有可能是决定 TC 最终强度的重要因素(Sippel et al. 2011)。Nystrom et al. (2018)研究了决定飓风 Joaquin (2015)的路径和强度预报的因子, 发现初始场中距离飓风中心 300 km 以外区域尤其是 600–900 km 的环境场是产生路径预报误差的最重要因素, 而距离中心 300 km 以内的区域是造成巨大强度预报不确定性的决定性因素。然而, 现有的这些研究多针对大西洋飓风, 对西北太平洋特别是登陆我国 TC 的研究还十分有限, 本文将基于我国沿海雷达径向风的 EnKF 同化预报集合, 考察初始场中对 TC 路径、强度以及降水预报的可能影响因子。

### 1.3 研究内容与创新点

本文立足于当前 TC 强度和结构预报的难点问题, 针对前人工作的局限, 考察高时空分辨率 TC 内核区域遥感观测在改善 TC 预报尤其是强度、结构和降水预报上的潜力, 具有以下创新点:

(1) 首次使用先进的对流可解析的 WRF-EnKF 同化预报系统同化了中国东南沿海地基多普勒雷达径向风观测, 展示了中国大陆雷达观测在改善台风预报尤其是强度、结构和降水预报上的潜力。

(2) 相比于前人多针对 TC 发展初期的同化工作, 本文首次展示了在台风最强时刻或接近最强时候同化雷达径向风观测对 TC 强度预报的显著改善效果。

(3) 首次展示了全天气条件下的静止卫星真实的水汽通道观测的 EnKF 同化对 TC 强度预报的显著改善效果, 揭示了卫星观测的同化对 TC 动力和热力结构的改善细节。

## 1.4 文章结构

本文的第二章介绍所使用的 3 个模式或系统：数值预报模式、集合同化系统以及辐射传输模式。第三章、第四章和第五章分别介绍同化试验的个例、试验流程和结果分析，其中第三章是关于同化我国地基多普勒雷达观测对 2012 年西北太平洋台风“韦森特”的预报影响，并探讨影响路径、强度和降水预报的因子和可预报性。第四章和第五章是关于同化静止气象卫星全天气条件下的真实观测对 2015 年大西洋飓风 Joaquin 和 2017 年西北太平洋台风“天鸽”预报的影响。第六章给出全文的总结。

## 第二章 模式介绍

### 2.1 数值预报模式

全文所采用的数值预报模式为 WRF-ARW (Advanced Research Weather Research and Forecasting)模式。该模式是一个完全可压缩, 具有欧拉模型的非静力特征, 并可以选择在静力条件下运行(Skamarock et al. 2008)。模式的标量具有守恒性。WRF 使用地形跟随、流动的气压垂直坐标, 模式顶为固定的气压层。水平网格为 Arakawa-C。时间积分采用 3 阶 Runge-Kutta 方案, 空间离散使用 2-6 阶方案。该模式支持理想模拟和实际模拟, 可以使用多种侧边界条件。还可以使用单向、双向和移动的网格选项。在编译运行方面, 可以采用单核、共享和分散的内存处理计算方法。

WRF 模式已经开发多年, 目前正处于稳定使用阶段, 是科学研究中最先进且应用最广泛的大气中尺度数值预报系统。WRF 模式的源代码由美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, 简称 NCAR)的中小尺度气象部门(Mesoscale and Microscale Meteorology Division, 简称 MMM)维护和开发, 包含: 主模块(单项嵌套、双向嵌套以及可移动网格)、预处理模块(WRF Preprocessing System, 简称 WPS)、资料同化模块(3DVar、4DVar、EnKF 以及混合同化)以及后处理和可视化模块[NCAR Command Language (NCL)和 Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers (VAPOR)等]。该系统能够进行几米尺度到几十上百公里的多尺度系统模拟, 可以用到众多科学研究和教学中, 包含: 理想模拟(大涡模拟、对流尺度以及斜压波等)、参数化研究、资料同化研究、科研预报研究、实时数值天气预报、TC 研究、区域气候模拟研究、耦合模式应用以及教学工具。具体 WRF 模式的结构和流程如图 2.1.

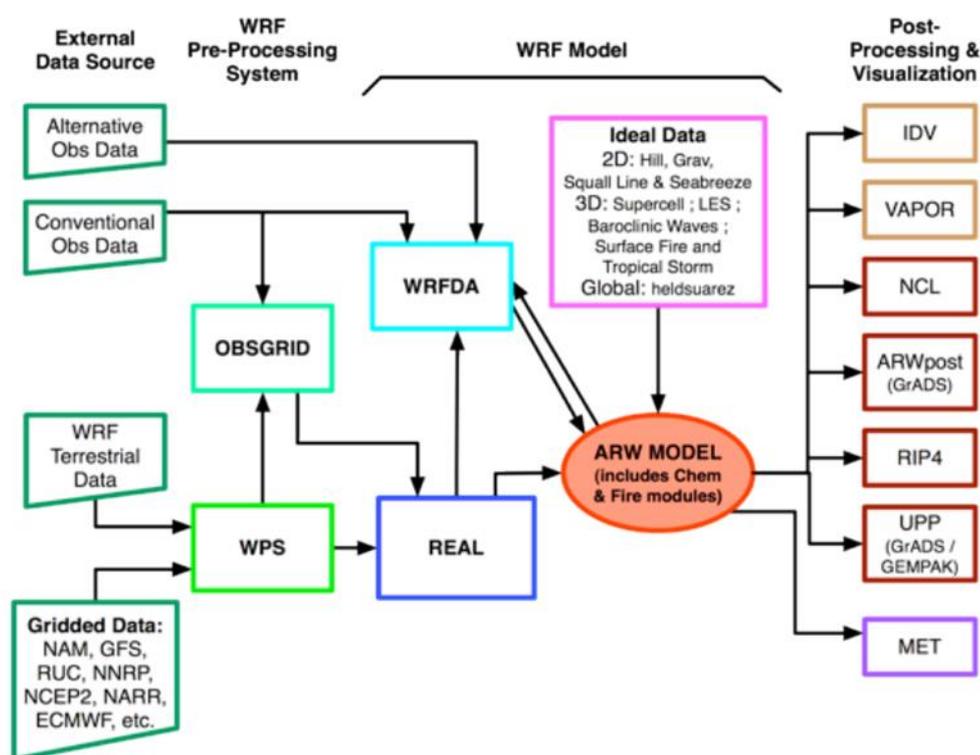


图 2.1 WRF 模式结构图(来源于 WRF 官方手册)

## 2.2 资料同化系统

资料同化系统使用了宾州州立大学 (Penn State University, 简称 PSU)开发的基于 WRF 模式的集合卡尔曼滤波同化系统 (EnKF), 该系统最初开发用于区域尺度资料同化(Meng and Zhang 2008a, b)。它使用集合预报估算出当前条件下具有流依赖特性 (flow-dependent)的背景误差协方差 (Evensen 1994)。相较于变分同化方法, EnKF 还可以通过集合预报结果估算出预报的不确定性。有能力同化从对流尺度到区域尺度的多尺度观测 (Snyder and Zhang 2003; Dowell et al. 2004; Zhang and Snyder 2007)。此外, EnKF 能够有效地缩短数值模式的 spin-up(从起始预报到模式稳定阶段)时间, 并在对 TC 预报初始化上优于在初始场中植入人造的涡旋方法(vortex bogussing)和传统的变分同化方法(variational data assimilation)。

Evensen (1994)在一篇地球物理学文章中首次提出 EnKF 方法, 它是卡尔曼滤波 (Kalman Filter, 简称 KF)方法的最优线性同化技术的近似处理。KF 方法通过所有变量信息的计算得到最精确的流场状态, 同时还能提供由于各种不同信息来源的不确定性而引起的流场状态的不确定性。KF 更新模式变量方程是:  $x^a = x^f + K(y - Hx^f)$ ; 其中  $x^f$  代表同化前的初始状态估计,  $x^a$  为同化后的状态分析场,  $y$  是观测矢量,  $H$  是观测算子, 用于计算给定的观测在模式中的对应值,  $K$  被称为 KF 的增益矩阵, 可以用公式表达

如： $K = P^f H^T (H P^f H^T + R)^{-1}$ ；其中  $P^f$  和  $R$  分别表示背景误差协方差和观测误差协方差。在 EnKF 中， $P^f$  是通过一组短期集合预报得到，因此极大地简化了 KF 中增益矩阵  $K$  的计算。

PSU 的 WRF-EnKF 系统采用了一种叫作均方根集合卡尔曼滤波(Square Root Ensemble Filter, 简称 EnSRF)的同化方法。该方法是由 Whitaker and Hamill (2002)提出，可以通过不扰动观测而达到避免系统性低估同化后的集合误差协方差。EnSRF 使用不同的增益矩阵  $K$  更新集合平均和集合偏差：使用正常的增益矩阵  $K$  更新集合平均，而使用缩小的增益矩阵  $K$  更新集合偏差。缩小的增益矩阵  $K$  是用原始的增益矩阵  $K$  乘以一个在 0-1 之间的系数，该系数仅依赖于观测和背景误差协方差。EnSRF 在同化过程中逐一同化观测，一次只同化一个观测，这样避免了需要计算复杂的均方根矩阵。

为了同化高分辨率观测中包含的多种尺度的大气状态信息，如雷达观测和卫星观测，同化系统中使用了连续协方差局地化方法(successive covariance localization, 简称 SCL)。该方法还能用于减小计算量和样本误差。并采用 Gaspari and Cohn (1999)提出的第 5 阶相关函数法处理局地化影响半径(radius of influence, 简称 ROI)，在对不同的观测组中使用不同的局地化 ROI。SCL 是一种具有多尺度同化性质的方法。首先，使用相对较大的 ROI 同化较少的观测以消除初始场中的大尺度误差；然后使用较小的 ROI 同化稠密的观测消除小尺度误差。该过程在同化系统中一直重复运行直至所有尺度的误差都得到有效消除。SCL 方法也存在着一定的缺陷，它可能会引起分析场中更新变量的不平衡。该系统还使用协方差松弛法(Zhang et al. 2004)，该方法会在每次同化循环后增大背景误差协方差，以弥补由于其他因素引起的背景误差协方差存在系统性低估问题。与在所有的模式变量格点上都通过一定系数放大的传统松弛法(Anderson 2001)不同，这种协方差松弛法则仅在更新的变量点上通过在同化前扰动和同化后扰动的权重平均来更新背景误差协方差。该权重系数在实际观测资料同化中常设置为 0.7-0.8，理想试验中为 0.5。更详细的关于 EnSRF 背景知识介绍可以参考 Snyder and Zhang (2003) 和 Whitaker and Hamill (2002)。

该系统使用 WRF 的 3DVar (Barker et al. 2004)中默认的背景误差协方差“cv3”选项进行随机平衡扰动初始场生成初始扰动集合场。扰动变量包含水平风场、位势温度和水汽混合比，对应的扰动误差分别为  $2\text{m s}^{-1}$ 、 $1\text{K}$  和  $0.5\text{g kg}^{-1}$ ，这些误差和 FNL 再分析资料的分析误差相近。在同化过程中更新的变量包括：扰动位势温度、垂直速度、水平风场、水汽混合比、云水、雨水、扰动位势高度、扰动干空气质量、水平面气压以及扰动气压。随后再将 3DVar 产生的初始集合扰动分别叠加回原始的初始场中形成模式的初始集合成员。再经过一定时间的集合预报得到近似实际具有流依赖特征的背景误差协方差，用于接下来的同化试验。此外，使用与扰动初始场相类似的方法用于获取初始集合侧边界。

在全文所有的同化试验中所采用的通用设置为：集合成员数为 60，模式的三重网格中都进行同化，并为了增大背景误差协方差的发散度，松弛系数设置为 0.8。

### 2.3 辐射传输模式

通过卫星获取的观测无法直接用在同化系统中，本研究中卫星资料同化部分采用了由美国卫星资料同化联合中心(Joint Center for Satellite Data Assimilation, 简称 JCSDA)研发的快速辐射传输模式(Community Radiative Transfer Model, 简称 CRTM), 作为卫星资料同化的观测算子。它是基于不同的卫星传感器(通道)的辐射传输模式，目前支持超过 100 多个不同的传感器，包括大多数气象卫星和一些其他方向的遥感卫星。

CRTM 由四个主要的模块组成：气体透过率模块、表面发射和反射模块、云和气溶胶吸收和散射模块、以及辐射传输终端模块。该模式为了满足公众的各种不同需求，提供给用户众多不同选项：选择输入地表辐射率、选择多个传感器通道、散射计算的内容、航空器高度上的上升流辐射计算方法、以及气溶胶的光学厚度计算方法。图 2.2 展示了给使用者的接口模块和提供给开发者的内部模块示意图。其中，CRTM 的向前模式(forward model)用于模拟卫星观测的辐射，这能够用来检验计算的精确性、不确定性以及长期的稳定性。它使用 K 矩阵模块计算雅各比值(Jacobian values) (如从辐射推导地球物理参数)，主要用于反演程序中的辐射模拟。切线性模式和伴随模式与 K 矩阵模块相类似，它们还能够用于辐射模拟的应用中。CRTM 提供给用户可以连接到其他模式的数据库(library)，而不是提供可以直观看图的图形接口。

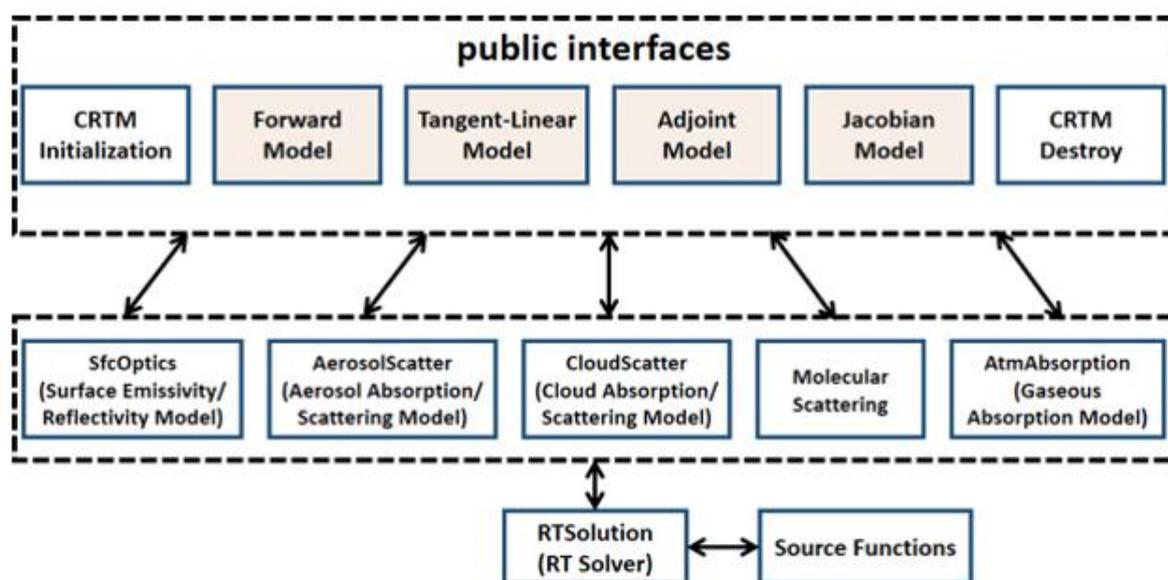


图 2.2 CRTM 模式结构(来源于 CRTM 官方手册)

在 CRTM 初始化中，用户需要选择传感器通道和地表发射与辐射量。此外，开发者们可以将他们自己意图或特长植入到 CRTM 中以满足自己的应用需求，但这部分可

能需要在 CRTM 开发团队的协助下完成。

气体透过率是描述大气气体吸收，以达到能够将遥感信息运用到资料同化和反演系统中获取大气温度的湿度和如 CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CO 和 CH<sub>4</sub> 等示踪气体。气溶胶模块主要用来获取气溶胶类型和浓度，以进行空气质量研究。云模块包含 6 种中云的光学特性，为天气预报和气候研究提供辐射强迫信息。CRTM 地表模块中有提供各种不同地表类型的地表静态数据和基于地理信息系统的发射和反射因子。在 CRTM 中有两种辐射方案。其中先进的双倍增加辐射法(advanced doubling-adding, 简称 ADA)常用来作为参照对比。而连续交换次序(successive order of interaction, 简称 SOD)辐射传输模式方法由华盛顿大学发展，并被应用到 CRTM 模式中用于强的散射廓线中。

对于一些新的卫星中新的传感器，当该传感器的光谱响应数据可用时，CRTM 团队就能够根据这些数据计算出光谱和透光率系数文件。一旦有这两个文件，CRTM 模式就可以用于处理该传感器的数据。CRTM 用户接口提供了向前模式、切线性模式、伴随模式以 K 矩阵函数用于计算辐射(同样还有微波辐射和红外辐射亮温)和辐射对大气和地表参数的敏感度。美国海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, 简称 NOAA)的微波积分反演系统(Microwave Integrated Retrieval System, 简称 MiRS)和 NCEP 资料同化系统(GSI)使用 K 矩阵函数法，而 WRF 模式使用切线性和伴随模式法。



## 第三章 我国雷达径向风的同化

### 3.1 引言

鉴于我国大陆沿海地区具有全世界最稠密的气象雷达网，有能力监测所有登陆和近海岸台风，而前人使用我国大陆雷达观测对台风的研究主要使用变分同化方法，对台风强度和结构预报的改善很有限，本章使用高效的雷达质量控制程序和先进的集合同化方法研究我国大陆沿海雷达是否能够更有效地改善登陆我国台风的预报，尤其是台风强度、结构以及降水的预报。

此外，本章还基于集合同化方法同化雷达观测得到的更加准确的集合分析场以及基于集合分析场做的集合预报来探索初始场中影响台风路径、强度以及降水预报的关键性因子，以提高我们对台风机理和可预报性的认识。

### 3.2 个例介绍

台风“韦森特”是2012年太平洋上第八号台风，由于该名字与东北太平洋上的TC名称相冲突，因此在2015年的第47届台风委员会年会上被除名，该名称之后由“兰恩”取代。台风“韦森特”于2012年7月18日12时在菲律宾吕宋岛东部形成热带扰动，之后沿着西北偏西方向移动横穿吕宋海峡。7月21日在副热带高压和华南地区上空反气旋支配下继续向西移动进入南海东北部。于20时，日本气象厅将其升级为热带风暴，编号为1208以及命名为“韦森特”。由于受到高空反气旋影响，南海北部长期处于高温天气背景下，致使海水温度达到30℃以上。到7月22日，赤道反气旋生成并与副热带高压脊形成鞍形气压场，引导气流减弱使“韦森特”移动缓慢几乎停滞在香港东南偏南约350 km。从7月22日18时开始，“韦森特”快速增强并发展为台风，于23日18时左右达到最强时刻，之后正面直奔珠江口并逼近珠江口西沿岸，给珠三角及广东省多处地区带来狂风暴雨；两个小时后23日20时在广东省江门市台山市沿海附近登陆(图3.1a, b)，登陆后急剧减弱并向西北偏西移动扫过广东西部，随之降为热带风暴进入广西并逐渐消散。从23日12时至24日12时，台风“韦森特”的移动过程都在广州地基多普勒雷达的监测范围内，该雷达很好地观测到台风“韦森特”的最强阶段以及登陆后减弱过程的三维结构演变。由于登陆后产生了巨大风灾和暴雨灾害，造成数十人伤亡，并带来超过20亿人民币的直接经济损失。虽然实时业务预报给出了台风“韦森特”的路径趋势，但是在精确的登陆时间和登陆点上把握仍然较差。此外，几乎所有实时业务预报对“韦森特”的强度预报严重偏弱，更加无法预报出该台风典型的快速增强过程(Shieh et al. 2013)，这也是促使本研究的重要原因之一。

### 3.3 研究方法

#### 3.3.1 试验设置

本研究的数值模拟试验使用了三重双向嵌套固定网格的 WRF 模式，网格水平分辨率分别为 40.5 km (D1)、13.5 km (D2)和 4.5 km (D3)，对应的格点数为  $202 \times 181$ 、 $181 \times 163$  和  $259 \times 259$ 。模式垂直方向共有 35 层以及模式顶设置为 10 hPa。模式最外层 D1 涵盖台风“韦森特”整个生命期所经过的区域，该分辨率能够很好地模拟出当前条件下的大尺度天气特征，最内层 D3 仅包含广州站雷达所观测到的“韦森特”过程，也是本研究同化试验的时间段(图 3.1)。模式初始场和侧边界场来源于美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, 简称 NCEP)提供的每 6 小时一次的分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的再分析资料(Final analyses, 简称 FNL)。本研究模拟所采用的物理参数化方案选择如下：Grell-Devenyi (Grell and Devenyi 2002)积云对流参数化方案，仅在 D1 网格中使用，WSM-6 (WRF single-moment 6-class, Hong et al. 2004)云微物理参数化方案，YSU (Yonsei State University, Noh et al. 2003)边界层方案，RRTM 长波辐射方案和 Goddard 短波辐射方案。

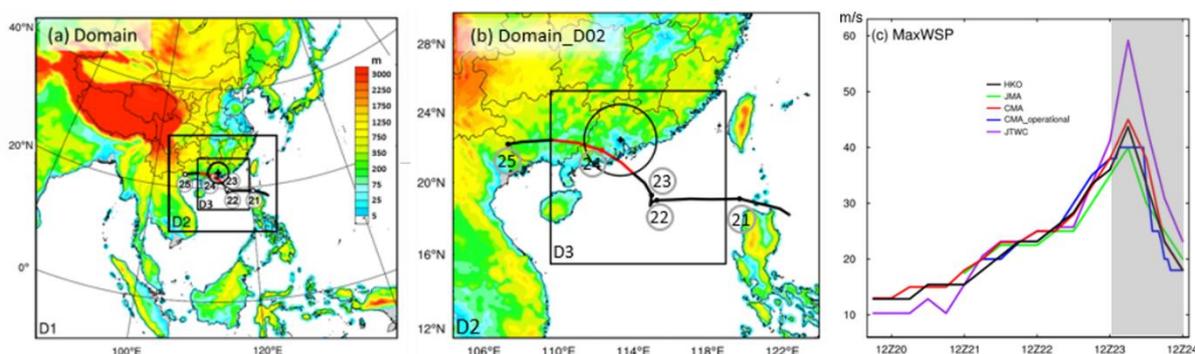


图 3.1 (a)模式网格区域，同时展示了台风“韦森特”(2012)从 2012 年 7 月 20 日 06 时至 25 日 00 时的香港天文台的最佳观测路径(红黑线条)。其中红色实线部分表示数值同化试验时段:7 月 23 日 12 时至 24 日 12 时。每天 00 时刻对应的位置用白色圆圈标出，同时还标出了广州多普勒雷达站的位置(黑色星号)和径向风覆盖范围(黑色圆圈)。(b)模式网格 D2 区域的放大版。(c)台风“韦森特”不同业务中心定义出的最大表面风速(MaxWSP)，分别对应着香港天文台(HKO)、日本气象厅(JMA)、中国国家气象局最终版(CMA)、中国气象局实时业务版(CMA\_operational)以及联合台风预警中心(JTWC)。同化区间用灰色阴影标出。

在同化试验中，三重网格的水平影响半径(Radius of Influence, 简称 ROI)分别为 1215 km (D1)、405 km (D2)和 135 km (D3)。目前对于垂直方向上的局地化影响半径的选取还在研究探讨中，没有得到共识。本文将垂直方向上的 ROI 设置为模式的整个垂直层。

相同的水平和垂直局地化方法在很多前人的研究中也有应用(Weng and Zhang 2012; Zhang and Weng 2015)。

### 3.3.2 广州站多普勒雷达数据处理和超级观测制作方法

本研究使用 WRF-EnKF 同化预报系统同化位于我国华南地区广东省广州市广州站多普勒天气雷达径向风观测。该雷达数据为 S 波段 WSR-98D 格式, 与美国的 WSR-88D 雷达数据格式相似(Zhu and Zhu 2004)。考虑到之前我国的雷达观测网仍然还在发展中, 没有用于统一处理该类型雷达观测的软件, 因此在同化前期花费了大量的精力用于雷达资料的解码和质量控制上。处理步骤如下: 首先, 将所有的三维径向风观测由 WSR-98D 格式转换成 WSR-88D 格式。然后, 使用美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, 简称 NCAR)雷达编辑软件 SOLO-II (Oye et al. 1995)对径向风观测进行手动退模糊并剔除折叠观测。最后, 采用 Zhang et al. (2009)提出的雷达径向风资料处理方法将退模糊后的观测通过严格的质量控制并制作成雷达径向风超级观测(Superobservation, 简称 SO), 这能够在剔除地面杂波影响同时还能对稠密的雷达观测进行稀疏化。SO 的具体制作过程如下:

- (1) 剔除原始径向风( $V_r$ )  $< 2 \text{ m s}^{-1}$  或  $> 70 \text{ m s}^{-1}$  或距离雷达站 4 km 以内的观测;
- (2) 将观测分为小的区块(bin): 方位角  $5^\circ$  内以及径向方向上 5 km 区域;
- (3) 对于每个 bin 内的原始  $V_r$  超过该 bin 内观测平均值两倍时, 剔除该原始  $V_r$  观测;
- (4) 对于 bin, 如果该 bin 内的标准差超过所有可用观测偏差两倍时, 剔除该 bin 中所有的观测;
- (5) 如何一个 bin 内原始观测数少于 4 个时, 则剔除该 bin 中所有观测;
- (6) 制作 SO, 对 bin 中最接近 bin 中心的 10 个观测做平均得到的观测值, 设置为 SO 的径向风值。将最接近 bin 中心的原始观测位置设为 SO 的位置。

在同化系统中, 雷达径向风观测误差设置为  $3 \text{ m s}^{-1}$ 。在同化系统中也进行一定的质量控制, 方法为: 当背景场中径向风与观测之差的绝对值大于 5 倍观测误差时, 则剔除该观测。

### 3.3.3 试验流程

试验的具体流程如图 3.2 所示。在 2012 年 7 月 23 日 00 时使用 WRF 的 3DVar 系统扰动初始场生成 60 个集合成员, 然后进行 12 小时短期集合预报以获取当时天气条件下接近实际状态的背景误差协方差。之后从 23 日 12 时开始以 30 分钟间隔循环同化 SO 直至 24 日 12 时, 这个阶段包含了台风“韦森特”从最强时刻至登陆后快速减弱消

散过程。最后，利用从 23 日 15 时至 24 日 00 时每 3 小时的同化后集合平均分析场做确定性预报。此外，为了分析影响预报的关键性因子以及检验同化更多观测对预报的不确定性影响，在 23 日 15 时和 21 时分别利用 60 个集合分析场做集合预报。为了更好地检验同化效果，使用 NCEP 的 FNL 资料从 23 日 12 时做一个不同化任何观测的单一确定性预报试验，称之为 NoDA 试验。所有的预报均预报至 24 日 18 时，因为在该时刻后台风“韦森特”几乎完全消散，便不再为本章的研究范围。

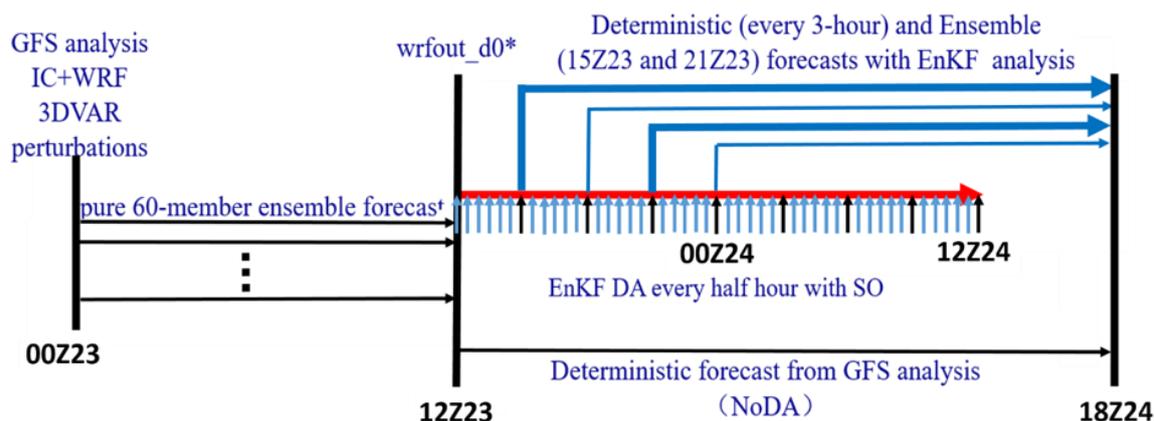


图 3.2 EnKF 试验和 NoDA 试验的试验流程图。其中小垂直箭头表示每 30 分钟间隔进行一次 EnKF 同化，包含了从 23 日 12 时至 24 日 12 时。23 日 12 时至 24 日 18 时的水平黑箭头线表示利用 FNL 再分析资料做的 NoDA 试验。此外，粗的蓝色箭头线表示利用 23 日 15 时和 21 时的集合分析场做的集合预报。

### 3.4 同化雷达径向风前后结果分析

从图 3.1c, 3.3a 和 3.3b 中可看出，各业务预报中心(香港天文台(HKO)，日本气象厅(JMA)，中国气象局(CMA)以及中国气象局业务实时观测(CMA\_operational))对台风“韦森特”的实际强度中心定义存在很大的偏差。考虑到 HKO 的最佳路径能在一定程度上体现出各业务中心的最佳路径观测特点，本研究选择将 HKO 的最佳路径观测作为参考。

#### 3.4.1 台风路径和最低海平面气压

图 3.3c 和 3.3d 中展示了台风“韦森特”连续循环同化后得到的集合平均分析场的最低海平面气压(minSLP)和中心位置随时间演变(绿线)。模拟的最大 10 米风速(MaxWSP)直接与 HKO 提供的最佳路径数据观测相比存在着很大的强度预报偏差，这是因为香港天文台提供的最佳路径中的最大地面风速观测是通过 10 分钟内的风速平均计算得到，因此本研究中仅选择将 minSLP 作为台风“韦森特”强度参照。此外，Landsea

and Frankin (2013)通过统计大西洋 TC 的研究中发现, 全球各业务预报中心提供的 TC 最佳路径数据集相互之间均存在着很大的偏差, MaxWSP 和 minSLP 的误差分别能达到  $5 \text{ m s}^{-1}$  和  $6 \text{ hPa}$ , 这其中很重要的原因是各业务预报中心对强度的计算方法和计算时所选用的观测数据不同。从图 3.3 的对比中可以很清楚地看出, 同化后的平均分析场能十分成功模拟出台风“韦森特”的强度和路径演变。如果直接将同化后的分析场结果和没有同化任何观测而直接利用 FNL 再分析资料做预报的 NoDA 试验进行对比, 可以更清楚看出同化雷达径向风观测对台风预报的影响。此外还可以发现, 同化雷达径向风观测对于台风的强度预报改善更显著。值得特别关注的是: 在循环同化两小时内仅同化 3 至 4 次雷达径向风观测便可以让同化后的平均分析场中的 minSLP 达到实际观测的强度。

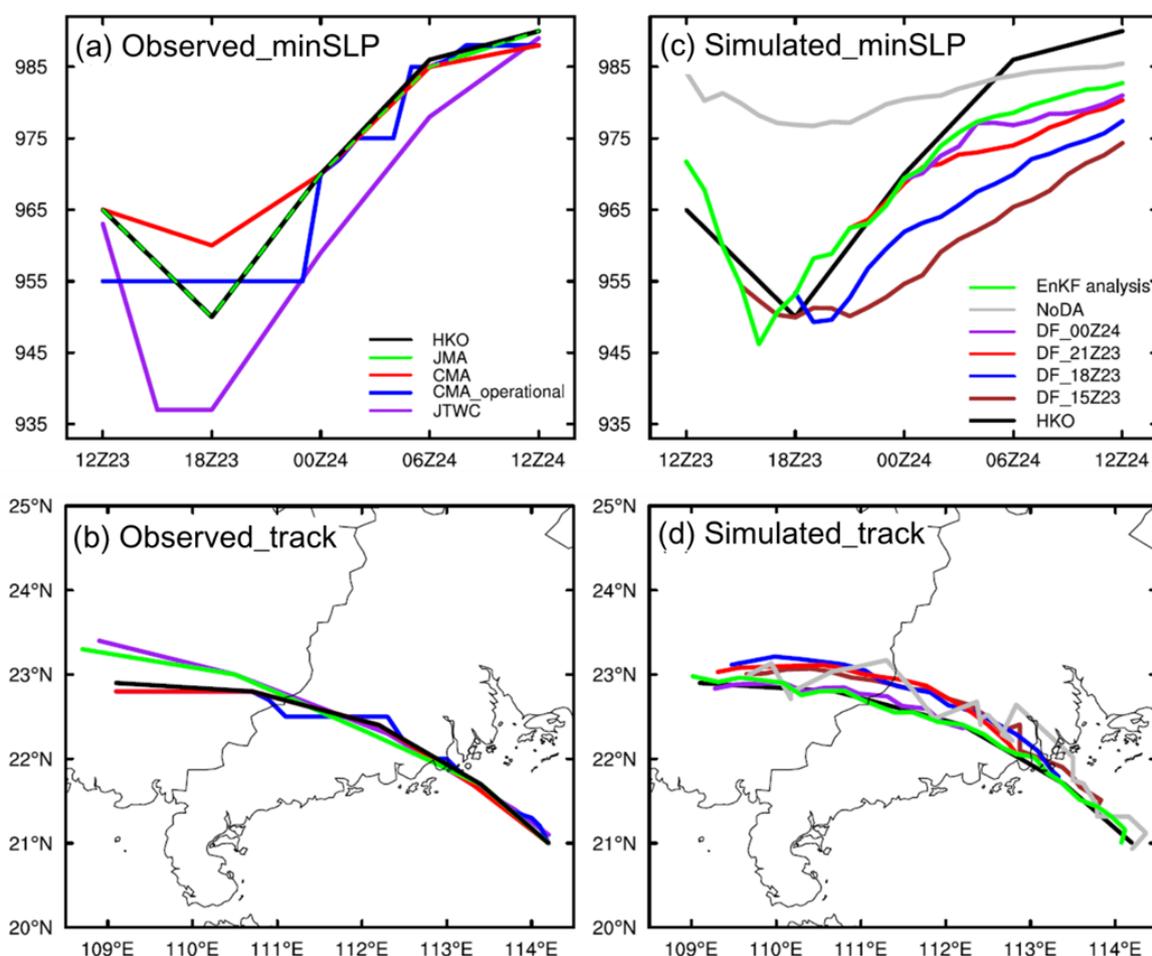


图 3.3 HKO、JMA、CMA 以及 CMA\_operational 的最佳路径观测对应的最低海平面气压(a)和路径(b), 以及同化后的集合平均分析场和利用从 7 月 23 日 15 时至 24 日 00 时的每 3 小时分析场做的确定性预报的最低海平面气压(c)和路径(d), 并与 HKO 对比。

通过误差统计分析可以看出, 除了在 7 月 23 日 16 时和在 24 日 3 时之后的时刻中, 每次同化雷达径向风观测均可以有效地减小 minSLP 误差并使其值不断向观测逼

近。从图 3.4a 中的 minSLP 绝对误差演变中可以看出，在台风“韦森特”处于最强时间段约 12 小时时间内，即同化初的 12 小时内，使用先进的同化技术同化雷达径向风观测能够十分有利于快速减小强度误差，并且可以看出 minSLP 的平均绝对误差减小达到 17 hPa。通过连续同化雷达径向风观测可以发现，同化后平均分析场中的台风路径和观测十分吻合，其中包含模拟出精确的登陆地点和登陆后在广东省内缓慢的移动路径。而在没有同化额外观测的模拟中，NoDA 试验的路径预报存在着很大偏右误差以及逐小时演变有着很大的跳跃性，可以从误差演变分析中更加清晰地看出前 12 小时预报中路径波动，路径误差时大时小，而不是连续演变(图 3.4b)。尽管可以发现在 23 日 12 时，NoDA 试验的路径误差比 EnKF 试验小，但是整体来看，同化后得到的平均分析场对路径的模拟要明显优于 NoDA 试验预报，且平均路径预报误差减小近 8 km，而在有些时刻可以得到超过 20 km 的差别(图 3.4b)。

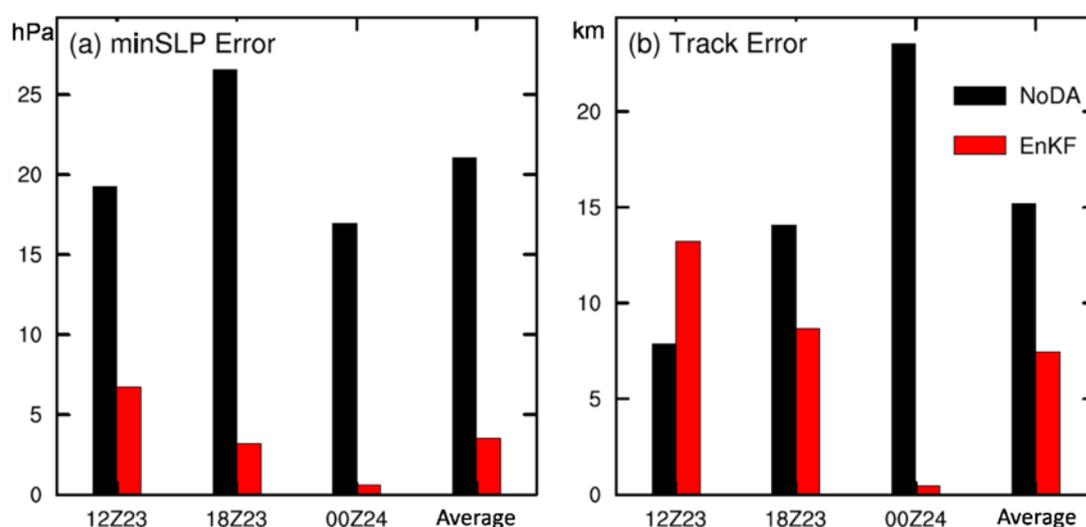


图 3.4 在临近登陆时的 EnKF 同化后分析场和 NoDA 试验在不同时刻的台风“韦森特”的强度(a)和路径(b)误差，同时还给出了所有时刻的平均误差。

### 3.4.2 台风“韦森特”的三维结构

接下来检验并讨论同化雷达径向风观测对台风三维结构的影响。图 3.5 展示了在 23 日 12 时、15 时以及 18 时的 0.5°仰角的径向风对比图，分别对应着同化后的集合平均分析场、NoDA 试验的径向风以及没有被同化的径向风观测。可以看出，仅在第一

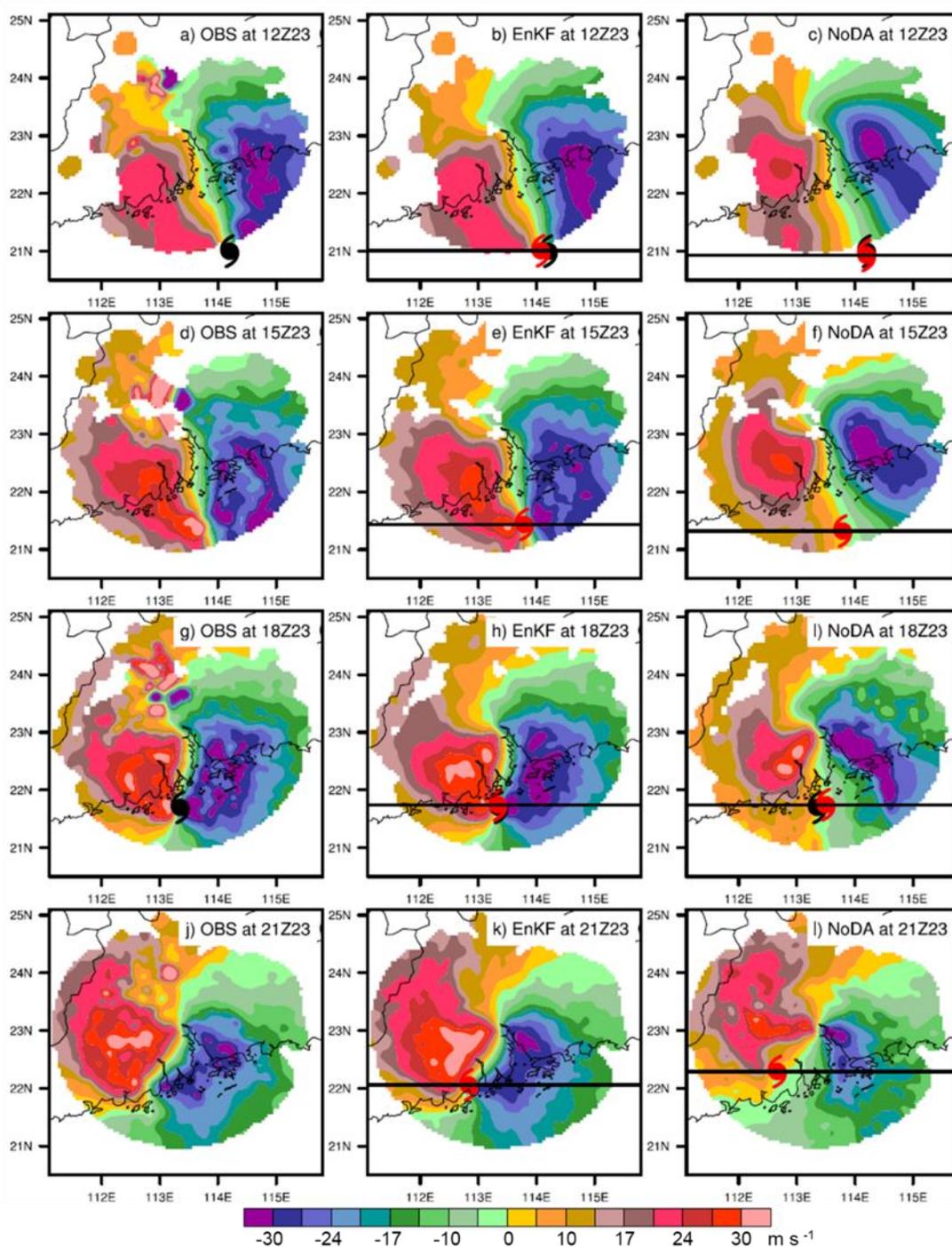


图 3.5(左边)广州雷达  $0.5^\circ$  仰角的原始径向风观测(OBS)、(中间)对应观测时刻的 EnKF 同化后分析场对的模拟径向风和(右边)NoDA 试验的径向风分布, 分别对应着 2012 年 7 月 23 日 12 时(a-c)、15 时(d-f)、18 时(g-i)以及 21 时(j-l)。台风标志表示对应时刻台风中心(红色表示模拟台风中心; 黑色表示观测台风中心位置)。

次同化径向风观测后, 同化后的平均分析场(图 3.5b)就能够模拟出实际观测中径向风的偶极子分布特征(图 3.5a)。追溯其误差减小的原因发现, 这很可能是由于分析场中能够

得到更加精确的台风结构和强度(图 3.4a 和 3.5b)。除了在复杂地形区域中展示出了小尺度特征,随着更多的径向风观测连续同化到初始场中,同化后分析场中得到的径向风结构分布不断向观测靠近,然而 NoDA 试验模拟得到的径向风结构却越来越偏离实际观测,这与模拟的位置和强度偏差有很大的关系。为了更加定量地检验同化效果,这里通过检验最内层网格 D3 区域中模拟的径向风均方根误差(RMSE)发现,在第一次同化雷达径向风观测得到的平均分析场的径向风 RMSE 比 NoDA 试验的 RMSE 减小约  $2\text{ m s}^{-1}$ (图 3.5c 和 3.6c),且误差减小最大发生在台风的最强阶段:2012 年 7 月 23 日 18 时和 21 时(图 3.6),误差减小达到  $4\text{ m s}^{-1}$ 。

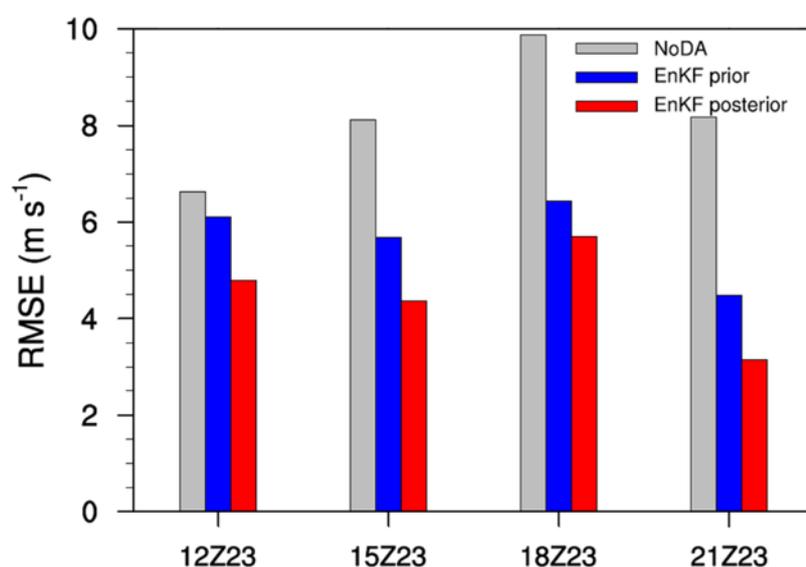


图 3.6 EnKF 同化前(蓝色)和同化后(红色)集合平均分析场中的径向风 RMSE,并与对应时刻的 NoDA 试验(灰色)对比,分别对应着 2012 年 7 月 23 日 12 时、15 时、18 时以及 21 时。

图 3.7a 展示了在所有同化时刻的同化前后和同化后分析场做的确定性预报的径向风 RMSE 演变。在台风达到最强强度前的 6 小时中,误差的增长不断增大且在最强时刻达到最大。在随后的 6 小时中随着台风“韦森特”强度减弱,误差开始逐渐减小。循环同化进行 15 小时至 7 月 24 日 3 时,分析场中的径向风误差达到饱和。随后同化观测对分析场的影响减小,这种相对较小的影响在台风“韦森特”的强度和路径演变中可以更加清晰地看出。从图 3.7b 和 3.7c 以及图 3.7d 和 3.7e 的同化前后强度和路径误差对比同样可以看出,在同化后期甚至在 23 日 21 时同化观测对台风的模拟改善效果就已经较小。

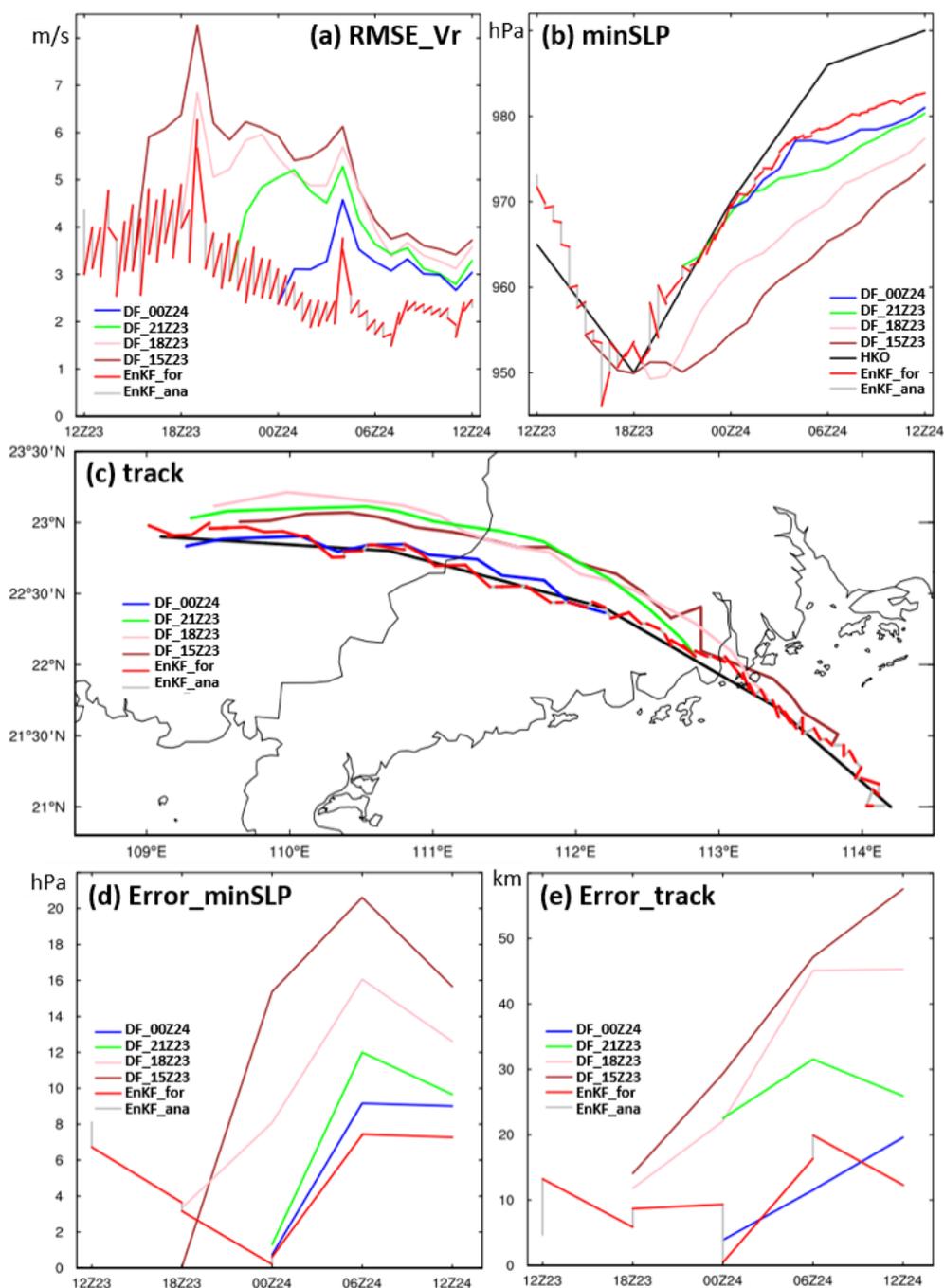


图 3.7 EnKF 同化试验和 NoDA 试验的径向风 RMSE(a)、最低海平面气压(b)、路径(c)、最低海平面气压误差(d)和路径误差(e)的时间演变。其中 DF\_表示利用同化后平均分析场做的确定性预报结果；EnKF\_for 和 EnKF\_ana 分别表示 EnKF 循环同化的同化前和同化后的集合平均结果。

为了进一步探索同化雷达径向风观测对台风的动力和热力结构影响，图 3.8 给出了不同同化时刻在 850 hPa 高度层上同化前后的水平风矢量和位势温度的增量。与图 3.5 结果相一致，在第一次同化径向风观测后的平均分析场中，台风中心周围出现一个清晰的不对称气旋性风场增量，且最大增量出现在台风中心东北向区域中(图 3.8a)，这种

非对称的气旋性风场增量会引起更强的环流(图 3.3c)。同时还可以发现, 同化后的分析场中台风内核区域的位温整体增强以及内核外围出现位温减弱现象, 与 NoDA 试验模拟的穿过台风中心的水平风风速和位温的垂直横截面分布对比可以更加清楚地看到同化径向风观测对模拟的影响效果(图 3.9a 和 3.9e)。同化后分析场中“韦森特”得到更小的最大风速半径和更加深厚的暖核结构。此外, 在台风眼墙附近能看到更强的热力梯度, 对应着更强的切向风, 这表明通过集合预报获得的协方差结构十分适合于同化观测从而改善台风内在动力和热力结构。类似地, 在第一次同化后, 距离涡旋中心较远的陆地区域内得到巨大的风场和温度场增量(图 3.8a)。这种大尺度分析增量很有可能是引起更好的路径和强度预报的关键性因子, 这将在 3.6 节中通过集合敏感性分析进行讨论。

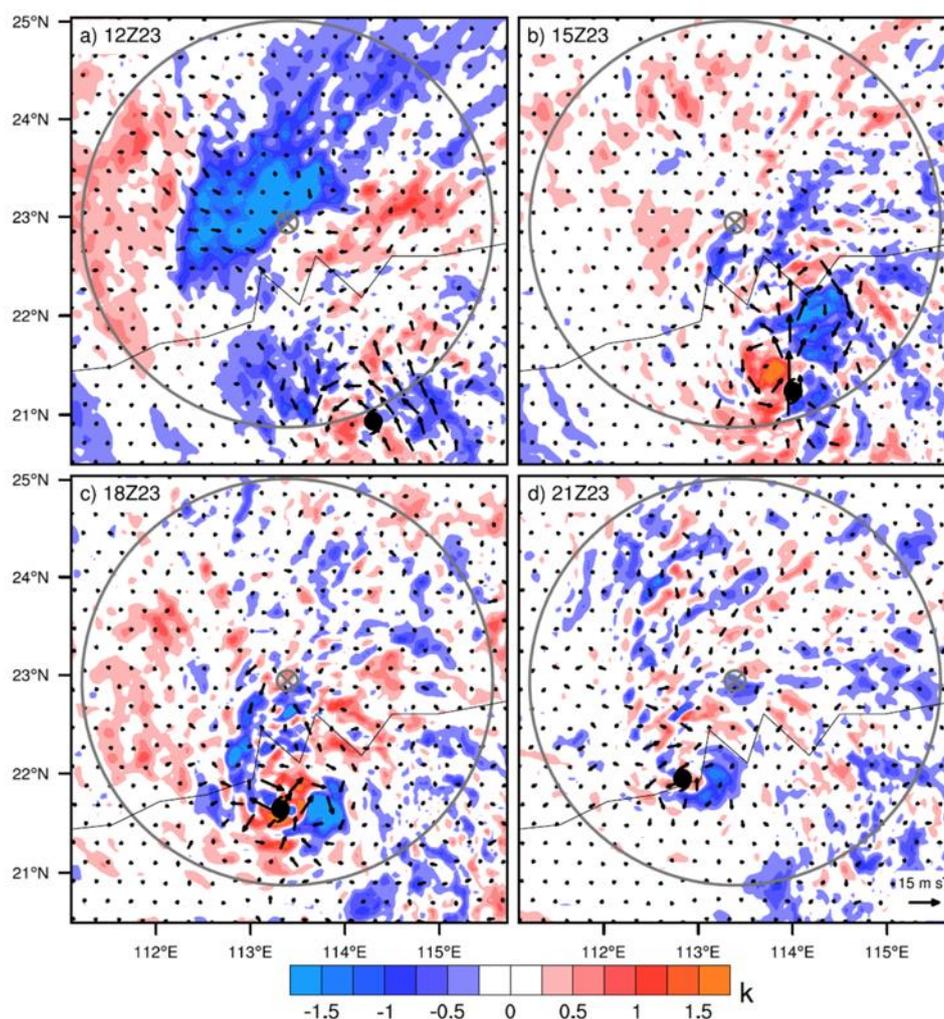


图 3.8 EnKF 同化试验在 850 hPa 高度上的位势温度(阴影)和水平风场增量(矢量), 分别对应时刻为 7 月 23 日(a)12 时、(b)15 时、(c)18 时和(d)21 时。黑色台风标志表示实际台风中心位置。灰色大圆圈表示广州雷达径向风覆盖范围。

随着同化更多的雷达径向风观测进入初始场中, 以及不断准确的同化前集合分析

场(图 3.6), 分析增量逐渐更加靠近 TC 中心及周围区域(图 3.8)。同化后的分析场相较于 NoDA 试验展示出了更紧密和更强的台风内核涡旋结构(图 3.9)。相比于同化初始时刻的同化增量(图 3.8a), 台风“韦森特”登陆后(7 月 23 日 21 时), 温度场和水平风场增量的大小和范围都显著减小(图 3.8d)。同化后分析场中台风涡旋尤其水平风速在登陆前和登陆后经历了巨大的调整(图 3.9g 和 3.9h)。由于登陆后台风涡旋和地面之间存在强烈的摩擦作用, 在台风中心涡旋的东侧边界层水平风风速显著减弱, 而在 NoDA 试验中却只有很小的表现, 这与模拟的台风路径和强度有着很大关系(图 3.9c 和 3.9d)。

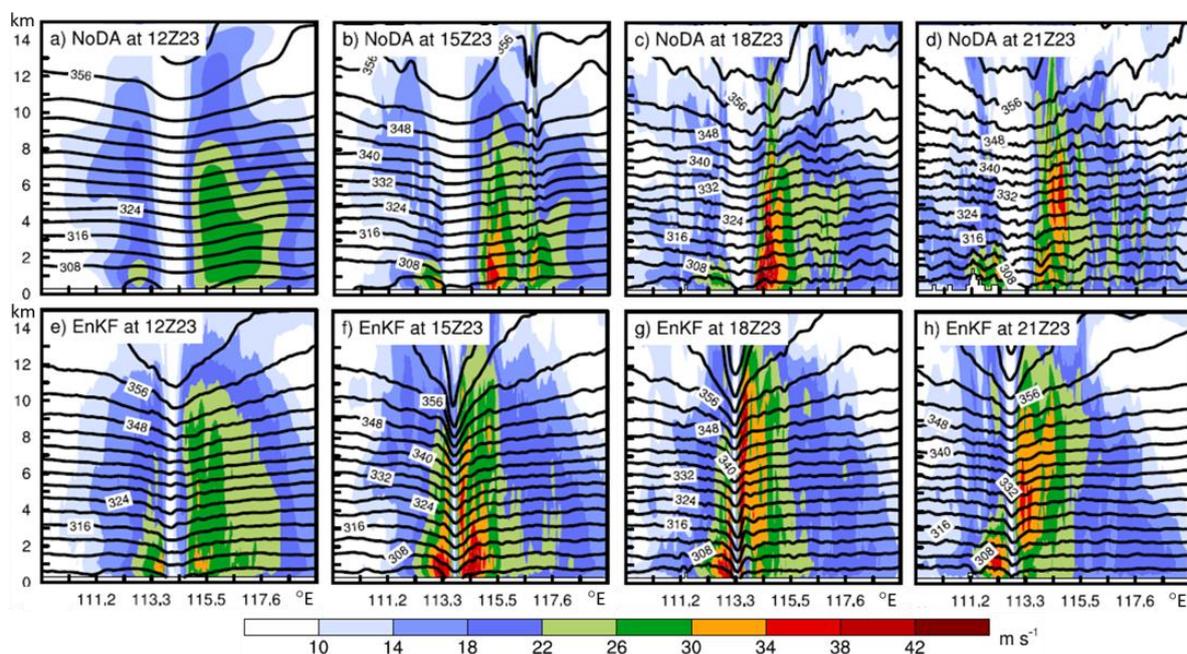


图 3.9 NoDA 试验(a-d)和 EnKF 试验(e-h)穿过模拟的台风中心的東西向的水平风速(阴影)和位势温度(黑色等值线)垂直剖面图, 分别对应着 7 月 23 日 12 时(a, e)、15 时(b, f)、18 时(c, g)以及 21 时(d, h)。

值得注意的是, 在循环同化后期台风外围区域仅有较小分散的分析增量(图 3.8c 和 3.8d)。这同样也是同化对台风动力结构影响的体现: 同化前期同化径向风观测已经能够使在台风外围区域的大尺度特征得到充分地调整, 因此表明仅较低的同化频率和稀疏的观测就能够改善大尺度环境场, 但对于台风真实的内核区域的小尺度对流特征解析则需要更多观测以及更长时间的同化。图 3.10 展示了在 850 hPa 高度上同化径向风观测后的平均分析场和 NoDA 试验的切向风的方位角平均的时间半径演变。可以看出, 尽管在 NoDA 试验中能够模拟出在登陆前有微弱的涡旋增强过程, 但是在整个模拟过程中最强切向风大小却比 EnKF 分析场中的切向风大小低约  $10 \text{ m s}^{-1}$ 。此外, 同化后的分析场中最大切向风半径仅为 NoDA 试验的一半, 进一步表明同化雷达径向风观测后可以得到更强和更紧密的台风涡旋结构。

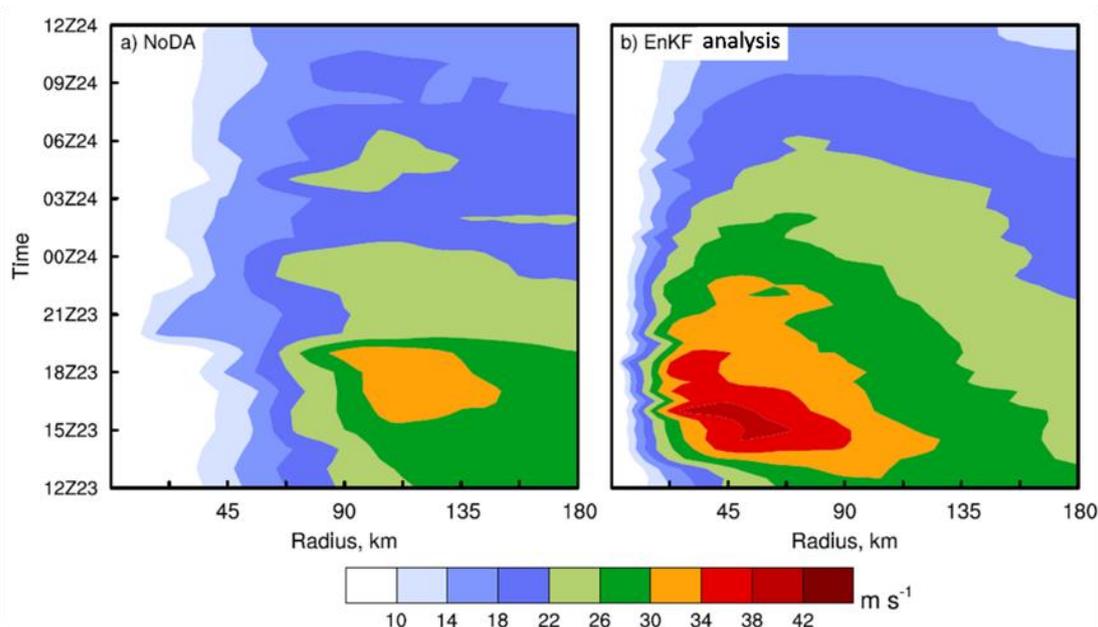


图 3.10 NoDA 试验(a)和 EnKF 试验(b)的 850 hPa 高度上的切向风风速的方位角平均的半径时间演变图。

### 3.5 同化后分析场做的确定性预报结果分析

#### 3.5.1 台风“韦森特”的路径和最低海平面气压

如图 3.2c 和 3.2d 中所展示, 随着同化越来越多的三维雷达径向风观测数据, 利用同化后每 3 小时的平均分析场做的确定性预报可以不断提高对台风“韦森特”的路径和强度预报。随着同化更多径向风观测, 同化后分析场做的确定性预报的路径预报更加平滑且接近观测, 没有出现如 NoDA 试验中出现的跳跃性。7 月 23 日 15 时、18 时和 21 时的分析场做的确定性预报的路径相较于实际观测路径存在一定偏向观测路径北侧的偏差, 而 7 月 24 日 00 时确定性预报的路径预报表现出很小的误差。15 时和 18 时的同化后分析场做的确定性预报对于“韦森特”的登陆点和登陆时间模拟都和观测很吻合(图 3.2d)。通过将所有同化分析场做的确定性预报和 NoDA 试验预报对比可以看出, 在台风登陆前对强度模拟的改善最显著。尽管存在可能由于个别强对流单体的随机特性引起的一些时间上的误差, 但是利用 15 时和 18 时的分析场做的确定性预报能够很好地模拟出台风最强强度。尽管如此, 但 15 时和 18 时的确定性预报对台风登陆后快速减弱过程预报并不很理想(图 3.2c), 这种现象在连续同化得到的平均分析场和利用登陆后的平均分析场做的确定性预报中表现并不明显。相类似结果在 Du et al. (2012) 和 Dong and Xue (2012) 的研究中也有发现, 这很有可能与数值模式对地形以及海陆相互作用描述不够精确有关。

通过对比不同时刻分析场做的确定性预报结果可以更加清楚地看出它们的相对预报表现(图 3.7a, 3.7d 和 3.7e)。就路径、强度以及径向速度而言, 同化时间越长同化更多观测可以产生更小的预报误差。在所有的确定性预报试验中, 径向速度的 RMSE 在预报前 3 小时中都快速增大, 随后以近似相同的波动幅度逐渐减小。最大的误差出现在台风最强时刻附近。

总体而言, 相较于 NoDA 试验, 通过同化雷达径向风观测得到的分析场做的确定性预报可以得到更好的路径和强度预报。这些结果十分清楚地证明了使用集合同化系统同化我国地基多普勒雷达径向风观测改善台风预报有着十分重要的意义和潜力。由于 TC 常常会在最强时刻或接近最强时刻登陆, 本文的研究是对早期 Zhang et al. (2009) 在 TC 形成阶段同化美国 WSR-88D 的地基多普勒雷达径向风观测模拟墨西哥湾上飓风 Humberto (2007)研究的一个重要补充。

### 3.5.2 降水及其危害

除了提高台风“韦森特”的路径和强度, EnKF 雷达资料同化还能改善短期降水预报。图 3.11 对比了 1 小时自动站观测降水和不同时刻的 EnKF 同化后分析场做的确定性预报的 1 小时累积降水以及 NoDA 试验预报的 1 小时累积降水, 分别对应 7 月 23 日 15 时、18 时和 21 时。在 7 月 23 日 15 时, EnKF 分析场在 23 日 12 时做的 3 小时预报的 1 小时累积降水的分布和强度相比于 NoDA 试验都得到了很大改善(图 3.11a-c)。NoDA 试验的降水面积严重大于自动站观测降水的范围, 但是对台风中心附近的降水强度模拟明显偏低。同时还可以发现同化后分析场能成功模拟出“韦森特”中心附近的强降水以及包括香港和广州在内的珠江三角洲地区的螺旋雨带, 尽管降水区域仍然比观测降水广。为了定量评估同化雷达径向风观测对降水预报的影响, 通过不同阈值(5 mm、10 mm、15 mm 和 20 mm)来检验 1 小时累积降水的 TS 评分。结果表明, 除了在阈值为 10 mm 外, EnKF 分析场做的 3 小时预报的 1 小时累积降水在所有阈值中评分都高于 NoDA 试验的降水预报(图 3.12a)。由于得到更接近实际的台风中心位置和强度, 在 7 月 23 日 18 时 EnKF 分析场做的预报(图 3.11e)比 NoDA 试验 (图 3.11f)得到的 1 小时累积降水更接近实际(图 3.11d), 其中 NoDA 试验严重高估了广东东部沿海地区的降水强度。在 7 月 23 日 18 时, EnKF 分析场做的预报对于所有阈值的 TS 评分都明显高于 NoDA 试验的降水预报评分(图 3.12b), 平均 TS 值达到 NoDA 试验的两倍, 同时还发现比 23 日 15 时 EnKF 分析场的降水预报评分高很多。虽然基于同化后分析场做的预报对降水预报存在高估现象, 但是在“韦森特”登陆时自动站观测和同化后分析场做的降水预报都表现出最强的降水(图 3.11g 和 3.11h)。NoDA 试验的降水预报几乎完全错过了在台风登陆点附近位于珠江三角洲西部的大部分强降水(图 3.11i)。同样, 虽然在

登陆阶段两者预报的 TS 都较低(图 3.12c), 但是同化后分析场的降水预报的 TS 评分明显高于 NoDA 试验的降水预报。此外还发现在 20 mm 阈值上的降水 TS 评分上得到最大改善。

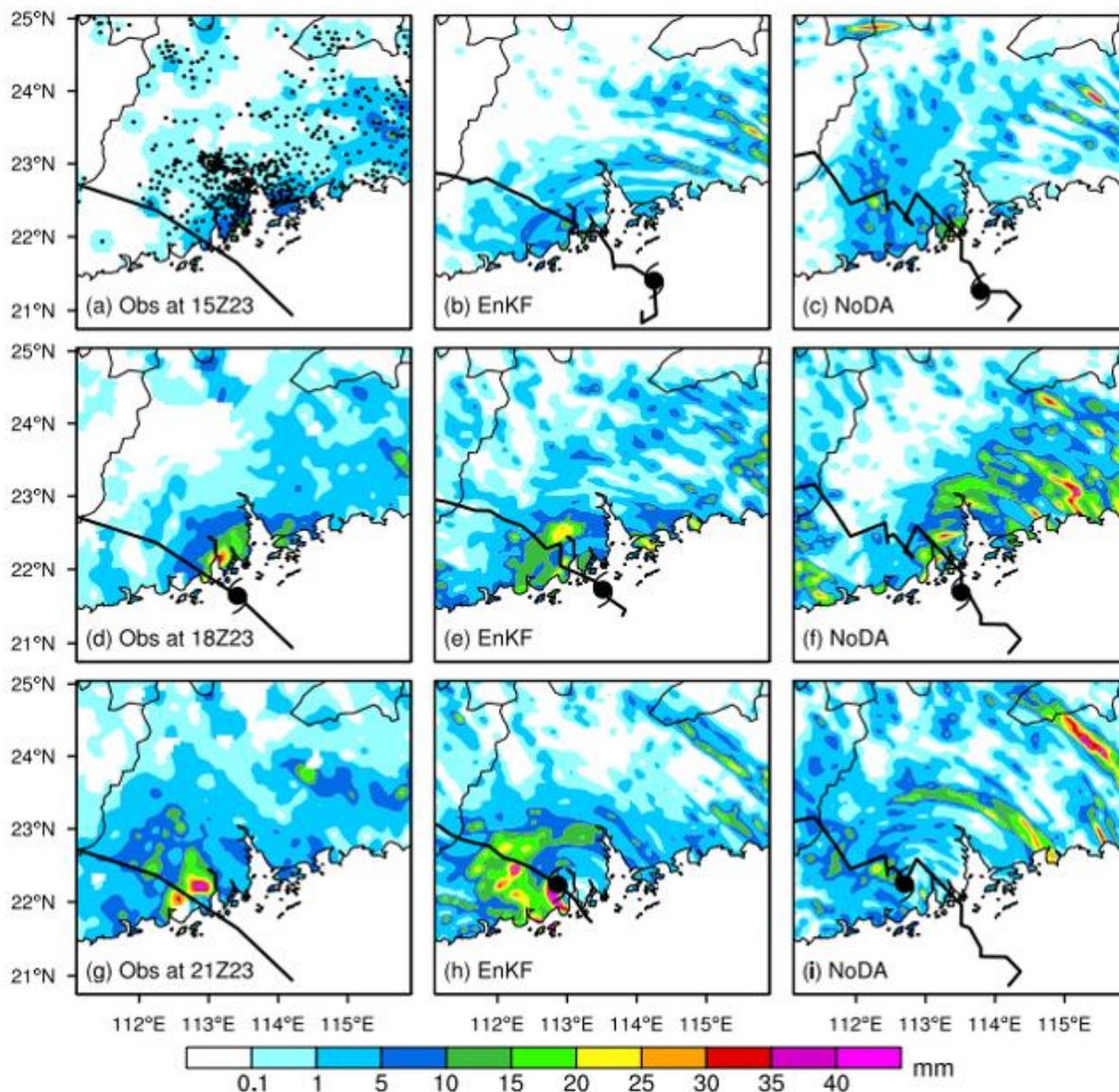


图 3.11 (a, d, g)气象自动观测站的 1 小时累积降水观测、(b, e, h)与观测对应的利用 EnKF 分析场做的 3 小时预报的 1 小时累积降水, 以及(c, f, i)NoDA 试验预报的 1 小时累积降水, 分别对应着 23 日 15 时(a-c)、18 时(d-f)以及 21 时(g-i)。其中黑色线条表示观测、EnKF 分析场做的预报和 NoDA 试验预报的路径, 台风标志表示对应时刻的台风中心位置。

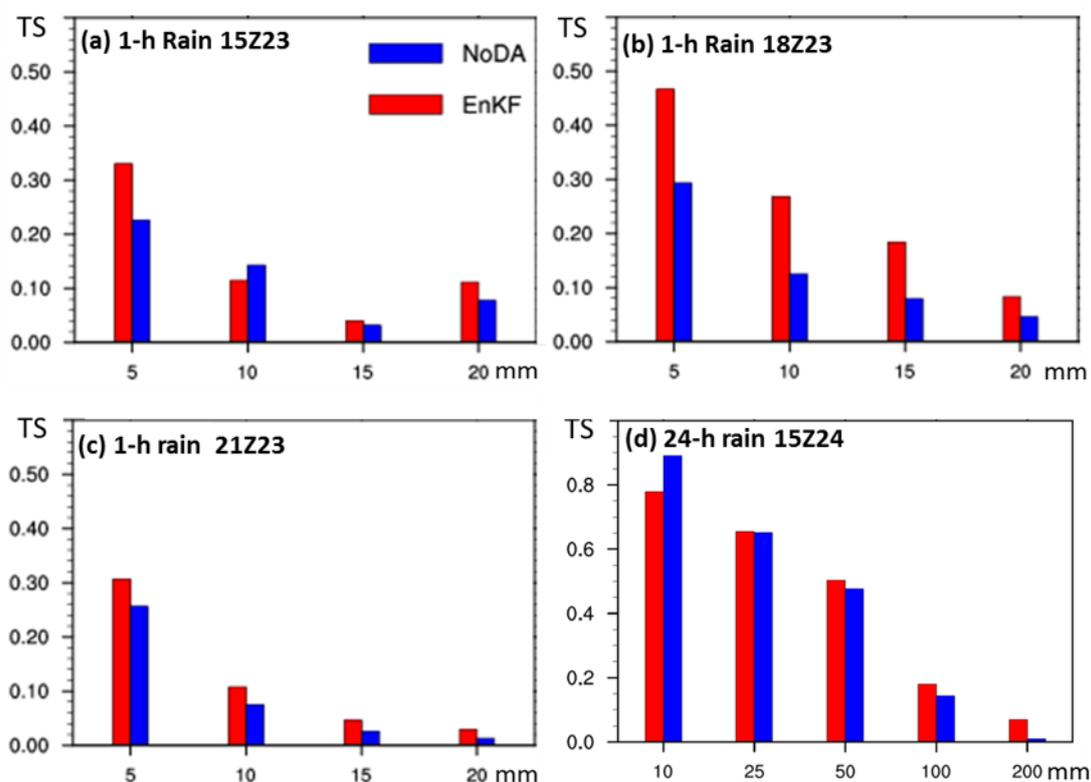


图 3.12 与图 3.11 中预报降水对应的 1 小时累积降水 TS 评分，分别对应着 2012 年 7 月 23 日 15 时(a)、18 时(b)和 21 时(c)。此外还展示了 EnKF 试验和 NoDA 试验在 23 日 15 时至 24 日 15 时的 24 小时累积降水评分(d)。

本研究还将 EnKF 分析场做的确定性预报和 NoDA 试验从 23 日 15 时至 24 日 15 时的 24 小时累积降水预报和自动站观测降水进行对比(图 3.13)。与之前讨论的 1 小时累积降水一致，尽管 EnKF 分析场的预报对最强降水有明显高估现象，预报得到的 24 小时累积降水整体上仍然要优于 NoDA 试验的降水预报。同样通过对比降水分布可以发现，对 24 小时累积降水超过 50 mm 的强降水预报改善最显著，这在 TS 评分上可以更直观得看出(图 3.12d)。

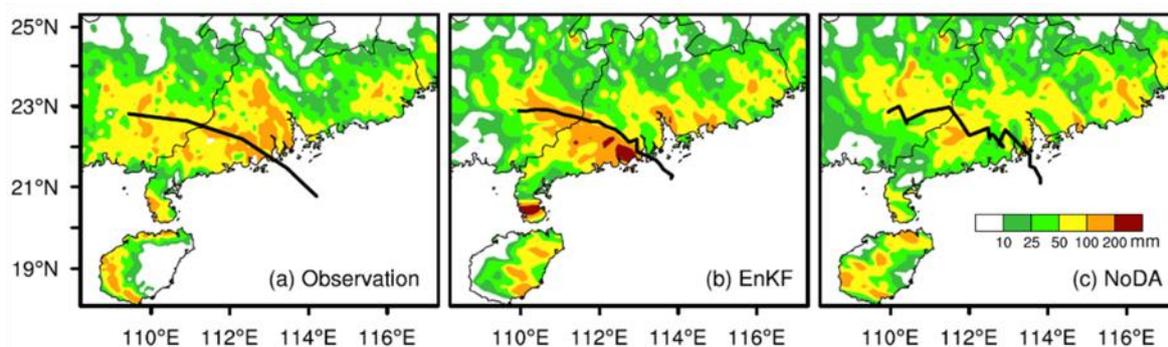


图 3.13 23 日 15 时至 24 日 15 时的 24 小时累积降水，分别对应着观测(a)、EnKF 分析场做的预报(b)和 NoDA 试验预报(c)。黑色线条表示对应的路径。

## 3.6 集合预报和敏感性分析

### 3.6.1 台风路径和最低海平面气压

除了利用 EnKF 平均分析场做的确定性预报外, 还使用 EnKF 的集合分析场做了两个集合预报, 分别对应“韦森特”登陆前的 23 日 15 时和登陆后的 23 日 21 时。图 3.14a 和 3.14b 展示了两个集合预报所有集合成员的强度和路径演变, 同时还给出了从这两个时刻平均分析场做的确定性预报结果。可以从 23 日 15 时的集合预报结果中看出, 台风登陆前对强度的短期预报比登陆后预报有着更大的不确定性。来自不同集合成员的 3 小时预报(23 日 18 时)的强度分布于 939–957 hPa 区间, 这能很好地反映出观测和 EnKF 分析场做的确定性预报的强度演变(图 3.14a)。然而, 23 日 15 时的集合预报的强度预报在台风登陆后存在系统性高于观测(图 3.14a)。

从 23 日 15 时开始的集合预报对路径预报的不确定性演变与对强度预报表现出一定相反特征。虽然在初始场中和预报的前几个时刻所有的集合成员都聚集在实际台风中心附近, 但是在台风登陆后继续向内陆移动的减弱阶段位置的发散度却在不断增加(图 3.14b)。不同集合成员之间的中心距离在 12–24 小时的预报中可以达到 200–300 km。在此期间由于登陆后集合成员的强度普遍减弱, 因此强度预报的集合发散度得到极大的减小(图 3.14a)。相较于 23 日 15 时的集合预报, 23 日 21 时的集合预报对强度预报的不确定性得到了显著降低, 这显然与多同化的 6 小时径向风观测以及登陆后台风减弱有关(图 3.14a)。随着减弱的台风涡旋继续移向内陆, 路径预报的不确定性得到减小(虽然仍然有较大的离散度)(图 3.14b)。

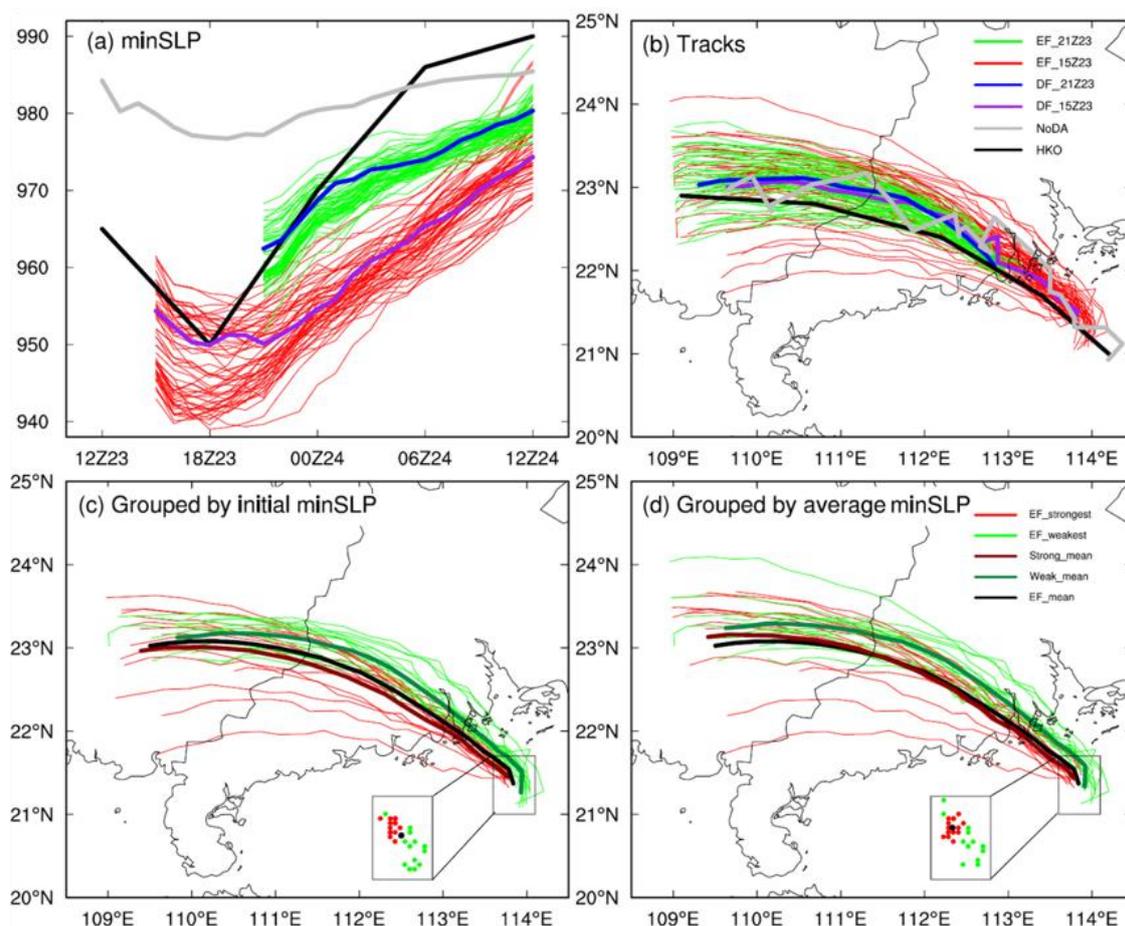


图 3.14 分别从 23 日 15 时(红色实线)和 21 时(绿色实线)的同化后分析场做的集合预报强度(a)和路径(b), 并与观测(粗黑线)对比, 同时还展示了不同起始时刻集合平均分析场做的确定性预报(彩色粗线)以及 NoDA 预报(粗灰线)结果。利用 15 时的集合成员的强度将成员分为 15 个最强(红色)和 15 个最弱(绿色)两组, 对应着初始时刻强度(c)和逐 3 小时强度平均(d)进行分类, 同时还给出了所有集合成员平均的位置(黑点)。

### 3.6.2 24 小时累积降水

由于台风“韦森特”引起的内陆洪水是造成人员伤亡和财产损失的主要原因, 这就自然会让人产生这样的思考: 在台风登陆过程中和登陆后的降水预报会表现出怎样的不确定性。图 3.15a 中展示了 24 小时累积降水的 TS 评分的箱须图, 分别对应 10 mm, 25mm, 50 mm, 100 mm 和 200 mm 的阈值。可以看出, 相比于 NoDA 试验, 同化雷达径向风观测的 EnKF 分析场预报对 200 mm 阈值的强降水预报的提高最显著。TS 评分的集合离散度从 10 mm 至 100 mm 之间不断增大, 但对 200 mm 阈值的降水评分的集合发散度却减小。对于阈值为 100 mm 的集合 TS 评分, 有四分之一的集合成员的 TS 评分为 0.1, 而四分之三成员的评分约达到 0.2。另一个很有趣的发现是: 使用同化后的集合平均场做的确定性预报的对将阈值为 10 mm 的 TS 评分低于四分之一的集合成

员，在 25 mm 和 50 mm 阈值的 TS 评分约为集合预报的中间值，而高于 100 mm 和 200 mm 阈值的四分之三的集合成员。

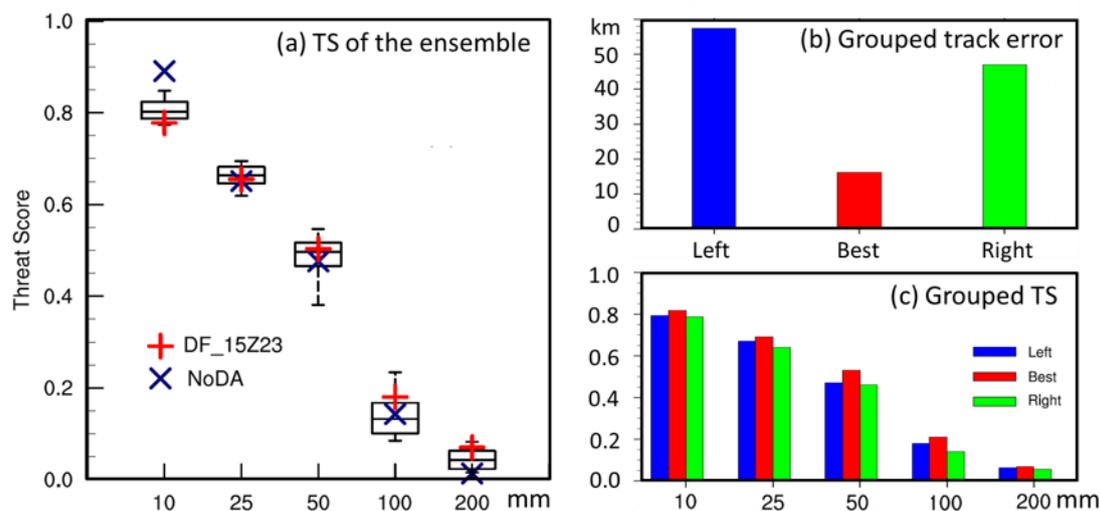


图 3.15 (a)利用 EnKF 同化后分析场在 7 月 23 日 15 时做的集合预报得到的降水 TS 评分的箱须图。同时还给出了利用该时刻集合平均做的确定性预报和 NoDA 试验的降水 TS 评分。阴影盒子表示包含了百分位的第 25 位至第 75 位。虚线表示延伸至百分位的第 10 和第 90 位，以及中线用黑色水平线标出。对应着距离最佳路径平均距离的三个分组的平均路径误差(b)和 TS 评分(c)。

由于 TC 的降水往往伴随在路径周围，接下来检验了 24 小时累积降水分布和台风“韦森特”路径的关系。图 3.16 展示了从 60 个集合成员中筛选出的 15 个成员的 24 小时累积降水预报，同时给出了各成员的路径预报和观测路径。这些成员是根据它们的预报路径与观测路径对比而选取出，其中 5 个是平均位置误差最小的成员(左边栏)、5 个是路径最偏向观测的左侧(中间栏)以及 5 个最偏离观测右侧的成员(右边栏)。可以发现，不同组成员预报的降水分布都与预报路径平行。总体而言，每个成员的 24 小时累积降水预报都集中在预报路径的周围，而且路径误差最小的成员可以得到最好的降水预报(图 3.15b 和 3.15c)。在三组中的集合预报强于 100 mm 的 24 小时累积降水主要分布于预报路径的南部(图 3.16)。从而得到，路径偏左的成员表现出有更多的降水偏向路径南部以及路径偏右的成员则有更多的偏北降水。此外，预报路径越偏离观测路径左侧会在产生更多的偏南方降水，这一特征在超过 200 mm 的累积降水分布中更加显著。这也与预报路径偏左的降水 TS 评分高于路径偏右的 TS 评分一致。我们还可以看到，对超过 100 mm 的降水预报中不同组的集合成员表现出很大的不确定性，而在不同组或同一组中的不同成员超过 200 mm 的强降水预报的范围和位置上表现出更大的不确定性。这表明数值模式对强降水(超过 100 mm)灾害和极端降水预报上存在很大的不确定性，具有较低的可预报性。

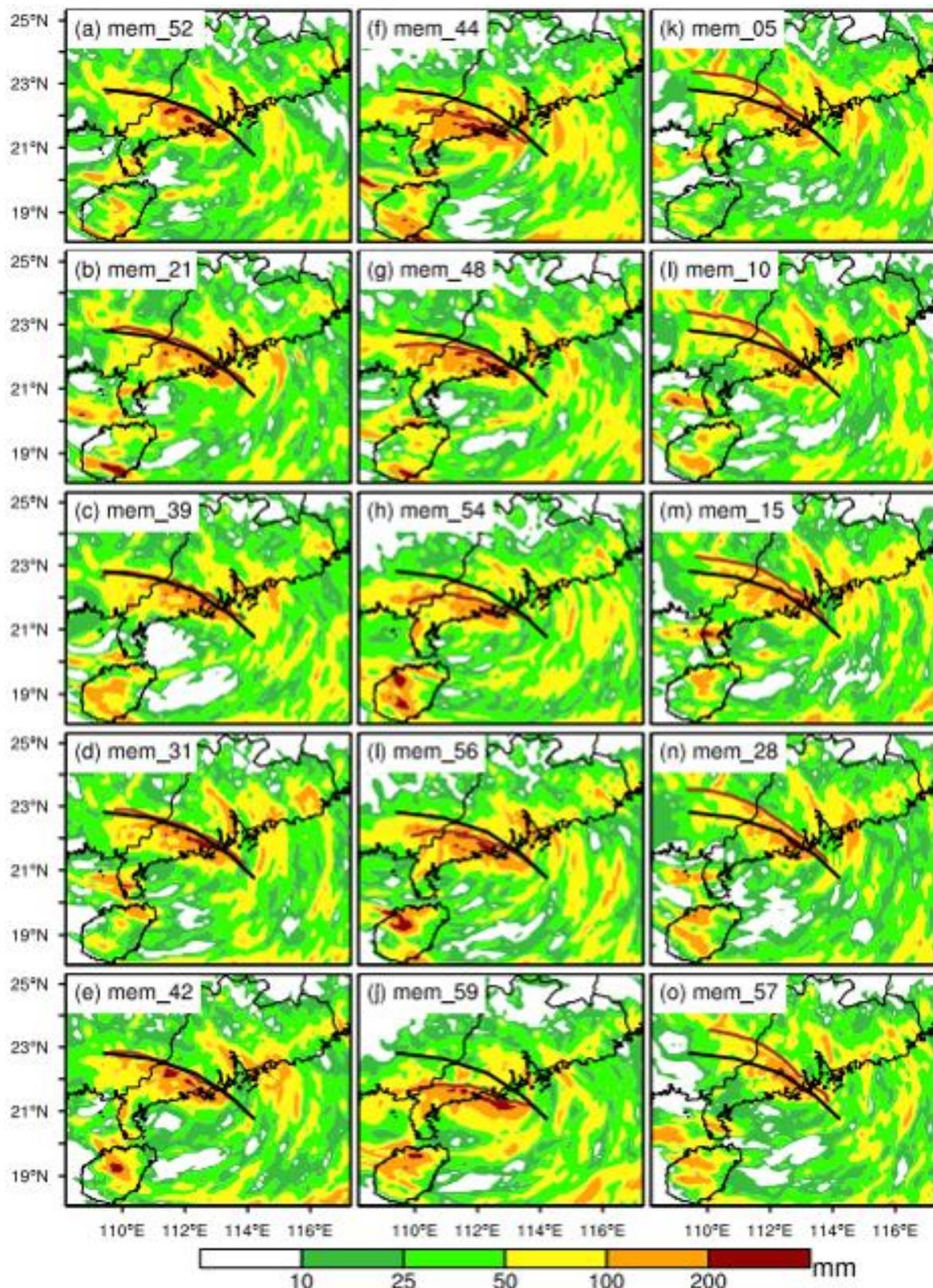


图 3.16 与图 3.13 类似，但是这里展示了所选择分组的 15 个集合成员的 24 小时累积降水分布以及其对应着的预报路径(棕色实线)和观测路径(黑色实线)。左侧 5 个是与观测最接近的成员(a-e)；中间 5 个是模拟路径偏离观测路径的最左的成员(f-j)；右侧 5 个表示模拟路径偏离观测路径最右的成员(k-o)。

### 3.6.3 基于集合预报的敏感性分析

本部分通过分析 23 日 15 时的 EnKF 集合分析场做的集合预报结果，使用集合敏感性分析方法揭示与台风涡旋和环境场有关的可能引起预报不确定性的关键因子。

结果表明，台风路径、强度和降水预报的不确定性根本上是由初始场中台风的强度和中心位置关系决定。依据强度从集合成员中筛选出各包含 15 个最强成员和最弱成员的集合组(图 3.14c)，发现初始涡旋强的 TC 倾向于聚集在观测中心的西北方向中，而初始较弱涡旋的 TC 则向观测 TC 中心的东南方向扩散。通过检验循环同化的逐次结果可以发现，在第一次同化前，初始所有不同强度的集合成员表现为随机分布(图 3.17a)。第一次同化后，所有的成员向观测的台风中心聚集(图 3.17e)。经过四次循环同化后在 23 日 14 时开始初始强和弱的集合成员整体位置开始发生分离(图 3.17c 和 3.17g)，这两组强弱集合成员的中心位置偏离分布特征在 23 日 15 时更加明显(图 3.17d 和 3.17h)。

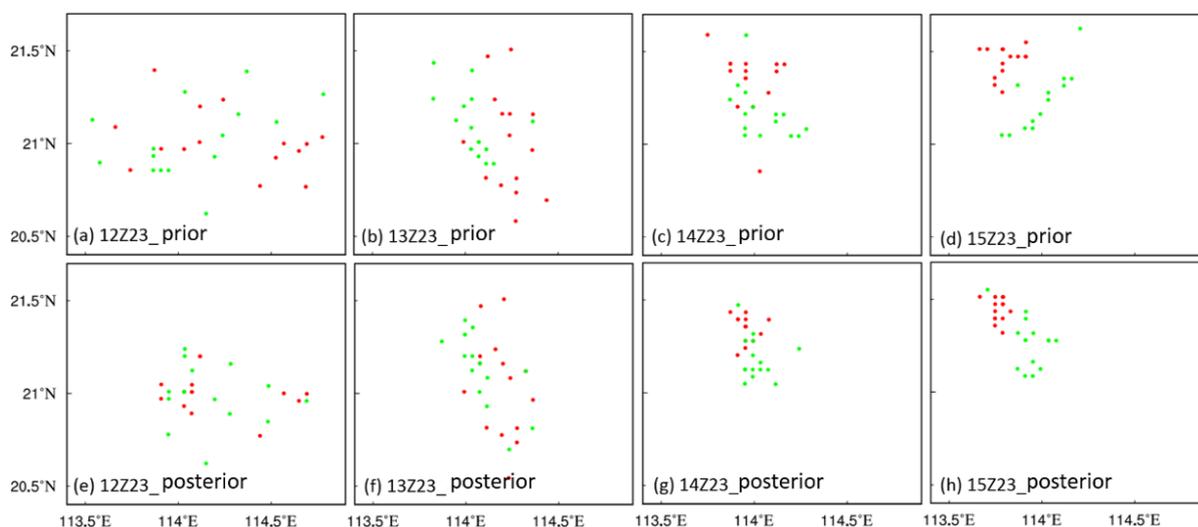


图 3.17 初始最强的 15 个成员(红色点)和初始最弱的 15 个集合成员(绿色点)同化前(a-d)和同化后(e-h)的位置随时间演变，分别对应着 7 月 23 日 12 时(a, e)、13 时(b, f)、14 时(c, g)和 15 时(d, h)。

台风的路径预报和初始场中的强度分布存在紧密的联系。图 3.18 展示了在图 14c 中所示弱组和强组成员的路径演变示意图以及弱组和强组成员的平均路径，同时还给出整个集合和它们的初始位置。这表明初始最强的集合成员倾向得到最偏向左侧的路径预报，而初始最弱的成员则得到偏向最右侧的路径预报。初始场中更弱的 TC 首先在实际台风中心附近以气旋性的方式移动，随后主要集中在平均路径的北部。同时，初始更强的 TC 具有直接移向平均路径南侧的路径预报，这种路径移动特征主要由引导气流决定。

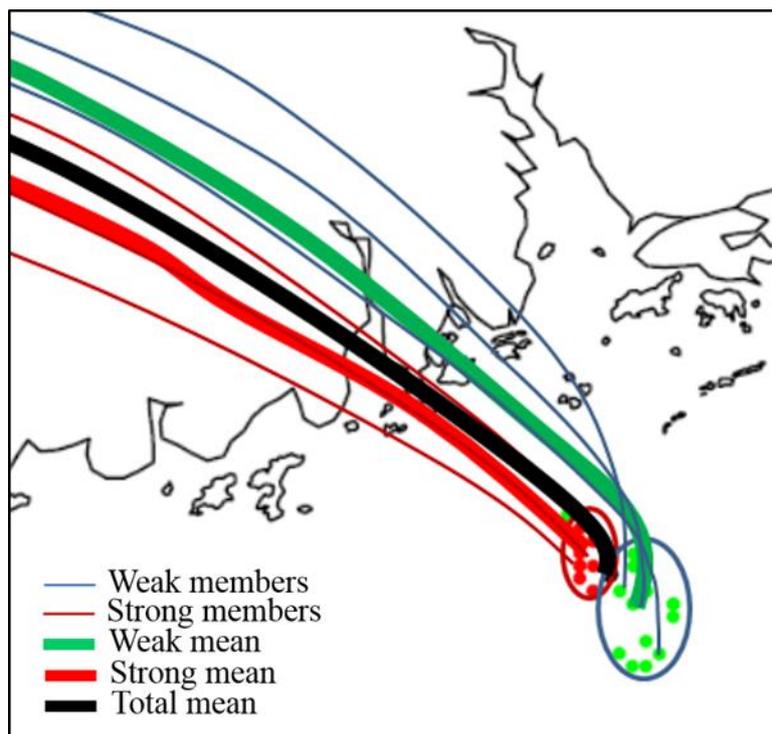


图 3.18 强集合成员和弱集合成员的路径(细实线)特征概念图,同时还展示了强成员平均和弱成员平均的路径演变,以及所有集合(粗实线)和它们的初始位置(圆点)。

接下来检验引导气流在强组和弱组中的作用,引导气流的计算采用 Wu et al. (2007) 中所用的方法:通过垂直方向上 500–700 hPa 对距离 TC 中心 300 km 的圆环内的风场做平均。结果表明,弱组的集合成员具有初始更加偏北的引导气流,导致了更加偏北的预报路径,这可以从两组平均(图 3.19a)和两组中的两个代表成员(图 3.19b)的引导气流中更加清楚得看出。在 23 日 15 时较强的偏北引导气流很可能是由天气形势决定(图 3.19c),这是因为强的台风涡旋北部倾向于有更高的位势高度。通过分析台风中心位置和强度的瞬时相关关系可以发现,尽管较弱涡旋的台风的初始位置往往更加偏向南部,但是它们会快速地向北移动(图 3.20 中的绿色实线)。与此同时,通过分析台风中心位置和强度的瞬时相关关系发现,初始较弱的台风涡旋位置更偏东,但稍后它们则会更加快速地向西移动(图 3.20 中的绿虚线)。

通过偏相关理论来分别讨论初始强度分布和初始位置对台风路径预报的影响。假设有两个独立变量  $x$  和  $z$  以及一个与它们都相关的变量  $y$ 。为了计算偏相关,首先在  $z$  上做  $x$  的线性回归得到残差  $e_{xz}$ ,然后在  $z$  上对  $y$  做线性回归得到残差  $e_{yz}$ 。 $e_{xz}$  和  $e_{yz}$  的相关关系就是相对于  $z$  得到的  $x$  和  $y$  的偏相关  $r_{xy|z}$ (这和 Sippel et al. 2011 所用方法相一致)。为了更加简明的表示,利用单一的方程进行计算,计算公式如下:

$$r_{xy|z} = \frac{r_{yx} - r_{yz}r_{xz}}{\sqrt{1 - r_{yz}^2}\sqrt{1 - r_{xz}^2}}$$

在这个偏相关计算中，剔除了  $z$  对从  $x$  与  $y$  相关关系的影响。

结果表明，对于一个给定的初始中心纬度位置的 TC，初始较弱的 TC 倾向于更向北移动，但是它们的相关在接下来的 24 小时预报中有减弱趋势(图 3.20a 中的红实线)。这很可能是由于初始强度和初始中心经度位置以及接下来路径预报的相关关系引起(图 3.18)。对于给定一个 TC 的初始强度，当初始中心位置更加偏北时，它往往呈现出预报的路径位置保持偏北(图 3.20a 中的蓝实线)。这在分类的强组和弱组的相关关系中可以看得更加清晰(图 3.20c 和 3.20e)。

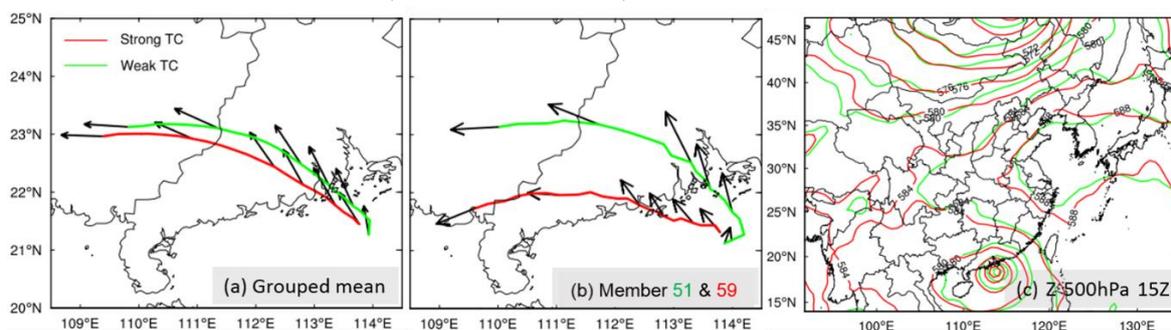


图 3.19 (a)强集合成员组(红线)和弱集合成员组(绿线)的引导气流(黑色箭头)，以及(b)分别从两个分组中取出的成员 51(绿)和成员 59(红)对应的引导气流。(c)展示了对应两个成员在 7 月 23 日 15 时的 500 hPa 高度层的位势高度。

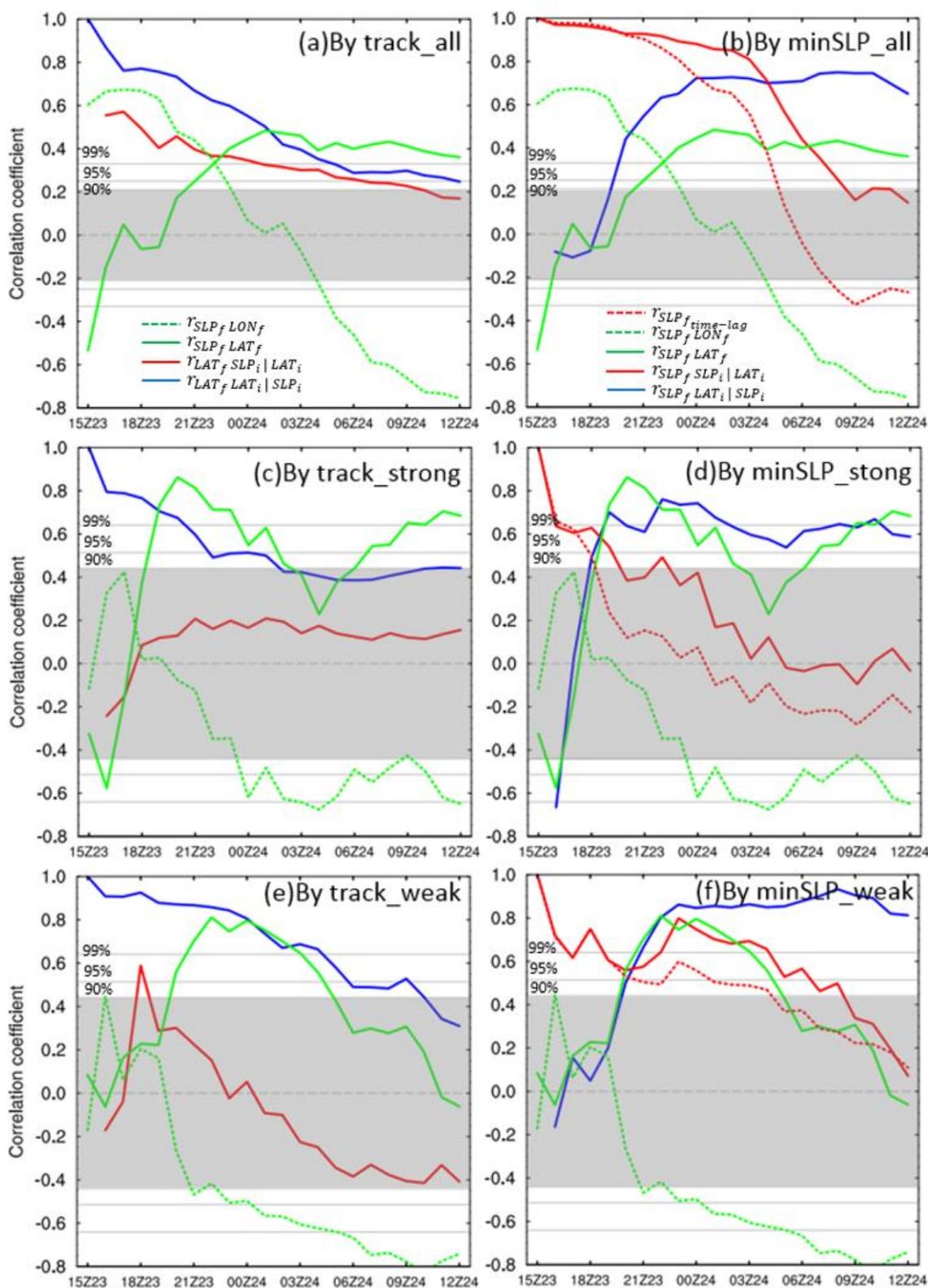


图 3.20 路径和最低海平面气压相关关系随时间演变。红色实线和蓝色实线分别代表将(a)路径和(b)强度作为独立变量的偏相关。台风路径和强度的瞬时相关关系用绿线表示。三条灰线分别表示 90%、95%和 99%可信度。(b)中的红色虚线表示初始强度和预报强度的关系。(c)和(d),(e)和(f)与(a)和(b)类似,但是分别对应强成员组和弱成员组。

我们还检验了初始的强度分布对接下来台风强度预报的影响。结果表明，对于给定初始位置的 TC，如果初始强度更强，则接下来的预报中仍然会倾向于得到更强的强度预报(图 3.20b 中的红实线)。这本质上是较强强度台风涡旋的时间滞后相关关系的反应(图 3.20b 中的红虚线)。对给定一个初始强度的 TC，当它初始位置更加偏南时，它倾向于在之后的预报中得到更强的强度预报(图 3.20b 的绿实线)，这很可能是由弱组中的集合成员决定，因为初始较弱的成员存在更大的位置偏差(图 3.20d 和 3.20f)。此外，因为弱组成员的位置更偏南则需要花费更长时间在海上，从而吸收更多的能量，使得强度增强。

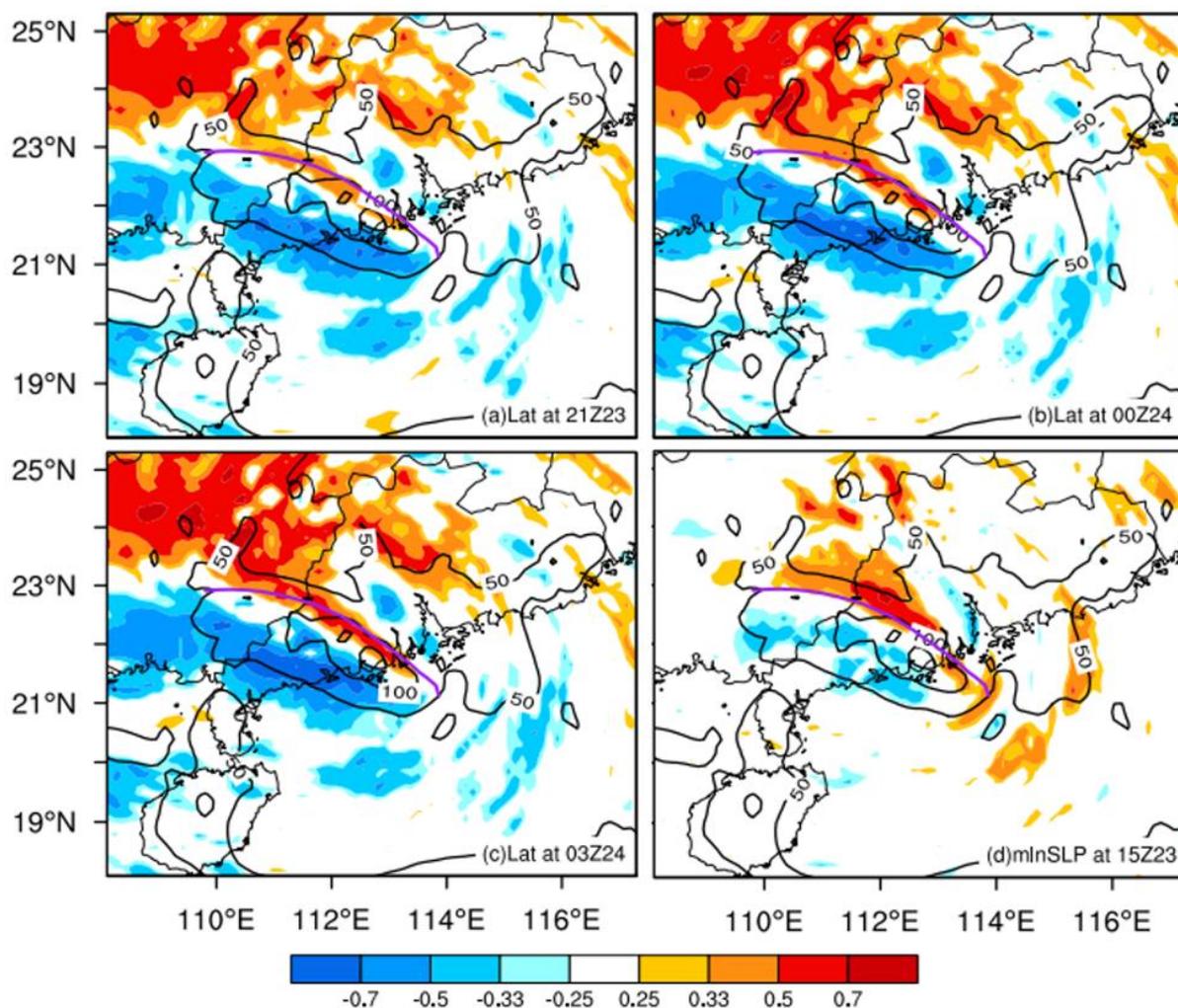


图 3.21 从 23 日 15 时至 24 日 15 时的 24 小时累积降水和预报的位置相关关系(阴影)，分别对应着 23 日 21 时(a)、24 日 00 时(b)和 03 时(c)的纬度位置，同时还展示了与初始强度的关系(d)。黑色等值线表示 24 小时累积降水分布，紫色线条表示台风的集合平均路径。

24 小时累积降水与预报的纬度位置有着很大的相关关系，这里分别对 3 个时刻进行讨论(图 3.21a-c)。在整个预报时间内，向左偏的路径会得到更低的纬度，而向右偏的路径则会得到更高的纬度。在集合平均路径左侧的负相关系数表明，更加偏左的路径

(低纬度)与偏向平均路径左侧出现更强降水存在很大的相关关系,而正相关关系表明更加偏右的路径(高纬度)与伴随或者偏向平均路径右侧出现更强的降水有关。有趣的是,这种偶极子分布的相关关系不是完全精确地分布与平均路径上。正相关的条纹分布刚好跟随集合平均路径。这很可能是因为最强的降水分布在台风中心的南部,因此任何与 TC 纬度位置有正的扰动都可能引起强降水分布在集合平均路径上。

通过统计分析还可以发现(图 3.21d),利用 23 日 15 时做的集合预报得到的 24 小时累积降水和初始强度存在很强的相关关系(置信水平超过 90%)。很明显地看出,初始场中更强 TC 涡旋倾向于产生更大并偏向于平均路径左侧的 24 小时累积降水,而初始更弱的 TC 涡旋则更容易在平均路径右侧出现强降水。这种 24 小时累积降水与 TC 初始强度的相关关系分布和 24 小时累积降水与预报的 TC 中心位置的相关关系分布很相似(图 3.21d vs. 3.21a-c)。该结果与初始 TC 的强度和路径预报存在的显著关系一致,其中更强的 TC 倾向于更向南移动。

### 3.7 本章小结

本章探讨了使用基于云分辨 WRF 模式的集合卡尔曼滤波 (EnKF) 同化系统在台风“韦森特”强度最强时间段连续同化我国大陆沿海岸地基多普勒雷达径向风观测对台风预报的影响。台风“韦森特”是在西北太平洋上生成的一个强 TC,于 2012 年 7 月 23 日 20 时以近强度最强时段在中国广东省珠江三角洲地区登陆,导致了严重的内陆洪涝灾害。

本章通过 30 分钟间隔的连续循环同化广州雷达径向风观测,成功地模拟出了台风“韦森特”的路径、强度以及内核结构演变。同化后得到的台风路径精确地捕捉到了观测的台风登陆时间和登陆位置。仅仅在同化 3-4 次雷达径向风观测后,EnKF 平均分析场中的最低海平面气压(minSLP)就能快速降低,并接近观测值。在第一次同化后,由于得到了非对称气旋性水平风增量和温度增量,台风“韦森特”的内核结构即得到显著改善。同时,在同化早期,台风环流的内部和外部区域都得到改善。之后,大多数的改善主要发生在气旋环流的内部。

所有利用 EnKF 分析场的集合平均做的确定性预报相比于 NoDA 试验,台风的路径、强度以及降水预报都明显得到改善,预报的 TC 登陆位置和登陆时间都与观测十分吻合。随着更多的观测被同化到初始场中,预报路径更加平滑,没有出现 NoDA 试验中的跳跃性路径。虽然时间上存在一定的偏差,同化分析场能很好地模拟出与观测强度相近的最大强度。然而,利用登陆前的同化平均分析场做的确定性预报不能较好地预报出登陆后台风强度的快速减弱过程。

EnKF 的平均分析场对 1 小时累积降水的预报相较于 NoDA 试验更好地模拟出了

与观测相似的强降水中心和分布特征。EnKF 的平均分析场预报成功地模拟出了珠三角地区的强降水区域及台风的螺旋雨带分布。尽管在强降水预报上存在着一定的高估，但是仅同化 4 次雷达径向风观测后基于 EnKF 平均分析场做的确定性预报已能够显著改善 24 小时累积降水的预报。

本章使用 EnKF 的集合分析场做的集合预报，进一步探讨了台风“韦森特”在登陆前和登陆过程中不同前置预报时间的动力特征及其可预报性。在台风登陆前，短期集合预报对“韦森特”的最强强度预报表现出了很大的不确定性。同时，路径预报的不确定性随着时间也不断增大。台风“韦森特”在陆地上降水预报的不确定性很大程度上与路径的不确定性有关，大于 50 mm 的强降水与台风路径紧密相关，且主要分布于预报路径的南侧。台风特大灾害性降水(> 100 mm)的分布存在着很大不确定性，具有较低的可预报性，这对防灾来说是一个巨大的挑战。

对影响台风路径、强度和降水预报的主要因子的分析结果表明，集合初始场中的台风强度、中心位置和初始场中引导气流的相关关系在接下来的预报中扮演着很重要的角色。初始偏强的 TC 倾向于聚集于靠近观测 TC 中心和西北方向附近。更弱的 TC 倾向于有更强的初始偏南气流，且最终更加偏向北侧。

路径预报和强度预报与初始场中的涡旋强度有着密切的关系。初始场中最强(最弱)的集合成员倾向于有一个最偏左(最偏右)的预报路径。偏相关分析表明：在某个固定的纬度上一个更弱的初始 TC 更易于向北移动，而对于一个固定强度的 TC，初始更偏北的 TC 倾向于依旧保持向北移动。初始场中强的 TC 会在之后保持更强的强度。由于弱的集合成员初始更偏南，较弱的集合成员表现出更易增强或者不易减弱，因此初始的纬度被认为是影响强度预报的一个重要因素。

24 小时累积降水的预报与台风中心纬度存在着很好的相关。更偏左的路径(更低的纬度)与集合平均路径偏左的强降水存在着很好的相关关系，而更偏右的路径(更高纬度)则与伴随集合平均或者偏右的更强降水有关。由于更强的台风倾向于更向南移动，因此初始强度和 24 小时累积降水有类似的相关关系。

总体而言，本章的研究结果有力地证明了使用高分辨率云解析的 WRF-EnKF 同化我国地基多普勒雷达径向风观测能够显著提高台风的路径、强度、结构以及降水预报。通过集合预报揭示了预报的不确定性。本章的研究还表明，在 TC 最强时刻使用 EnKF 同化雷达径向风观测能够快速模拟出 TC 的强度和结构。由于 TC 常常会以最强的强度登陆，该成果对前人研究主要集中在 TC 生成或发展阶段同化观测的工作是一个重要的补充。

## 第四章 美国静止卫星 GOES-13 全天气条件下红外水汽通道观测的同化

### 4.1 引言

上一章表明了通过高分辨率云解析 WRF-EnKF 同化我国大陆雷达观测能够显著提高台风的强度、结构以及降水的预报。然而，受到探测范围的限制，气象雷达没有能力监测距离海岸 100 km 以外海上的 TC，相较于雷达，静止气象卫星则能对所有的 TC 整个生命过程进行监测。

对 TC 的强度和结构预报影响最大的内核区域卫星观测，由于会受到云和降水的影响导致误差较大，以前常常被剔除。近几年，由于数值预报模式和资料同化方法的发展，逐渐有研究开始使用集合同化方法同化全天气条件下的卫星观测对 TC 预报的影响。但是目前的研究主要针对理想模拟，仅有的实际模拟研究没有展示出对强度预报的显著改善效果，也没有分析同化全天气卫星观测对模式初始场中 TC 的动力和热力结构的影响。本章将考察使用高分辨率云解析 WRF-EnKF 同化美国静止卫星 GOES-13 全天气条件下的水汽通道红外辐射观测对大西洋飓风 Joaquin 强度预报的改善能力，并详细分析同化全天气条件下的静止卫星观测对 TC 动力和热力结构特别是 TC 内核结构的改善作用。

### 4.2 个例介绍

本章的研究个例是 2015 年大西洋飓风 Joaquin。虽然当前业务预报能够很好地预报出大多数 TC 的路径，但是业务数值预报对飓风 Joaquin 路径预报却表现很差。正是由于当时对该个例较差的路径预报导致美国东部沿海发布了错误预警，引起巨大恐慌。实时业务预报模式预报飓风 Joaquin 会正面登陆美国大陆，然而事实上却移向海上，偏离美国东部沿海岸。

飓风 Joaquin 的整个生命期都在海上度过。与通常在北大西洋上飓风的生成主要是由非洲东风波引起不同，高层低压系统才是飓风 Joaquin 生成的主因。2015 年 9 月 29 日 00 时，飓风 Joaquin 在巴哈马市北部偏东北方向发展成为热带风暴。12 小时后，中纬度槽发展到美国中部地区，对飓风 Joaquin 生成很重要的高层槽移向飓风的东北部。在接下来的 72 小时中(9 月 29 日 12 时至 10 月 2 日 12 时)，Joaquin 沿着偏南靠西南向移向巴哈马市，并在此过程中快速增强成为强飓风。在此期间，美国东南部的低压系统增强，并且中低层的低压系统发展增强与飓风 Joaquin 的东部环流合并，该过程有助于

引导气旋向南偏西南方向移动。最终顺时针转向大西洋北部之前，它进一步缓慢向东北移动，飓风 Joaquin 在巴哈马市造成连续两天的灾害。在巴哈马市两天的缓慢移动中，一个切断低压系统在美国东西部发展并将大量水汽带入该地区，沿着美国东部海岸发生了历史性的洪涝灾害。至 10 月 3 日 12 时，飓风 Joaquin 向北移动并开始偏向东北向而远离美国东海岸。低压系统南部区域的西风带促使飓风 Joaquin 进一步先往东移，随后向东北方向移动。

首先，检验实时业务预报中心对该飓风的预报结果，图 4.1 展示了欧洲中心中期天气预报(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 简称 ECMWF)、美国全球预报系统(Global Forecast System, 简称 GFS)、HWRF 以及美国飓风中心(National Hurricane Center, 简称 NHC)的飓风 Joaquin 的实时强度和路径预报。从图 4.1a-d 可以看出，除了 HWRF 外，其他三个预报中心对飓风 Joaquin 的强度预报几乎在所有的起始预报时间都表现很差，但为何 HWRF 却能表现如此之好？这是因为 HWRF 使用了集合同化预报系统实时同化飞机穿越飓风中心获取的机载雷达径向风观测。这进一步证明高时空分辨率内核观测对 TC 强度预报的重要性。再从图 4.1e-h 的业务路径预报中可以看出，除了 ECMWF，其他业务中心对 Joaquin 的路径预报都产生巨大的预报误差，而 ECMWF 却是唯一能够很早就极为成功地模拟出路径的演变。很显然，这是由于 ECMWF 的初始场对 Joaquin 的大尺度环流模拟得十分接近真实的大气流场，但其他业务中心的初始场对飓风 Joaquin 在这方面均表现较差。有人做过试验：将 ECMWF 的初始场放入到 GFS 中做预报发现，GFS 对于飓风 Joaquin 的路径模拟与 ECMWF 的预报结果几乎完全一致。这再次证明初始场在 TC 路径预报中的重要性。

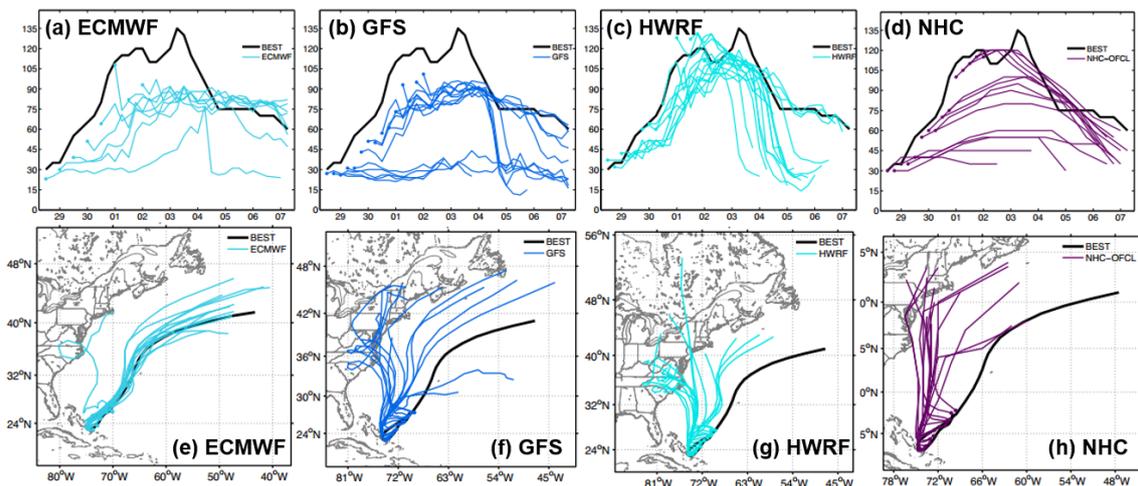


图 4.1 业务预报中心不同起始时刻的实时对飓风 Joaquin 的强度(a-d)和路径(e-h)预报，分别对应 ECMWF(a, e)、GFS(b, f)、HWRF(c, g)以及 NHC(d, h)。其中黑色实线表示最佳路径观测(联合台风预警中心 JTWC)。

### 4.3 试验设计和方法

与上一章中雷达同化采用类似的预报和同化系统，同样使用 WRF-EnKF 同化预报系统，但是这两个系统都在之前的版本上得到了升级。本章研究使用了 WRF-ARW 的 3.5.1 版本。之前的 WRF-EnKF 同化系统中没有卫星资料同化模块，该模块使用 CRTM 模式作为直接同化卫星资料的观测算子用于计算模式背景场中对应观测点上模拟卫星观测。同时新版 EnKF 系统还更新了并行算法，极大地提高了同化效率。

在同化过程中与之前做雷达资料同化有一个很大的区别，这里所用的系统在计算过程中每 6 小时会使用 GFS 数据对同化后的集合平均分析场进行更新，具体方法为：在每 6 小时间隔时间点上若有 GFS 数据时，对距离 TC 中心的 300-600 km 区域内利用集合平均分析场和 GFS 数据按照 0-1 之间的系数进行线性插值得到新的集合平均分析场，对 600 km 以外的区域变量则与 GFS 保持完全一致，而在距离 TC 中心 300 km 以内则保持同化后的集合平均分析场。这是因为目前数值预报的全球预报系统对于大尺度环流的把握相较于区域模式具有一定的优势，而对于 TC 内核区域的模拟则需要高分辨率模式和高分辨率观测。

本试验网格的格点数为 202×181 (D01)、298×298 (D02)和 298×298 (D03)，对应的网格分辨率分别为 27 km、9 km 和 3 km，最外层网格覆盖整个美国大陆及周边海洋区域(如图 4.2)。垂直方向上选用 43 层，模式顶层设置为 10 hPa。

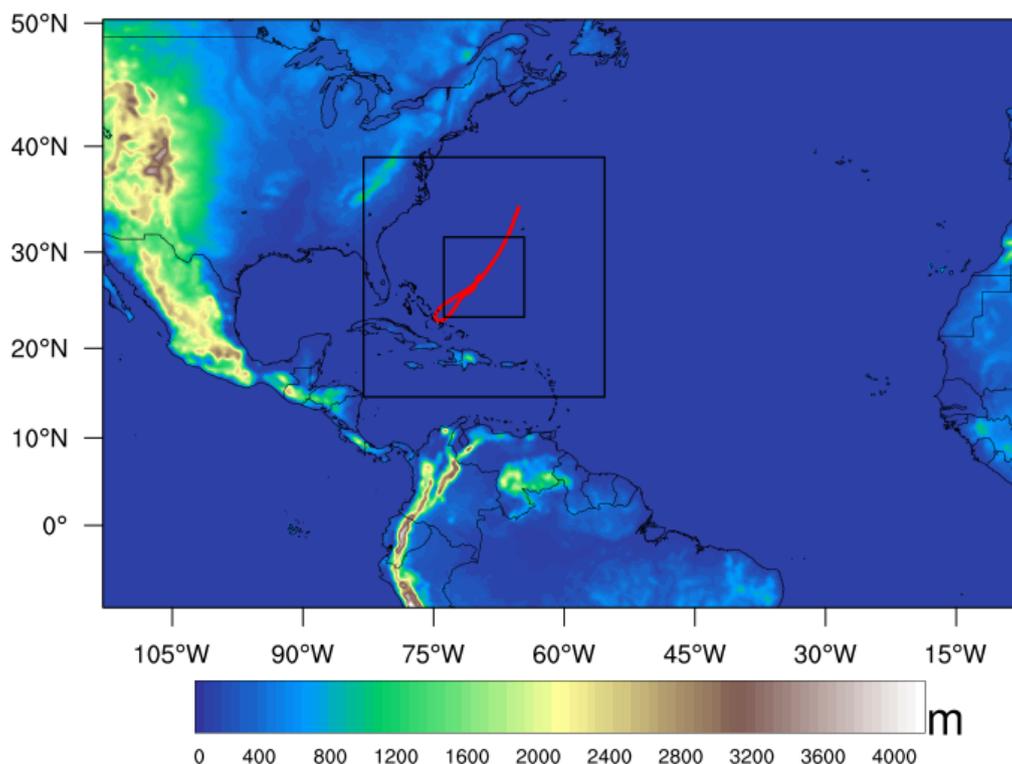


图 4.2 试验网格设置，且包含网格中地形高度分布(阴影)和 JTWC 观测的飓风 Joaquin 的路径(红色实线)。

本研究中做了两个试验，两个试验都同化常规观测和飓风的最低海平面气压和位置(hurricane position and intensity, 简称 HPI)观测。试验一额外同化卫星观测资料, 简称 Rad 试验; 而试验二没有额外同化卫星观测, 简称 NoRad 试验。试验流程如下(图 4.3): 使用 WRF 模式的 3DVar 系统默认设置在 2015 年 9 月 28 日 00 时对 NCEP 的  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  GFS 进行随机平衡扰动生成 60 个集合成员, 之后做 12 小时的短期集合预报, 获得实时天气条件下的背景误差协方差, 用来进行后续循环同化试验。从 9 月 28 日 12 时开始至 10 月 4 日 12 时每 3 小时进行一次同化, 并从首次同化开始每 6 小时利用同化后的集合平均分析场做 144 小时的确定性预报。

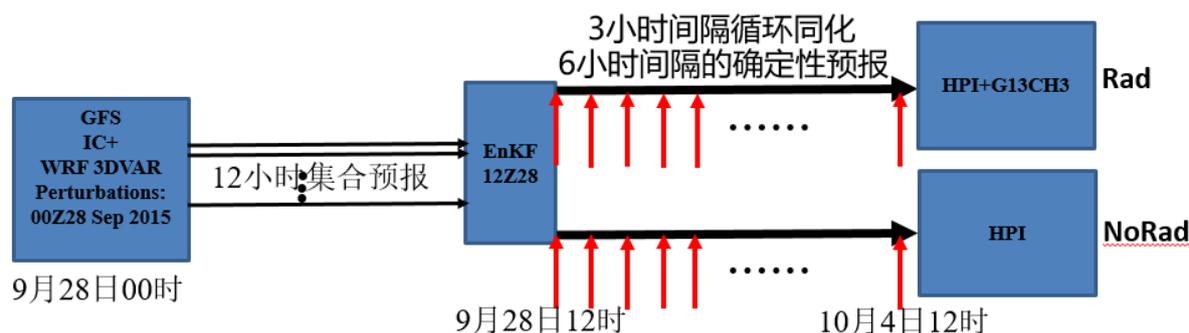


图 4.3 试验流程图, 包含了 Rad 试验和 NoRad 试验, 分别代表同化了全天条件下的卫星观测资料 and 没有同化卫星观测资料, 两个试验都同化了常规观测和 TC 中心强度和位置信息。其中 HPI 表示同化飓风中心位置和强度, G13CH3 表示同化 GOES-13 卫星的通道 3 观测。

GOES-13 卫星是唯一能够全程监测到飓风 Joaquin 生命过程的静止气象卫星, 在 Rad 试验中同化的卫星数据来源于 GOES-13 的一个水汽通道观测数据。Otkin (2012) 的研究以及我们的研究试验(这里没有展示)发现, 高层的红外水汽通道观测对改善强对流或 TC 的预报效果最突出, 因此本研究仅同化第三通道的红外辐射水汽观测。为了限制受云和降水影响的卫星观测造成的巨大不符实际的分析增量, 本研究使用了 Zhang et al. (2016)提出的适应性观测误差松弛法(AOEI)。此外, 卫星观测的初始误差设置为 5.0 K。

#### 4.4 检验同化系统同化全天气条件下卫星观测效果

由于具有同化卫星观测模块的该 EnKF 系统首次用于同化 GEOS-13 卫星在全天气条件下的水汽通道红外辐射观测资料, 这里我们将检验该系统是否适用于同化该类型卫星观测。几乎所有的同化系统都基于观测偏差(观测个数与观测与背景场的偏差分布)为正态分布, 而卫星资料同化难点之一也在于其观测偏差分布往往不具有正态分布特征。图 4.4 展示了观测偏差(bias, 观测-背景场)的分布特征, 可以十分清楚地看出虽然同化前观测 bias 分布中心有一定的偏移, 但是同化后的集合平均分析场中则具有明显的正态分布。结果证明, 该系统完全有能力同化该卫星在全天气条件下的卫星观测资

料。

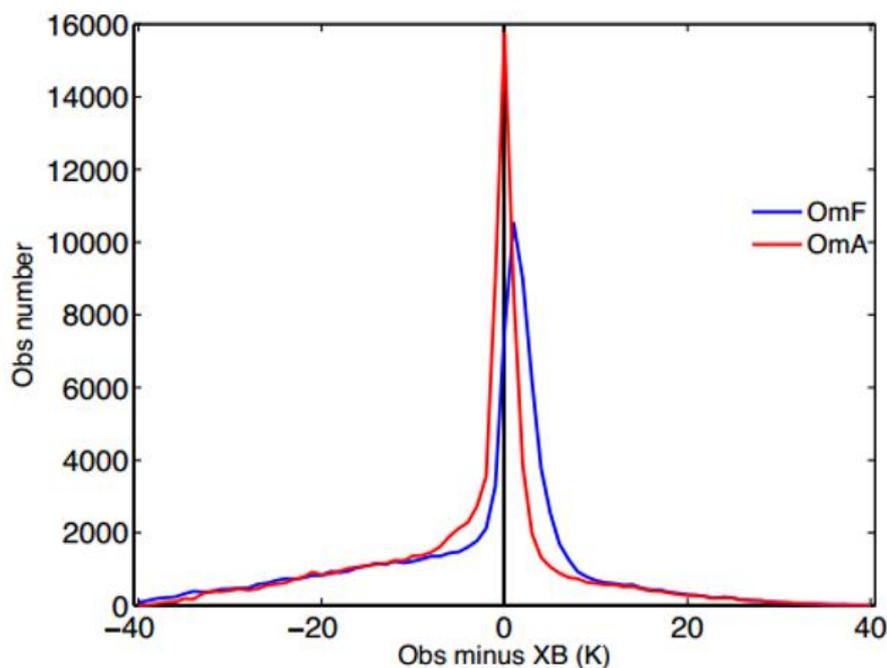


图 4.4 同化前(蓝色实线)和同化后(红色实线)的观测和集合平均分析场的偏差分布。

## 4.5 试验结果分析

本节使用 EnKF 平均分析场及利用其做确定性预报的结果对 Rad 和 NoRad 试验与联合台风预警中心(Joint Typhoon Warning Center, 简称 JTWC)的最佳路径观测对比进行分析。此外, 还对同化卫星观测资料的 Rad 试验与仅同化常规观测而没有同化卫星观测的 NoRad 试验结果进行比较, 用于检验静止气象卫星在全天气条件下的红外辐射观测对飓风 Joaquin 预报的影响。

### 4.5.1 EnKF 集合平均分析场做的确定性预报

图 4.5 展示了利用 NoRad 和 Rad 试验每 6 小时一次的同化后平均分析场做的确定性预报结果, 并与 JTWC 最佳观测相比。在同化初期, 尽管利用 Rad 试验的分析场做的确定性预报得到的路径比较平滑, 而 NoRad 试验的路径则存在很大的不稳定特征, 但两个试验得到的分析场做的确定性预报的路径预报都表现很差, 这和实时业务预报结果类似。为了进一步定量估算路径预报, 图 4.5d 展示 144 小时预报的所有确定性预报的 3 小时间隔的平均预报误差。可以发现, 虽然利用 Rad 试验的 EnKF 平均分析场做的确定性预报在前 54 小时预报的平均路径误差相较于 NoRad 试验有一定的减小, 但是在 Rad 试验中更长的预报时间里平均路径误差则比 NoRad 试验的平均分析场预报的结果增大了一些。另外, Nystrom et al. (2018)通过对实时台风预报系统的集合预报敏

感性分析检验发现:飓风 Joaquin 路径的巨大预报误差主要来源于距离飓风中心 600 km 以外区域。本同化试验仅通过同化观测更新距离飓风中心 600 km 以内区域的模式变量,对 600 km 以外区域完全用 GFS 数据替代。因此,这两个同化试验结果做的确定性预报对飓风 Joaquin 的路径预报与业务预报相类似很合理。

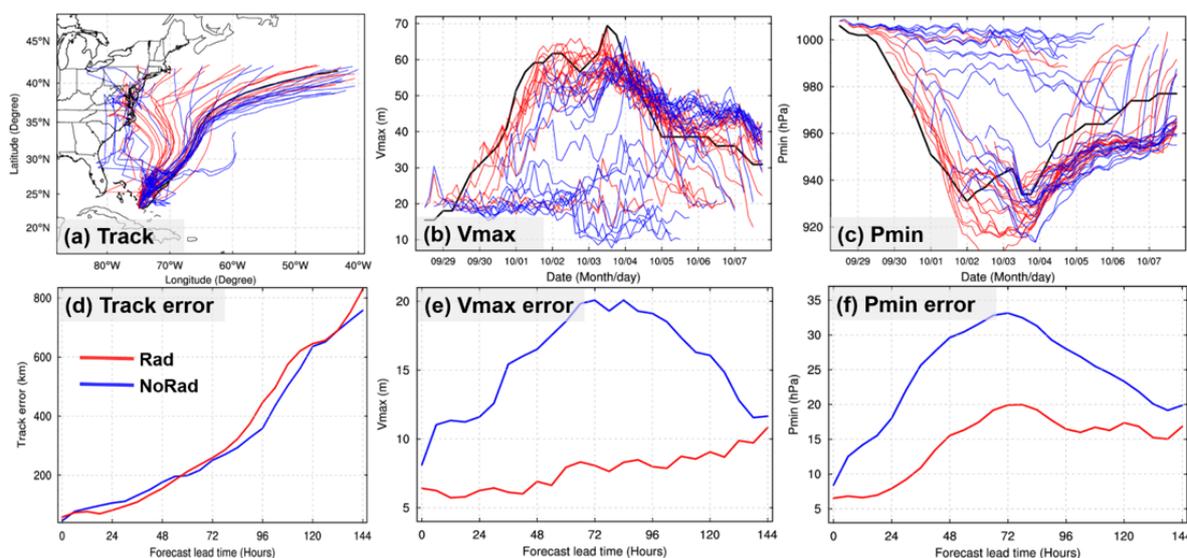


图 4.5 利用 Rad 试验(红色实线)和 NoRad 试验(蓝色实线)从 9 月 28 日 12 时至 10 月 4 日 12 时每 6 小时的同化后集合平均分析场做确定性预报的路径(a)和强度预报(b, c)及其对应的误差(d, e, f)。其中 a-c 中的黑色粗线表示 JTWC 的最佳路径观测。

同化试验对飓风的强度预报与路径预报的影响完全不同,随着红外辐射水汽通道的卫星观测被同化进入初始场中, Rad 试验的平均分析场做的确定性预报在强度预报上得到了显著提高(图 4.5b 和 4.5c)。同化 5 次卫星观测后于 9 月 29 日 00 时, Rad 试验的平均分析场做的确定性预报有能力较成功地模拟出飓风 Joaquin 的强度演变,虽然相较于观测仍然偏弱。随着越来越多的卫星观测循环同化进初始场中, Rad 试验分析场做的确定性预报对强度模拟越来越接近实际观测,然而没有同化卫星观测的 NoRad 试验分析场对强度预报仍然表现很差,强度依旧较弱,更无法预报出飓风 Joaquin 的快速增强过程。这证明了全天气条件下的高时空分辨率卫星观测对 TC 强度预报有显著的影响,尤其在当前业务数值预报甚至科学研究中对 TC 强度快速增强过程的预报均表现较差的前提下显得尤为重要。

同之前对路径预报的定量统计分析一样,这里我们检验确定性预报的平均强度误差(图 4.5e 和 4.5f)。可以十分清晰地看到,在所有预报时段中利用 Rad 试验分析场做预报的强度预报误差不论是地面最大风速(Vmax)还是最低海平面气压(Pmin)都远低于没有同化卫星观测资料的 NoRad 试验分析场做预报的预报误差,其误差减小超过 50%。该强度预报误差的减小程度甚至比 Zhang and Weng (2015)的研究中同化机载雷达径向风观测对 TC 强度预报误差减小(约 28%)还要显著很多。Rad 试验相对于 NoRad 试

验对  $V_{max}$  和  $P_{min}$  的平均预报误差分别减小  $7 \text{ m s}^{-1}$  和  $10 \text{ hPa}$ 。此外还发现,对强度预报误差改善最大的时间段发生在 48-96 小时的预报时间内(图 4.5e)。至 10 月 1 日 00 时, NoRad 试验同化后平均分析场做的确定性预报可以模拟出强度演变,但与 JTWC 最佳路径观测以及 Rad 试验预报相比,在整个预报中 NoRad 试验分析场做的预报对强度预报仍偏弱。同化卫星观测可以使得 Rad 试验的分析场对强度预报产生如此显著提高,这显然是由于高时空分辨率观测被同化进入初始场中能够得到与实际相近的飓风内核结构(考虑到同化试验只更新距离 TC 中心 600 km 以内的模式变量)。接下来我们将着重分析同化卫星观测对飓风 Joaquin 结构的影响,主要将分析时间点放在 3 个时次:首次同化观测的 9 月 28 日 12 时、首次能够模拟出强度演变过程的 9 月 29 日 00 时以及首次能够模拟出与强度观测几乎完全吻合的 29 日 18 时的同化前后集合平均分析场。之后再对比 Rad 试验和 NoRad 试验在不同时刻 TC 结构演变的差异。

#### 4.5.2 检验水汽红外辐射

图 4.6 中展示了选定的 3 个时刻模拟的红外水汽通道亮温的水平分布,分别对应着同化前、同化后以及同化前后的增量,同时与 GOES-13 卫星的通道 3(Ch3)的亮温观测对比。通过对比可以清楚地看到,同化前的集合平均分析场和观测的亮温分布存在较大偏差,尤其在第一个时刻还没有进行同化的集合预报场中(图 4.6a vs. 4.6d)。在观测中,已经有很明显的飓风内核涡旋结构,虽然该时刻的飓风内核结构还比较松散。随着卫星观测第一次被同化进入初始场中,在飓风 Joaquin 中心的左侧获得大的正亮温增量,同化后的平均分析场分布向观测靠近,虽然仍然存在较大的偏差。这很可能与在第一次同化卫星观测后却仍然无法模拟出强度的演变有关。随着循环同化不断进行,越来越多的卫星观测信息被植入到模式的初始场中,在 9 月 29 日 00 时,虽然同化后的模拟亮温与观测相比整体强度仍偏弱,但是以 Rad 试验的平均分析场做的确定性预报已经有能力模拟出 Joaquin 的涡旋结构。另外可以看出,在飓风中心的西北区域中出现了很大的负亮温增量。该时刻同化后分析场已经能够模拟出强度快速增强的演变特征,这与在分析场中能很好地模拟出 Joaquin 内核结构有很大关系。同化至 9 月 29 日 18 时,更多的卫星观测被同化,同化后的平均分析场做的确定性预报对强度演变的模拟已经与观测十分吻合。同时,在内核外区域中,飓风的结构分布也与观测很接近。整个区域中模拟的亮温分布展示出了很清晰的飓风涡旋结构。虽然该时刻最大的分析增量集中在 TC 中心附近,但是在中心的外围区域也可以看到很清晰的涡旋分析增量(图 4.6k)。随着模拟出越来越真实的 Joaquin 结构,可以发现确定性预报的强度预报随之得到显著提高。

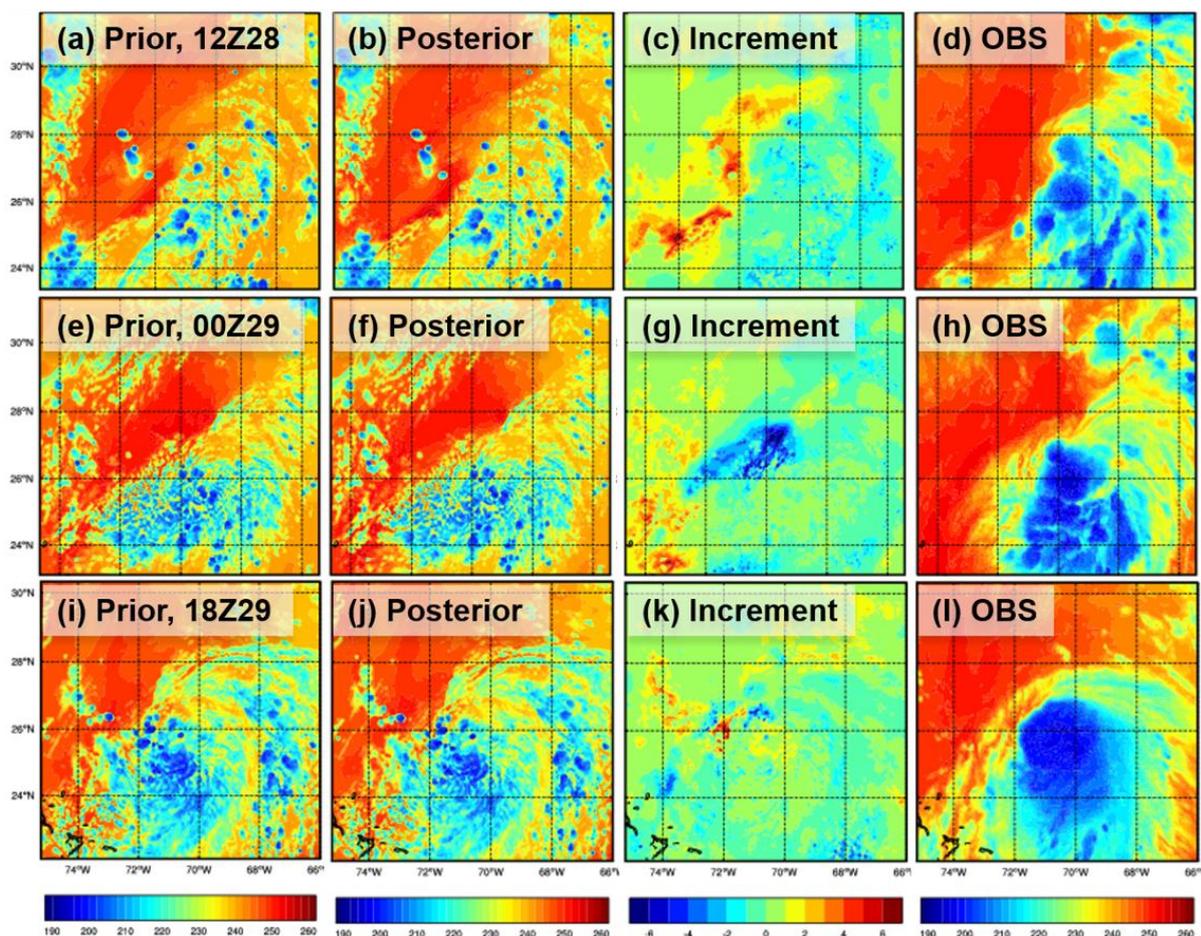


图 4.6 Rad 试验的集合平均分析场同化前(a, e, i)、同化后(b, f, j)、同化前后增量(c, g, k)的模拟通道 3 亮温, 并与观测的通道 3 的红外辐射亮温(d, h, i)对比, 分别对应 9 月 28 日 12 时(a-d)、29 日 00 时(e-h)以及 29 日 18 时(i-l)。

进一步定量检验同化静止卫星红外观测的对初始场影响的效果, 在最内层区域 D03 中对 Rad 和 NoRad 试验的每个同化时刻平均分析场反演得到通道 3 观测计算均方根误差 (RMSE)和偏差 (Bias) (图 4.7)。对比发现, Rad 试验几乎在每个同化时刻的 RMSE 都低于 NoRad 试验, 这从另一方面证明同化卫星观测获得的分析场更加接近实际观测且随着同化更多的观测可以得到更加接近真实的飓风 Joaquin 结构。另外, 还可以发现同化卫星观测对前期 TC 快速增强阶段的误差减小最显著, 这表明卫星资料在提高强度快速增强过程上具有十分强大的能力。同样的结论也可以在 Bias 分析中得到, 可以看出在整个同化时间段同化卫星观测的 Bias 相对于不同化卫星观测都偏小(图 4.7b)。对于红外水汽通道的 RMSE 和 Bias 来讲, 误差减小最显著时间都发生在同化初期的几天中, 尤其在 9 月 29 日 12 时至 10 月 2 日 00 时的强度快速增强阶段, 这应归因于同化卫星观测倾向于得到更好的飓风强度快速增强过程。在之前所选的 3 个时刻上, RMSE 和 Bias 都随着时间演变越来越小, 这很好地对应着以这 3 个时间点同化卫星观测后分析场的确定性预报得到不断显著提高的强度预报。

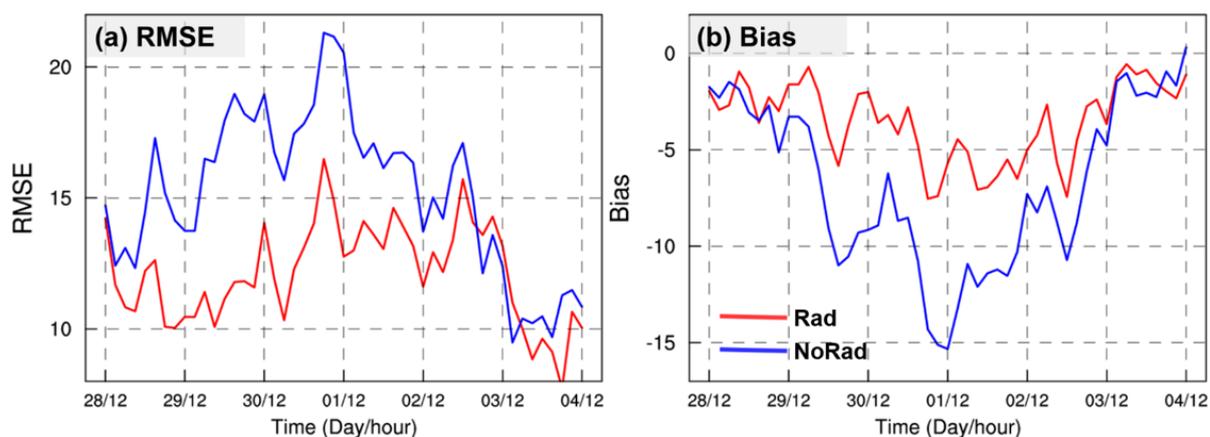


图 4.7 Rad 试验(红线)和 NoRad 试验(绿线)在所有循环同化时刻从 9 月 28 日 12 时至 10 月 4 日 12 时对应的在 D03 中通道 3 的 RMSE (a)和 Bias (b)。

### 4.5.3 红外辐射观测对飓风 Joaquin 的风场和湿度结构的影响

正如之前所讨论，全天气条件下的卫星水汽通道观测资料通过先进的资料同化手段植入到初始场中能够快速提高飓风强度预报，但是该类观测资料是如何不断调整初始场中的三维变量从而提高强度预报还没有检验。前人的研究表明，强度预报误差主要来源于初始场中路径、强度以及湿度误差，尤其是初始场中 TC 内核区域的变量(Zhu et al. 2016; Emanuel and Zhang 2017; Nystrom et al. 2018)。在这部分，我们将讨论同化卫星观测后对初始场中的水平风场、湿度场以及海平面气压(SLP)分布特征的影响。图 4.8 中展示了 Rad 试验的 EnKF 同化前、同化后和同化前后增量的模式最低层水平风场、SLP 以及可降水量的分布。尽管同化增量大小不同，但是在所有同化时刻在 TC 中心区域都能得到明显的气旋性风场增量(图 4.8b, 4.8e 和 4.8h)，这表明在 TC 中心附近的水平风场随着同化卫星观测在不断增强。在 9 月 29 日 18 时，同化卫星观测得到最大同化增量，该时刻同化后的平均分析场能够近似完美的预报出强度演变。同时，在飓风中心区域同化后的分析场得到强的负可降水量增量和巨大的 SLP 正增量(图 4.8i)。

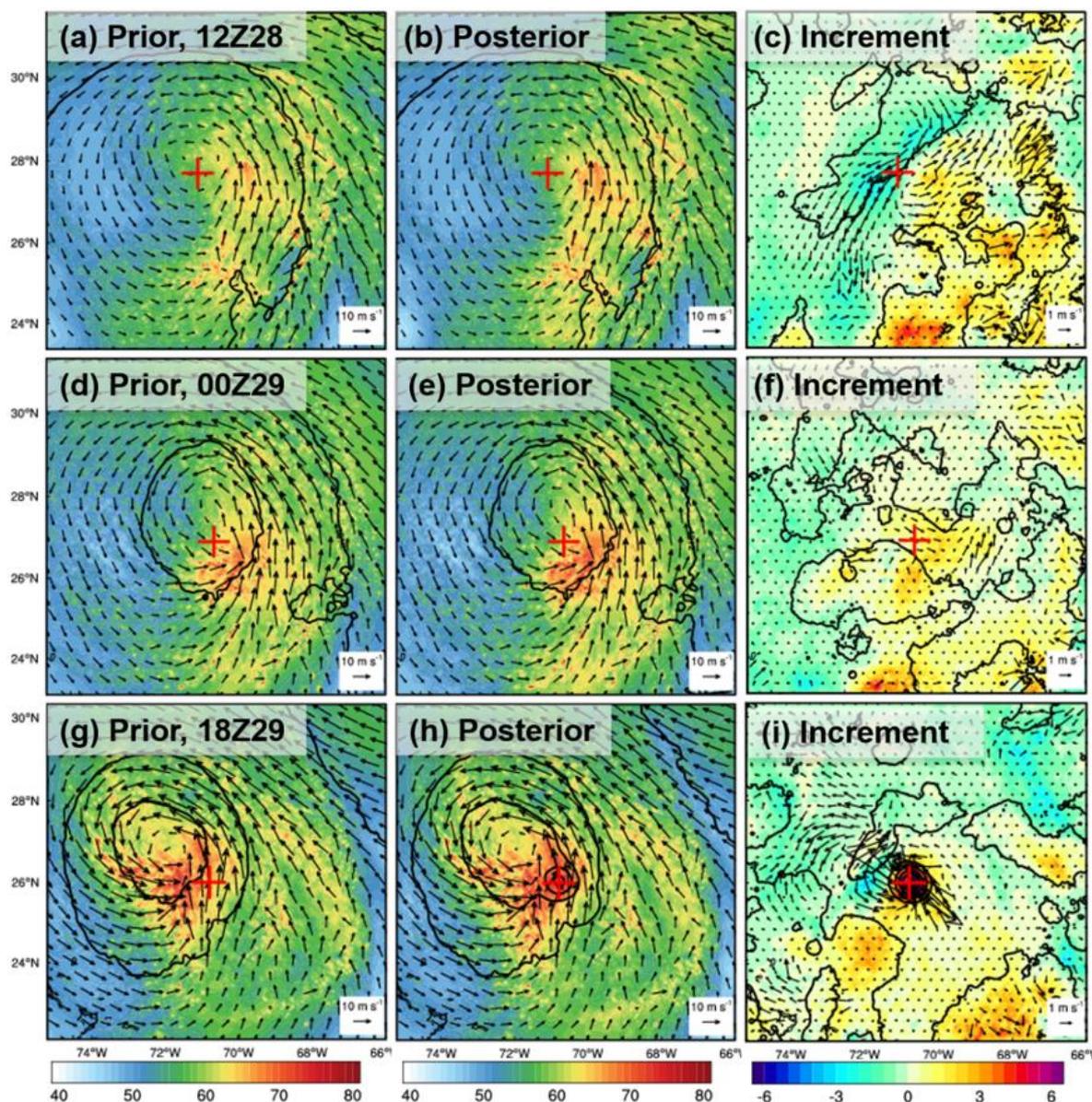


图 4.8 Rad 试验中集合平均分析场的最低模式层的水平风场(矢量)、可降水量(阴影)以及海平面气压分布(黑色等值线), 分别对应着同化前(a, d, g)、同化后(b, e, h)以及同化前后的同化增量(c, f, i)在 28 日 12 时(a-c)、29 日 00 时(d-f)以及 29 日 18 时(g-i)。其中红色十字号表示观测飓风的位置。

Emanuel and Zhang (2017)研究表明, 初始场中飓风内核区域的湿度误差是影响强度预报的十分重要原因, 但在以前的研究中却常被忽略。此外, 位于 TC 中心区域的湿度很难被常规观测平台监测到。静止卫星在全天气条件下的红外水汽通道观测是当前唯一能够长期持续观测到 TC 内核区域的水汽分布。通过先进的基于集合预报的资料同化手段有能力将静止卫星获取的湿度观测同化进入模式的初始场中以得到更加接近观测的 TC 的三维湿度结构, 这必然会给 TC 的强度预报带来较大的帮助。正如上面所讨论, 同化卫星观测的 Rad 试验能有效地改变内核区域的可降水量分布, 但是通过同

化卫星的红外水汽观测如何改善水汽的垂直结构分布还没有检验。接下来将通过方位角平均的相对湿度场的高度半径分布来讨论同化卫星观测对飓风三维湿度场的影响。

图 4.9 中展示了所选 3 个时次对应的同化前集合平均、同化后集合平均以及同化前后集合平均增量的方位角平均的半径高度的相对湿度分布。在第一次同化卫星观测后, 在距离 TC 中心 60 km 以内得到小的正湿度增量, 而在之外区域中则出现负增量。此外还可以发现, 在 3-15 km 垂直高度上得到较大的正相对湿度增量(图 4.9c)。无论怎样, 在第一次同化结束后, 与之前讨论的其他变量增量相类似, 得到增量大小相对较小(图 4.8c)。较大的相对湿度( $> 80\%$ )分布在 5 km 以下并位于距离 TC 中心 300 km 以外的区域(图 4.9a 和 4.9b)。再通过 5 次循环同化至 29 日 00 时, 湿度增量主要分散在模式垂直层的中层, 并且增量最大值出现在 9 km 高度上以及距离 TC 涡旋中心 120 km 以外的区域, 这使得同化后的平均分析场在 15 km 高度上得到一个清晰的次级相对湿度中心, 整个 TC 中心区域的相对湿度都得到显著增强(图 4.9f)。强湿度区域被抬升至 9 km 高度以上, 同时最强的湿度中心位于距离 TC 中心 60 km 以内的内核区域。随着同化更多卫星观测, 更强的湿度分布于更高的垂直高度, 达到 12 km(图 4.9h 和 4.9i)。同样在此时刻, 在模式低层( $< 3$  km)尤其距离 TC 中心 100 km 以内区域填充着很大的正湿度增量。还可以发现最大的正湿度增量和负相对湿度增量分别出现在高层 TC 中心附近和距离中心较远的中层区域(图 4.9g)。最终, 一个清晰的更紧密且更深厚的飓风湿度结构随着不断同化卫星观测而得以形成(图 4.9i)。

接下来进一步探讨同化全天条件下的卫星观测对于 TC 的三维动力结构的影响。图 4.10 展示了 Rad 试验的同化前、同化后以及同化前后增量的切向风风速方位角平均的半径高度剖面, 分别对应之前所选择的 3 个时刻。随着同化的不断进行, 切向风大小连续不断增强(图 4.10c, 4.10f 和 4.10i), 同时在模式垂直层的中部约 6 km 高度出现一个不断增强的显著最大值中心(图 4.10b, 4.10e 和 4.10h)。从 3 个时刻的增量来看, 在第一次同化后仅仅获得很小的正增量, 表明该时刻并没有能够明显提高 TC 的动力场(图 4.10c)。同化到 9 月 29 日 00 时, 在 5 km 高度距离 TC 中心 120 km 至 300 km 的区域, 得到一个很强的切向风风速增量。同时在距离飓风中心 150 km 范围内的中层区域得到正的切向风增量(图 4.10e)。至 29 日 18 时, 在飓风 Joaquin 内核区域的水平和垂直方向上切向风的强度都得到显著增强(图 4.10h 和 4.10i)。该时刻同化前的集合平均场仍然表现为松散的切向风内核结构且在低层距离 TC 中心 180 km 内切向风风速几乎为 0。随着红外辐射观测被同化进入初始场中, 可以在同化后的平均分析场中模拟出延伸至 18 km 高度上的更强且更紧密的飓风 Joaquin 内核结构, 这与前人对飓风观测和模拟中得到的切向风结构一致(图 4.10h)。

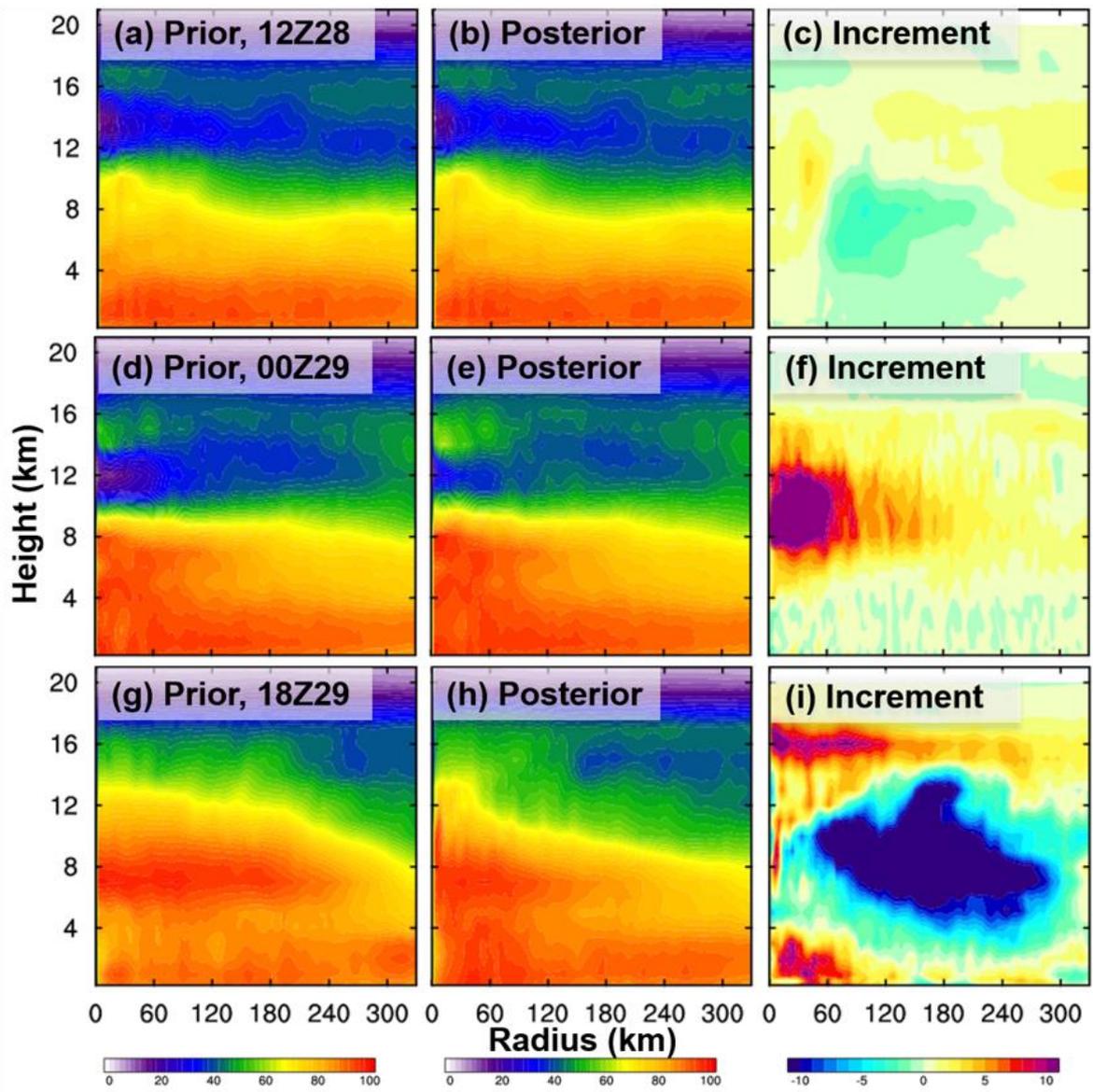


图 4.9 Rad 试验中集合平均分析场的方位角平均的相对湿度的半径高度分布，分别对应着同化前(a, d, g)、同化后(b, e, h)以及同化前后的同化增量(c, f, i)在 28 日 12 时(a-c)、29 日 00 时(d-f)以及 29 日 18 时(g-i)。

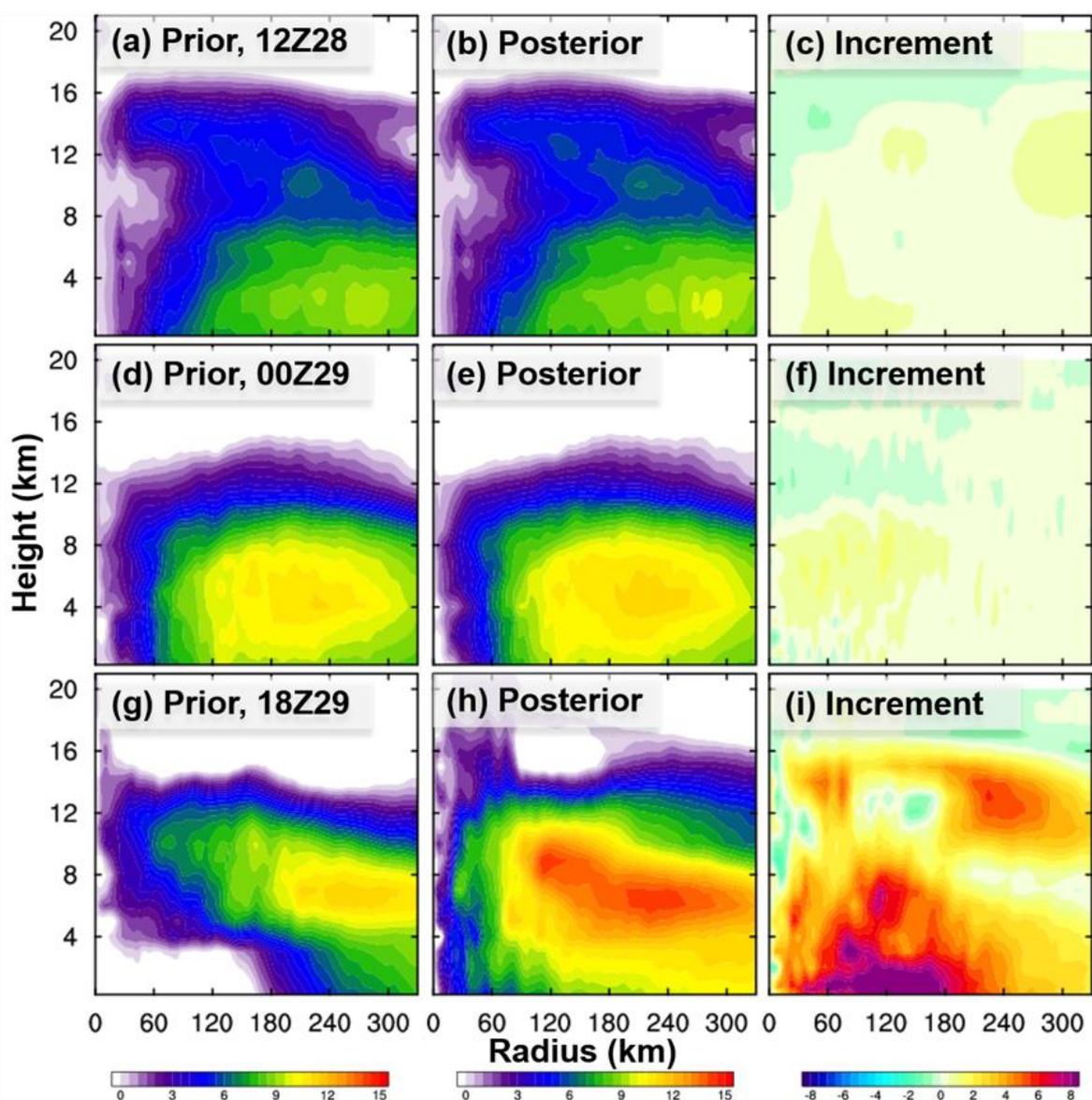


图 4.10 Rad 试验中集合平均分析场的方位角平均的切向风风速的半径高度分布, 分别对应着同化前(a, d, g)、同化后(b, e, h)以及同化前后的同化增量(c, f, i)在 28 日 12 时(a-c)、29 日 00 时(d-f)以及 29 日 18 时(g-i)。

#### 4.5.4 全天条件下的卫星水汽通道观测对 Joaquin 暖核结构的影响

暖核结构是 TC 最显著的特征之一, 这里我们将检验红外辐射水汽观测对飓风 Joaquin 暖核结构的影响。扰动温度的方位角平均常常被用于检验 TC 的暖核结构(Stern and Nolan 2012; Stern and Zhang 2016)。

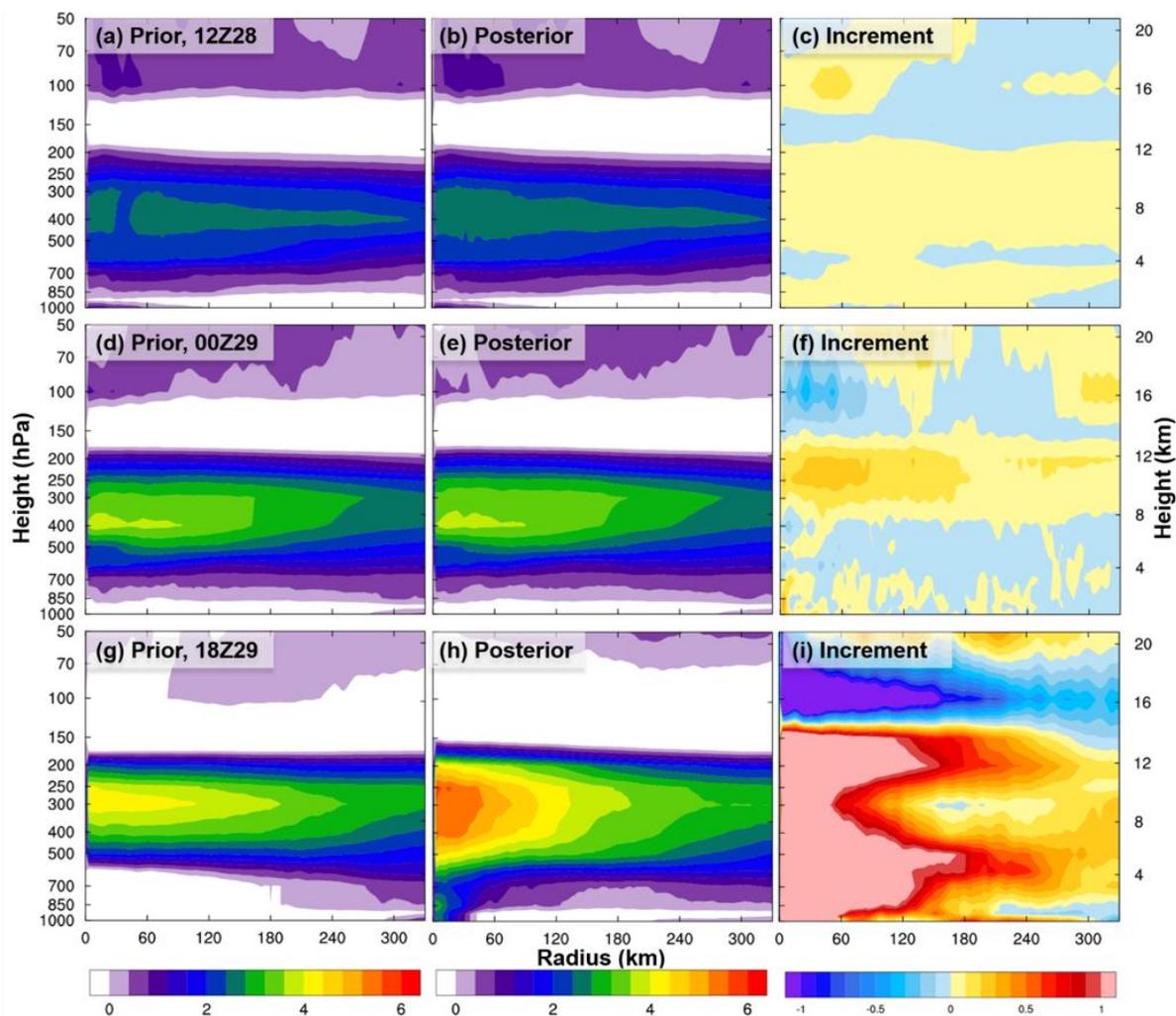


图 4.11 Rad 试验中集合平均分析场的方位角平均的扰动温度的半径高度分布, 分别对应着同化前(a, d, g)、同化后(b, e, h)以及同化前后的同化增量(c, f, i)在 28 日 12 时(a-c)、29 日 00 时(d-f)以及 29 日 18 时(g-i)。温度参考廓线为 Jordan (1958)。

图 4.11 分别展示了同化前集合平均、同化后集合平均以及同化增量的扰动温度的方位角平均分布。由于计算扰动温度需要一个温度参考廓线, 这里使用了常用的 Jordan (1958) 温度观测廓线。在第一个同化时刻 9 月 28 日 12 时, 从同化前的集合平均场中可以看出虽然穿越整个 Joaquin 内核中心的扰动温度都相对较弱, 但是在中层大约 450 hPa 左右的高度上已经存在一个扰动温度中心 (图 4.11a)。第一次同化卫星观测后, 在内核区域中可以得到较弱的扰动温度增量(图 4.11c)。在接下来的循环同化中, 扰动温度增量持续增大(图 4.11f 和 4.11i), 可以看出在同化后的分析场中飓风的暖核结构得到快速形成(图 4.11e 和 4.11h)。到 29 日 00 时, 在 400 hPa 的高度上有一个扰动温度最大值, 清晰的暖核结构得到建立(图 4.11d 和 4.11e)。在 150 hPa 到 400 hPa 之间获得较大的正扰动温度增量, 这表明随着卫星观测被同化进入初始场使得飓风 Joaquin 的暖核结构得到显著增强(图 4.11f)。至 29 日 18 时, 在同化前的集合平均分析场中, 飓风 Joaquin

的暖核结构虽然得到进一步增强,但是该结构仍然相对较弱且浅薄(图 4.11g)。在该时刻继续同化卫星观测后,同化后的集合平均分析场可以得到一个更强更紧密且深厚的飓风暖核结构(图 4.11h),这与前人的观测和数值模拟得到的飓风暖核结构很一致(Hawkins and Imbembo 1976; Durden 2013):在 250–300 hPa 高度层存在最大扰动温度中心。非常大的扰动温度增量分布出现在模式的中低层,并从飓风中心延伸至水平方向上 300 km 半径范围内。此外,在模式高层 100 hPa 附近有一个负的最大值增量中心(图 4.11i)。

更加有趣的是,同化后的平均分析场中可以模拟出在低层 850 hPa 附近出现一个扰动温度的次级中心(图 4.11h),这与前人的观测研究很一致。还可以发现,如果不能连续同化足够多的卫星观测,平均分析场虽然能够模拟出高层的最大扰动中心,而无法得到低层的次级中心(图 4.11g)。同时在 NoRad 试验中,从始至终都无法得到低层的次级中心,这是由于 NoRad 试验中没有同化能反应 TC 内核结构的高分辨率观测资料。

#### 4.5.5 Rad 和 NoRad 试验对飓风结构模拟的差异

前面的讨论都是针对 Rad 试验中同化观测对分析场中飓风 Joaquin 的动力和热力结构的影响。Rad 和 NoRad 试验同化后平均分析场做的确定性预报及其误差检验中可以十分清楚的看出,在模式初始场中加入静止卫星观测对 TC 预报尤其强度预报的显著影响。那么同化卫星观测和不同化卫星观测究竟对飓风 Joaquin 的动力和热力结构有怎样不一样的影响?接下来将针对这两个试验的同化后分析场进行讨论。

首先对不同时刻的同化和不同化卫星试验得到的平均分析场与 GOES-13 中的通道 4 观测进行对比(图 4.12)。在 3 个时刻的观测中已经可以十分清楚看到的飓风 Joaquin 的涡旋结构,且随着时间 TC 的涡旋结构不断增强(图 4.12a, 4.12d 和 4.12h)。在 9 月 29 日 12 时,在同化卫星观测的分析场中已经能够模拟出与观测相近的飓风涡旋结构,虽然在强度和整体形态与观测有一定的差距(图 4.12a vs. 4.12b)。而在同一时刻没有同化卫星观测分析场中,则几乎无法看到飓风的涡旋结构,虽然在该区域飓风中心附近能得到一定的对流结构,但没有展示明显的飓风涡旋结构(图 4.12a vs. 4.12c)。随着同化更多的卫星观测至 29 日 18 时,在 Rad 试验的分析场中对飓风 Joaquin 结构的模拟更加接近实际观测,强度、结构以及涡旋尺度都得到显著提高(图 4.12e 和 4.12i)。然而,在 NoRad 试验中,虽然同化了更多的常规观测,但是对飓风的涡旋结构的模拟几乎没有任何改善。即使在持续同化至 9 月 30 日 00 时, NoRad 试验依旧无法模拟出飓风的涡旋结构,与观测以及 Rad 试验的平均分析场相差很大(图 4.12e 和 4.12j)。此外值得注意的是,在图 4.12 中可以很明显地看到模拟的涡旋外围亮温值(阴影)和观测存在着很大的偏差,这主要由于 CRTM 模式对静止卫星 GOES-13 的通道 4 的红外辐射亮温的反演存在很大的模式误差。

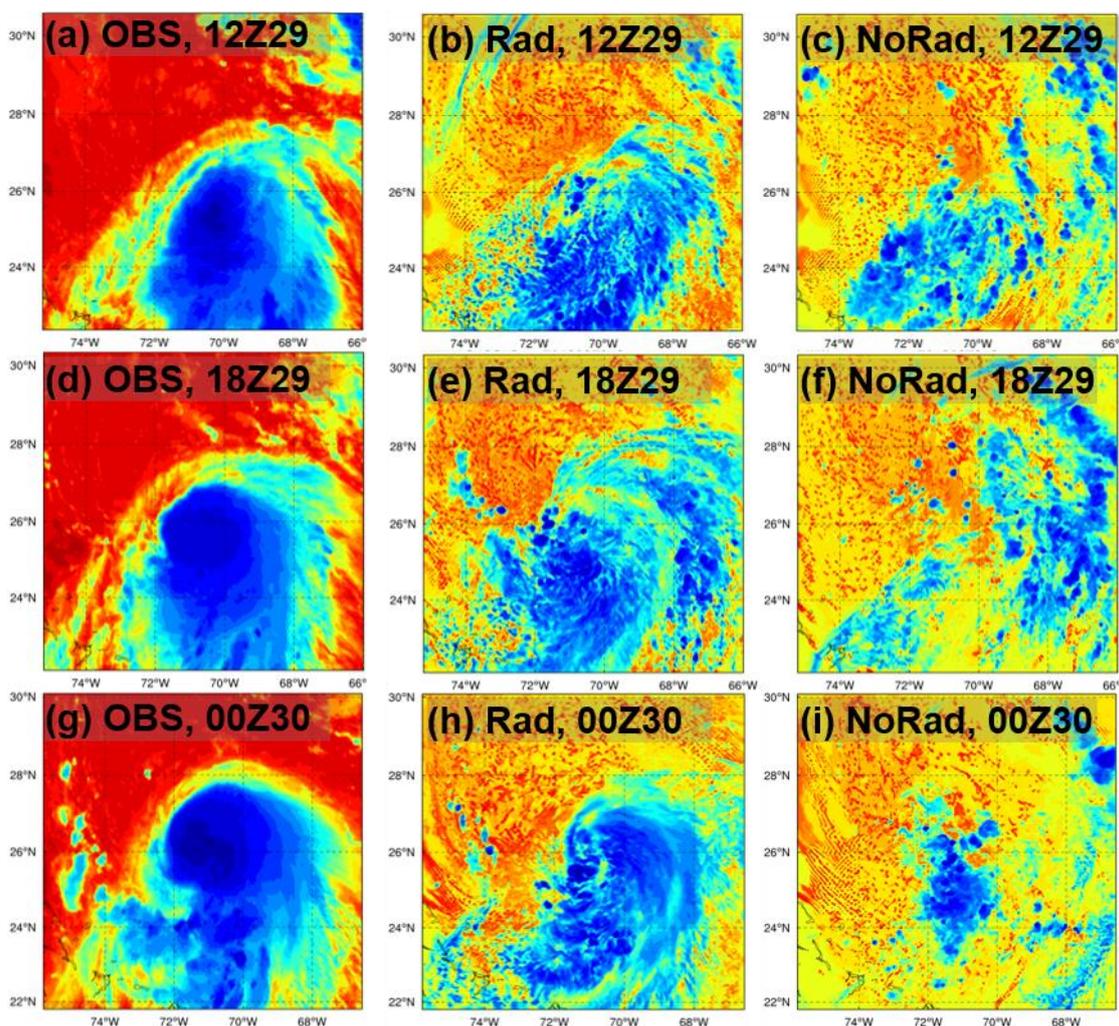


图 4.12 GOES-13 通道 4 的观测亮温(a, d, g)、Rad 试验(b, e, h)和 NoRad 试验(c, f, i)的集合平均分析场的模拟通道 4 的亮温对比, 分别对应 9 月 29 日 12 时(a-c)、18 时(d-f)以及 30 日 00 时(g-i)。

接下来对比不同时刻 Rad 试验和 NoRad 试验同化后的集合平均分析增量在不同高度层的水平风、湿度以及温度水平结构分布差异。图 4.13 中展示了 Rad 和 NoRad 试验在 5 km 高度上的相对湿度和水平风场增量, 同时叠加了对应时刻的 SLP 分布。首先从两个试验的 SLP 演变情况可以看出, 随着循环同化的进行, 在 Rad 试验的分析场中 SLP 显著快速增强, 而在 NoRad 试验中虽然循环同化常规观测和 TC 的位置与强度信息, 但分析场中 SLP 强度仅有微弱增强。这与之前的预报检验和误差统计表现一致。从水平风场增量可以发现, 同化卫星观测的 Rad 试验分析场可以得到具有持续很强的气旋性风场增量, 且增量主要出现在观测的 TC 中心附近。在 NoRad 试验中, 在 TC 中心附近仅能得到很小的风场增量, 这与在 TC 附近仅有有限的常规观测有关。同样的情形在相对湿度的分布中也可以看到。值得注意的是, 相对较大的湿度增量主要出现在观测的 TC 中心周围, 而在 TC 中心的湿度增量几乎接近 0, 这与真实的 TC 结构一致。

同时检验相对低层 3 km 高度上的水平风场和温度场增量分布(图 4.14)。两个试验的水平风场增量基本与 5 km 高度上类似：在 Rad 试验中 TC 中心周围存在很大的气旋性风场增量，而在 NoRad 试验中则仅有微小的增量。位温增量分布显示出与其他变量不一样的特征，在 Rad 和 NoRad 试验中展示出一定的相似性和差异。在 29 日 12 时两个试验的温度增量都很小，虽然在 Rad 试验中 TC 中心周围的值会略大，但是仍不显著。而在 29 日 18 时，在 TC 中心附近尤其是中心位置出现非常大的正位温增量以及外围有负位温增量，但是在 Rad 试验中强位温增量范围更加广。在接下来的时间中，位温增量减小，但大的增量区域还是位于 TC 中心附近，且在 Rad 试验中大的增量范围更广。

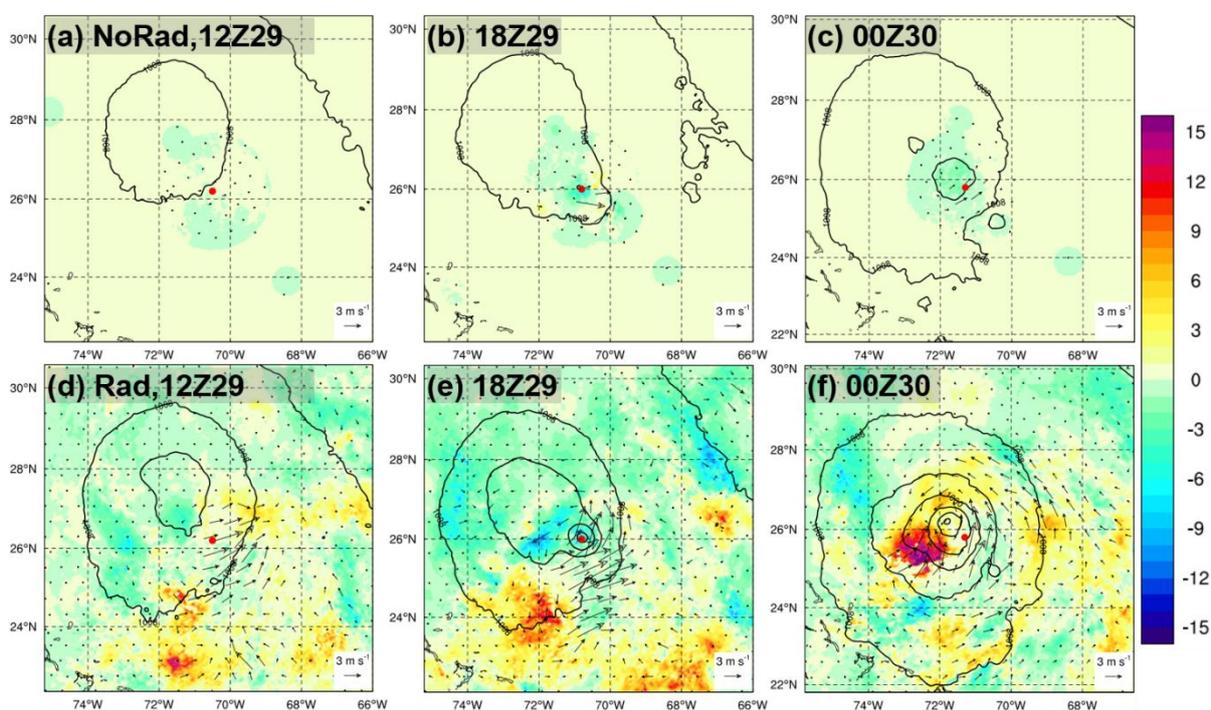


图 4.13 NoRad 试验(a-c)和 Rad 试验(d-f)在 5 km 高度上的水平风场增量(矢量)和相对湿度增量(阴影)，同时叠加了对应的海平面气压分布(黑色等值线)，分别对应 9 月 29 日 12 时(a, d)、18 时(b, e)和 30 日 00 时(c, f)。

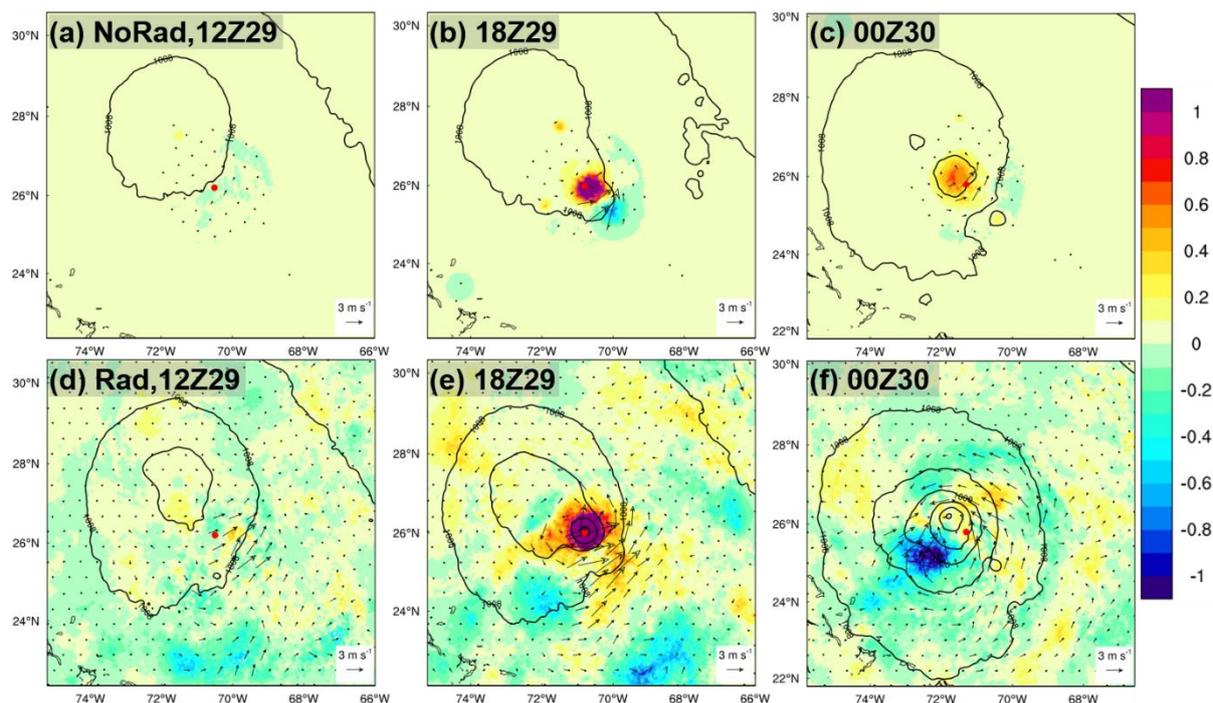


图 4.14 NoRad 试验(a-c)和 Rad 试验(d-f)在 3 km 高度上的水平风场增量(矢量)和位势温度增量(阴影), 同时叠加了对应的海平面气压分布(黑色等值线), 分别对应 9 月 29 日 12 时(a, d)、18 时(b, e)和 30 日 00 时(c, f)。

以上针对 3 个不同时刻对其动力和热力的水平结构演变进行了讨论, 这里将对所有时刻同化后的集合平均分析场进行分析, 对比 1 km 高度上的平均切向风速度随时间演变特征(图 4.15)。在 Rad 试验中, 强的切向风风速在 30 日 00 时已经很明显, 且随着同化更多观测, 切向风风速不断增强, 在 30 日 00-15 时出现强风速中心且延伸至 200 km 以外的区域。而在没有同化卫星观测的 NoRad 试验中, 直到 30 日 18 时才能模拟出强的切向风风速且延伸的范围较小。在接下来的更长同化时间段中, Rad 试验中得到的切向风风速明显强于 NoRad 试验, 同时强风速范围也比 NoRad 试验更广。

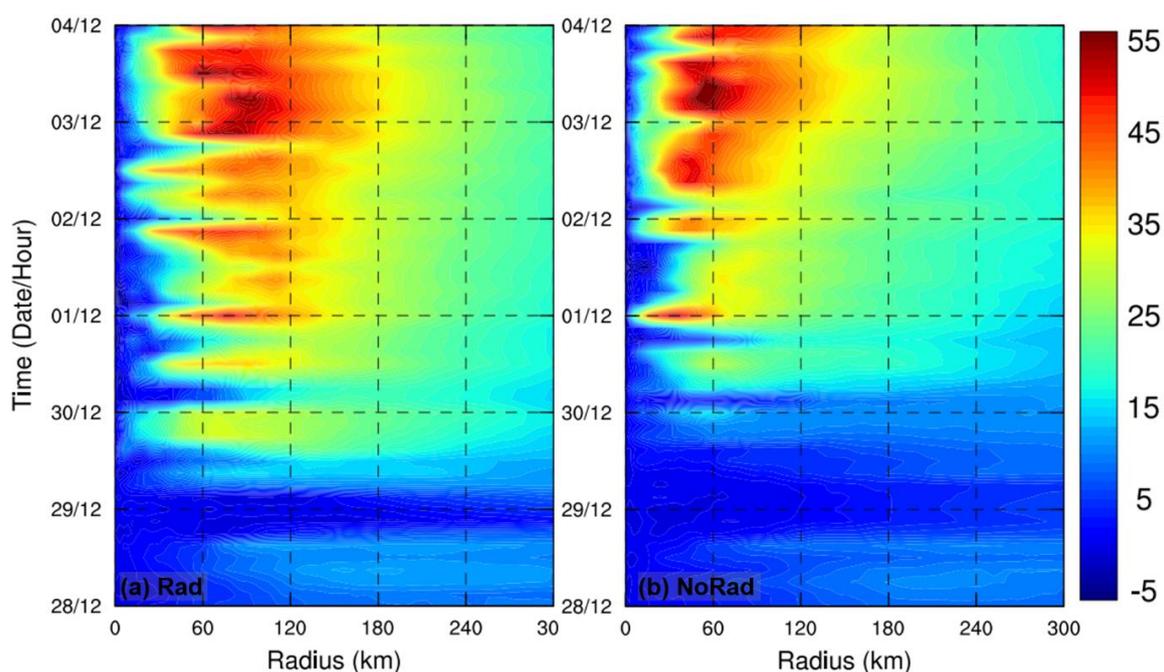


图 4.15 Rad 试验(a)和 NoRad 试验(b)的所有同化时刻同化后的集合平均分析场的 1 km 高度上切向风风速方位角平均的时间半径图。

进一步检验穿过 TC 中心的位温和水平风速的垂直剖面(图 4.16)。随着循环同化的进行, Rad 试验同化后的集合平均分析场中能模拟出十分清晰的深厚紧密的暖核结构, 而在 NoRad 试验中直到最后时刻才能看到一个浅薄且不明显的暖核结构。此外, 相较于 NoRad 试验, 在 Rad 试验中强水平风速明显延伸到更高的高度, 且在飓风中心呈现出不对称的风场垂直结构: 在中心的东边有更强更深的水平风速分布。这些特征也与前人研究得到的飓风结构更加类似。

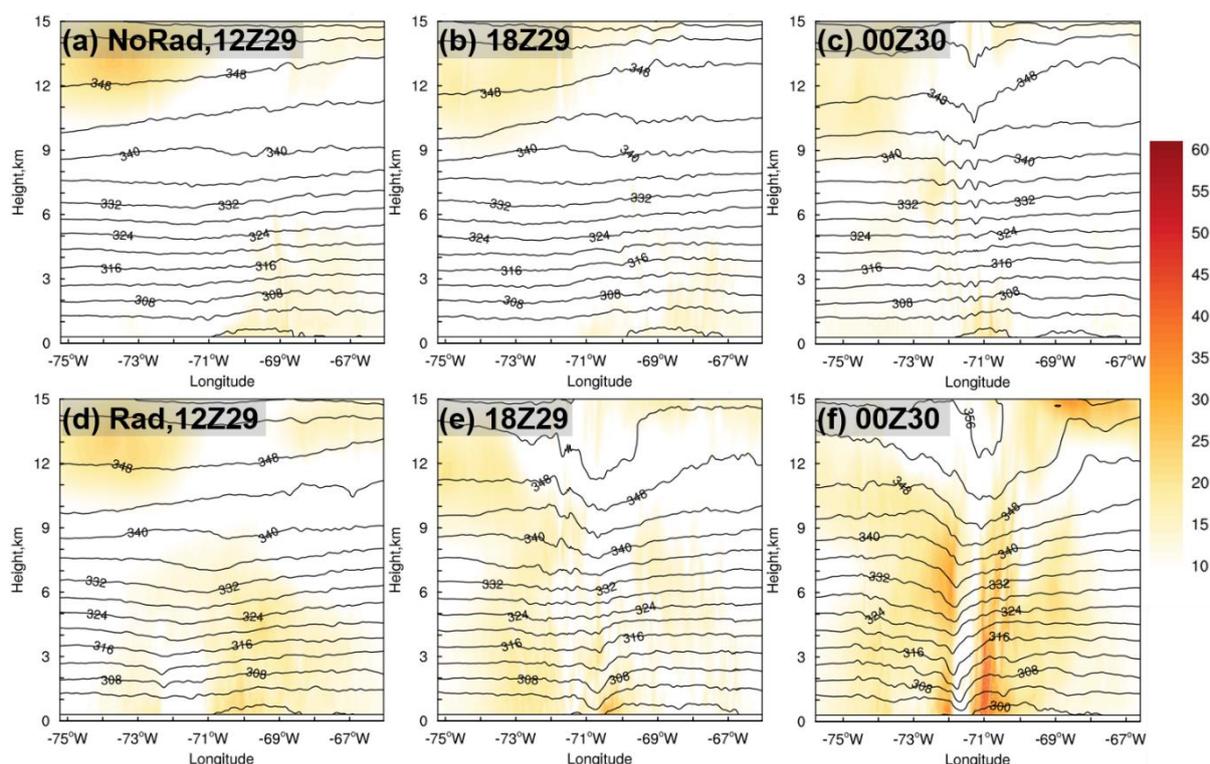


图 4.16 NoRad 试验(a-c)和 Rad 试验(d-f)的集合平均分析场的穿过模拟飓风中心的東西向的水平风速(阴影)和位势温度(黑色等值线)的垂直剖面图, 分别对应 9 月 29 日 12 时(a, d)、18 时(b, e)和 30 日 00 时(c, f)。

## 4.6 本章小结

本章探讨了基于高分辨率对流解析 WRF 模式的 EnKF 同化预报系统连续循环同化美国上一代静止卫星 GOES-13 在全天气条件下的红外辐射水汽通道观测(通道 3)对飓风 Joaquin 预报尤其是强度和结构预报的影响。飓风 Joaquin 是 2015 年北大西洋上生成发展的超强飓风, 由于业务预报对其路径和强度预报均表现较差, 致使发布了错误预警, 使美国东部沿海岸地区民众产生了巨大的恐慌。

研究表明, 在同化了常规观测以及飓风的位置和强度信息的基础上, 基于额外同化卫星观测的分析场做的确定性预报中, 最低海平面气压(Pmin)和最大海平面风速(Vmax)的预报都得到了显著改善, 其相较于不额外同化卫星资料的试验的强度预报误差减小了近 50%。同化卫星观测对路径预报影响较小, 仅在前两天得到一定的改善, 在更长的预报时间中路径预报甚至变差, 这很可能是由于飓风 Joaquin 的路径预报误差主要来源于距离 TC 中心 600 km 外的区域, 强度预报误差则主要受到距离 TC 中心 600 km 以内区域影响, 尤其是 300 km 内的内核区域(Nystrom et al. 2018), 而本研究的同化试验仅使用观测更新距离 TC 中心 600 km 以内的模式变量。

为了进一步检验卫星观测的同化对预报的影响, 本章详细考察了同化卫星观测对

飓风 Joaquin 的动力、热力以及湿度场结构的影响。结果表明,逐 3 小时同化卫星观测能够不断改善初始场中飓风的涡旋结构,飓风的三维动力(风场)和热力(温度和湿度)结构都得到显著提高,且更加符合前人所观测到的飓风结构特征。随着不断同化卫星观测进入初始场中,飓风的暖核结构逐渐发展成熟,且在同化后的分析场中模式的底层大约 850 hPa 左右出现一个与观测十分一致的次级最大位温扰动。如果不持续同化卫星观测或者只同化常规观测和飓风的位置和强度观测,则不能得到这种真实的飓风内核结构。



## 第五章 新一代静止卫星向日葵 8 号全天气条件下红外水汽通道观测的同化

### 5.1 引言

上一章的研究有力地证明了 EnKF 方法同化全天气条件下的静止卫星观测有能力显著提高 TC 的强度和结构预报。然而，该研究同化的是美国上一代静止气象卫星，其监测能力和时空分辨率均很有限。新一代静止卫星如日本的 Himawari-8/9、美国 GOES-16/17 以及中国的 FY-4A 的时空分辨率相比于上一代静止卫星都得到了极大的提高，且有更多的观测通道，为将来数值预报的改善提供了十分宝贵的精细观测。考察新一代静止卫星全天气条件下辐射资料的同化对 TC 强度预报的影响有着十分重要的科学意义和实际应用价值。

本章探索使用高分辨率云解析 WRF-EnKF 同化日本向日葵 8 号卫星全天气条件下的水汽通道观测对 2017 年登陆我国产生巨大灾害的台风“天鸽”的强度和结构预报的影响。

### 5.2 个例介绍

台风“天鸽”是 2017 年 8 月下旬在太平洋生成的第 13 号 TC。“天鸽”这个名称仅使用了这一次，便由于给我国珠江三角洲一带造成灾害性破坏，被我国在第 50 届台风委员会提交除名申请并通过。台风“天鸽”以巅峰强度在珠江三角洲地区登陆，导致澳门气象局悬挂自 1999 年强热带风暴“约克”18 年来首个十号 TC 警告信号；香港天文台亦发出自 2012 年台风“韦森特”后 5 年来首次十号 TC 警告信号，并成为 1999 年强热带风暴“约克”以来首次港澳两地之最高 TC 警告信号同时生效的台风个例。“天鸽”不但带来极具破坏性的风力，导致澳门境内测得破纪录的持续风速，而且其风暴潮叠加天文大潮更引致珠江口地区多处严重洪涝，珠海和澳门的灾情尤其严峻，成为该两地超过半个世纪最惨重的风灾，澳门气象局局长更因预报和预防严重失误而引咎辞职。

2017 年 8 月，西北太平洋持续受到亚热带高压脊控制，于 8 月 18 日在硫磺岛西南方向海域生成一个热带低压系统，于 19 日发展成为热带低压。该系统结构持续表现为结构松散且有多个中心，但是螺旋性增强以及垂直风切变减弱，加上海水温度达到 30℃，于 20 日 15 时左右加强为热带风暴，并被命名“天鸽”与给予编号 1713。在 21 日，“天鸽”附近的垂直切变稍微加强使得系统的低层环流中心变得暴露，深层对流向西

南偏离,且形成新中心出现环流调整,取代暴露和逐渐减弱的原中心。由于受到环流的调整和亚热带高压脊西南部短暂出现的影响,“天鸽”向西缓慢移动,更是一度出现偏西南的路径。至 22 日,“天鸽”恢复以时速约  $25\text{km h}^{-1}$  向西移动,穿越吕宋海峡,早上移入南海北部。此时“天鸽”附近的垂直风切变减弱,由于南海近一个月没有 TC 活动使得该区域积蓄巨大能量,因此天鸽吸收了积存已久的庞大能量,在白天急剧增强,发展出了“中心密集云团”和“云卷风眼”结构,并升级为强热带风暴。从卫星云图上可以看到“天鸽”中心逐渐出现风眼的结构,于 21 时左右加强成为台风。当天晚上“天鸽”再度减速移动,至 23 日开始稳定的西偏北移动,并且再次恢复  $25\text{km h}^{-1}$  的时速,直逼珠江口偏西,仍然不断加强。由于南海东北部海温超过  $32^\circ\text{C}$  较正常温度高了近  $4^\circ\text{C}$ ,同时垂直风切变减弱、低层辐合和高层辐散等有利于 TC 强度大幅度增强的条件,随后“天鸽”快速加强至最强强度达到强台风级别,并以最强强度于广东省珠海市金湾区登陆。由于受到登陆与地面摩擦影响,“天鸽”快速减弱并移入广东西部,之后“天鸽”的残余低压继续深入内陆为云南和四川带来大暴雨。

实时业务预报对于“天鸽”的路径预报虽然前期存在着一定的偏差,但是整体趋势与观测一致,然而业务预报对强度的预报却表现很差,从台风“天鸽”生成一直到登陆阶段均无法预报出其强度增强和减弱的演变过程。在之前的研究中已经表明,对于强度预报较差很大程度上是由于目前业务所用的初始场分辨率和台风预报初始化方法缺陷引起。

### 5.3 试验设置与方法

与上一章类似,本章同样使用高分辨率云解析 WRF 模式的 EnKF 同化预报系统同化在全天气条件下的卫星红外通道观测数据。通过之前的讨论和研究得出:同化高层的水汽通道卫星观测会对 TC 的预报改善效果更显著,以及由于不同通道的观测之间可能会存在着很大的关联,不易将其完全区分开,尤其是新一代静止卫星更多的水汽通道会让这个问题更加复杂化,因此本研究仍然采用仅同化单一水汽通道观测(通道 8)。由于在模式区域内的观测数量十分庞大,为了稀疏同化的观测数,这里仅同化  $12\text{km}\times 12\text{km}$  格点上的卫星观测。

在 2017 年 8 月 20 日 00 时对 NCEP 的 FNL  $1^\circ\times 1^\circ$ 再分析资料使用 WRF 的 3DVar 的默认设置进行随机平衡扰动生成 60 个集合成员,然后进行 12 小时的短期集合预报。从 8 月 20 日 12 时开始进行循环同化直至 21 日 00 时,每 30 分钟同化一次卫星观测,并且利用每 3 小时的同化后集合平均分析场做确定性预报(图 5.1)。与上一章同化试验不同的是,本章的试验不同化常规观测和 TC 的位置和强度信息。此外,由于进行高频率循环同化试验需要大量的计算资源,这里不再独立进行另外一组集合同化试验作为

对比参考，而使用不同起始时刻的 FNL 做单一确定性预报的 NoDA 试验作为同化的参考对比试验。初始观测误差为  $3\text{m s}^{-1}$ 。其他试验设置与上一章中同化 GOES-13 相同。试验网格数和网格格距与上一章相同，但是模式网格中心位置位于西北太平洋，具体网格设置参见图 5.2。该图中还包含了观测路径和地形分布特征。

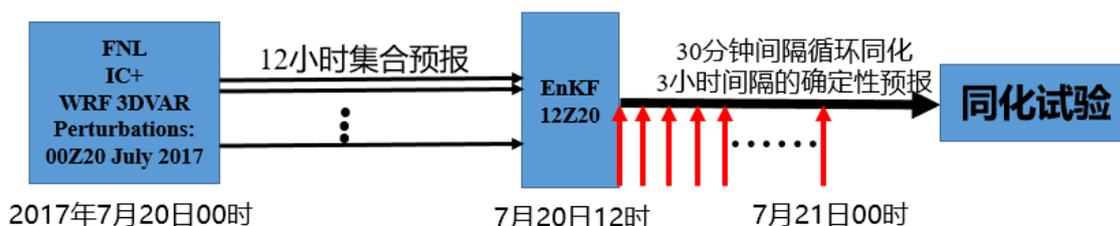


图 5.1 试验流程图。在 2017 年 7 月 20 日 00 时利用 WRF 的 3DVar 系统对 FNL 进行随机平衡扰动生产 60 个集合成员，再进行 12 小时集合预报，之后从 20 日 12 时至 21 日 00 时每 30 分钟进行一次循环同化。再利用每 3 小时一次的集合平均分析做确定性预报。其中红色垂直箭头线表示同化。

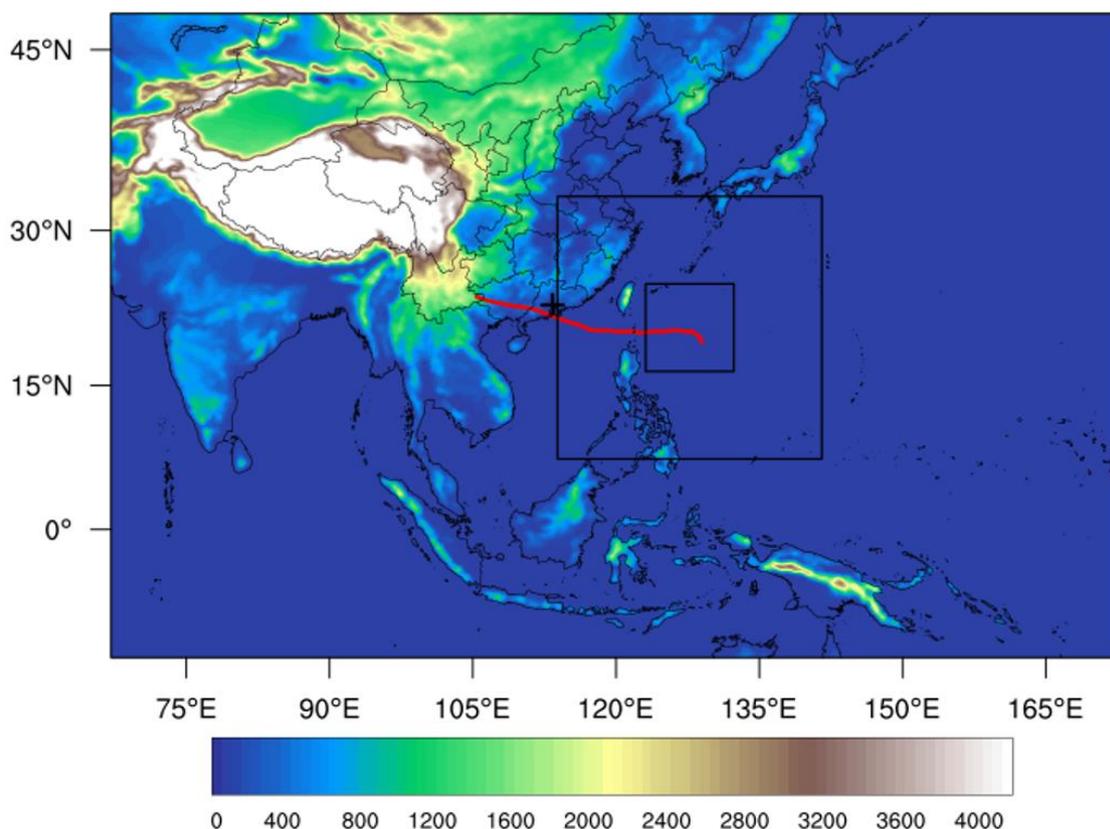


图 5.2 试验网格设置。其中阴影表示地形高度分布，红色实线表示日本气象厅(JMA)对台风“天鸽”的实际观测路径。

由于本部分的研究还在进行中，尚未完全成文用于发表，因此接下来的结果分析仅为研究的一部分，主要集中研究同化前后对于初始场中的 TC 涡旋结构的影响以及对

接下来的预报影响。

## 5.4 试验结果分析

### 5.4.1 同化前后集合平均分析场与观测对比

在第一个同化时刻 2017 年 8 月 20 日 12 时, 该时刻台风“天鸽”处于较弱阶段, 强度约为 998 hPa。从卫星水汽通道观测的亮温分布上可以看出, “天鸽”的核心结构还比较松散(图 5.3a)。在第一次同化前的集合平均分析场中, 即通过 12 小时的短期集合预报获取到的集合平均预报场, 再使用 CRTM 模式计算得到模式中的水汽通道亮温结构(图 5.3b), 可以发现: 通过集合预报得到的同化前集合平均分析场几乎没有反应出台风“天鸽”的内核结构, 还可以看出在内核结构外围出现虚假的对流。短期集合预报的平均分析场对高层水汽通道的亮温模拟与观测偏差很大(图 5.3a vs. 5.3b)。通过第一次同化新一代静止卫星观测后得到的集合平均分析场中发现: 仅同化一次卫星观测便可以捕捉到与观测相近的“天鸽”的内核结构, 虽然与观测比还相对较弱。此外还可以非常清晰地看到, 同化卫星观测后得到的平均分析场能显著消除内核区域外的虚假对流, 同时对于外围真实的对流却能够较好地模拟。不但如此, 对于湿度较弱区域(东北角)也能够通过同化卫星观测得到更好模拟。至 20 日 15 时, 台风“天鸽”强度持续增强, 从卫星的水汽通道观测中可以看出, 台风“天鸽”的内核结构已经发展得很成熟。随着 30 分钟间隔的循环同化至该时刻, 同化前的集合平均分析场中已经能够得到与观测很接近的“天鸽”内核结构, 但是强度相对偏弱且精细结构不够清晰。经过同化卫星观测后, “天鸽”的内核强度得到提高, 且得到更加精细的结构, 从而更接近观测。与第一次同化卫星观测后一样, 同化后能很好地消除内核区域外的虚假对流信息, 同时还能提高无云区域的模拟。随着越来越多观测被同化进入模式初始场, 至 20 日 18 时, “天鸽”发展得更加成熟且强度更强, 同化后的分析场与观测十分接近, 同时在网格区域内对“天鸽”的内核和周围环流结构都模拟得十分清楚。对于虚假对流的消除也十分有效。

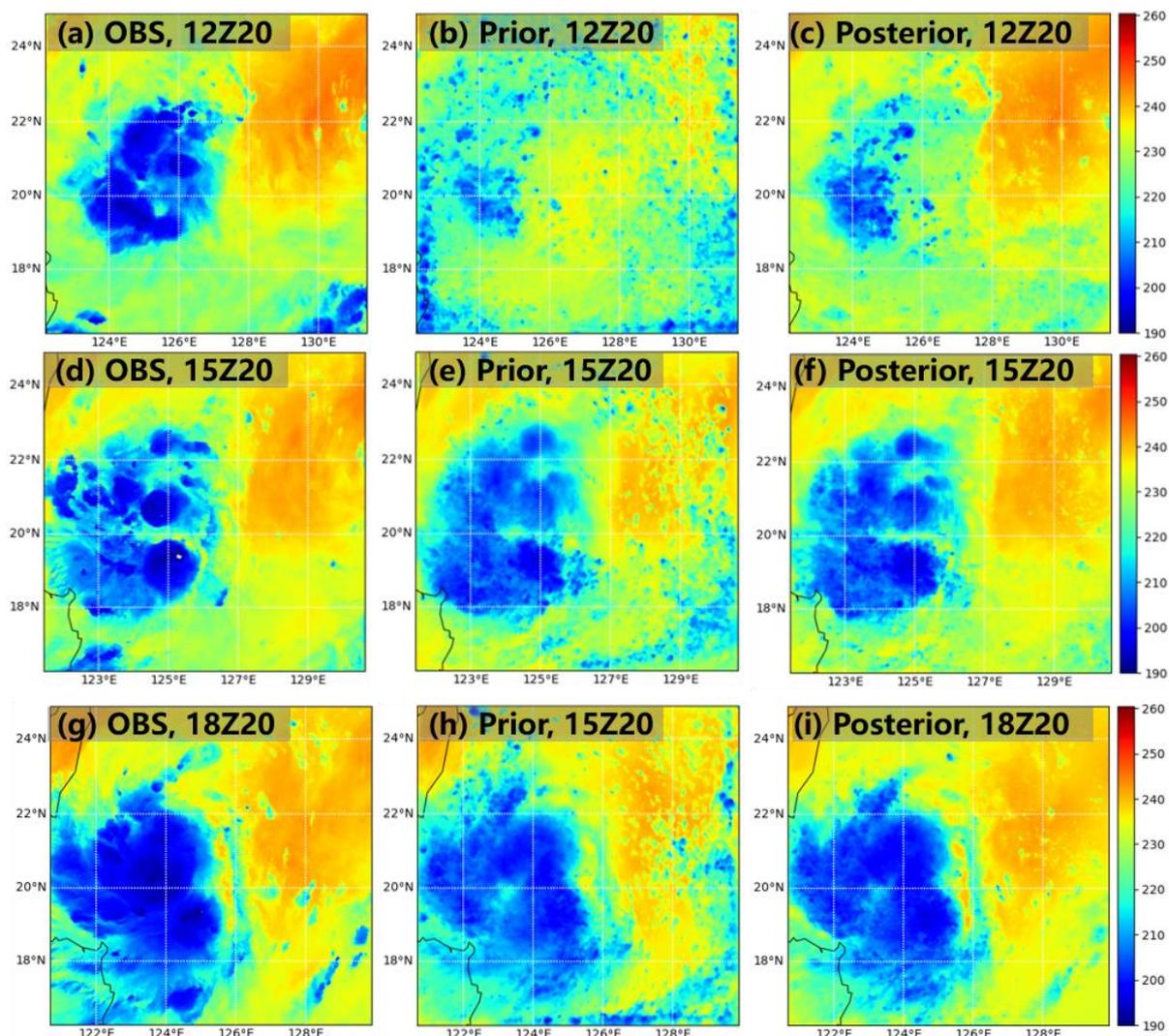


图 5.3 向日葵 8 号通道 8 的观测亮温(a, d, g)、同化试验的同化前(b, e, h)和同化后(c, f, i)集合平均分析场的模拟通道 8 的亮温, 分别对应 7 月 20 日 12 时(a-c)、15 时(d-f)和 18 时(g-i)。

前面对比了高层的红外水汽通道观测(通道 8), 由于新一代静止卫星具有 10 个红外辐射通道用于监测不同垂直高度上的云结构信息, 接下来将利用低层的卫星红外辐射通道观测(通道 13)来检验低层“天鸽”结构随着同化卫星观测的演变情况。从图 5.4 的观测(图 5.4a, 5.4d 和 5.4h)与图 5.3 对比可以看出, 高层整体结构和低层基本相似, 但是对“天鸽”的细微结构可以在低层红外辐射通道观测中看得更加清晰。通过连续循环同化前后的平均分析场与观测相比可以发现, 同化后的集合平均分析场对低层台风“天鸽”内核涡旋和外围环流结构的描述不断与观测接近, 能够快速并十分准确地捕捉到“天鸽”的精细结构。还能发现与高层一样, 同化卫星观测有能力消除低层的虚假对流。另外, 在低层, 对于细小对流结构的描述更加显著接近观测。

仅从同化前后与卫星的高层和低层红外辐射观测对比可以十分清楚地得到结论: 使用集合同化系统同化卫星观测能够显著提高初始场对台风“天鸽”的内核结构和环

流的精确描述，使得对流结构与观测更加接近，而对之前存在的虚假对流则能够有效地消除。同时还可以发现，对其结构改善效果表现十分快速，仅仅同化一次观测就能得到同化后的分析场涡旋结构显著靠近观测，再经历 3 小时的连续同化后得到的分析场几乎能够达到和观测相同的强度和结构。除了表明使用集合同化方法同化全天气条件下卫星观测十分有效外，还能表明新一代的静止卫星观测在提高对流尺度的模拟上具有十分巨大的潜力。

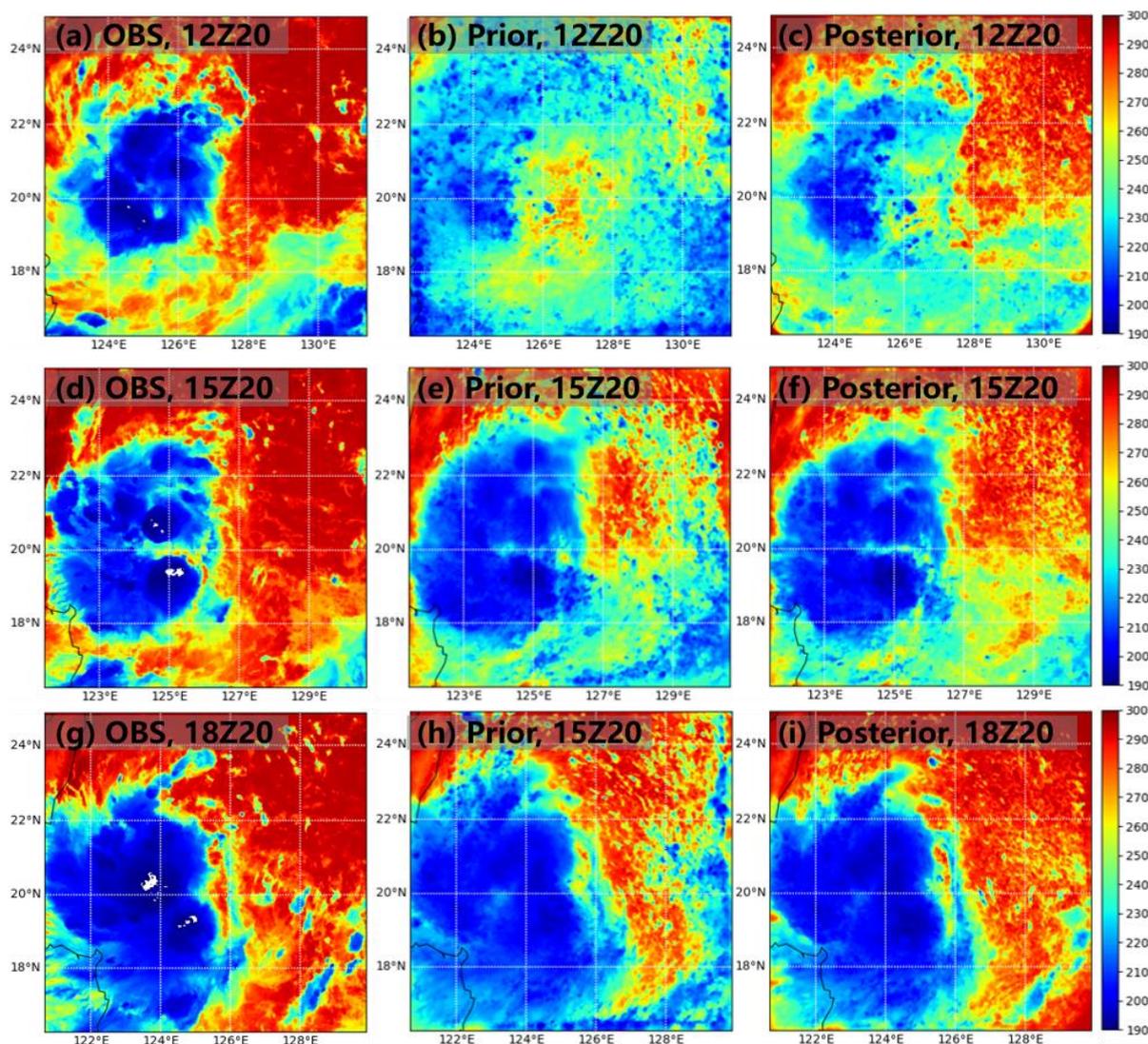


图 5.4 向日葵八号通道 13 的观测亮温(a, d, g)、同化试验的同化前(b, e, h)和同化后(c, f, i)集合平均分析场的模拟通道 13 的亮温，分别对应 7 月 20 日 12 时(a-c)、15 时(d-f)和 18 时(g-i)。

#### 5.4.2 同化卫星观测对水平风场和可降水量的影响

前面已经提到，TC 的内核区域内的风场和湿度场是决定模式对 TC 强度、结构以及降水预报的十分重要的两个要素，但是常规观测平台却无法获取由于长期处于海上

TC 的湿度观测。静止卫星观测几乎是唯一能够通过红外探测获取到 TC 的湿度信息。接下来将检验同化了卫星的水汽通道观测对于 TC 的可降水量分布和 wind 结构的影响。

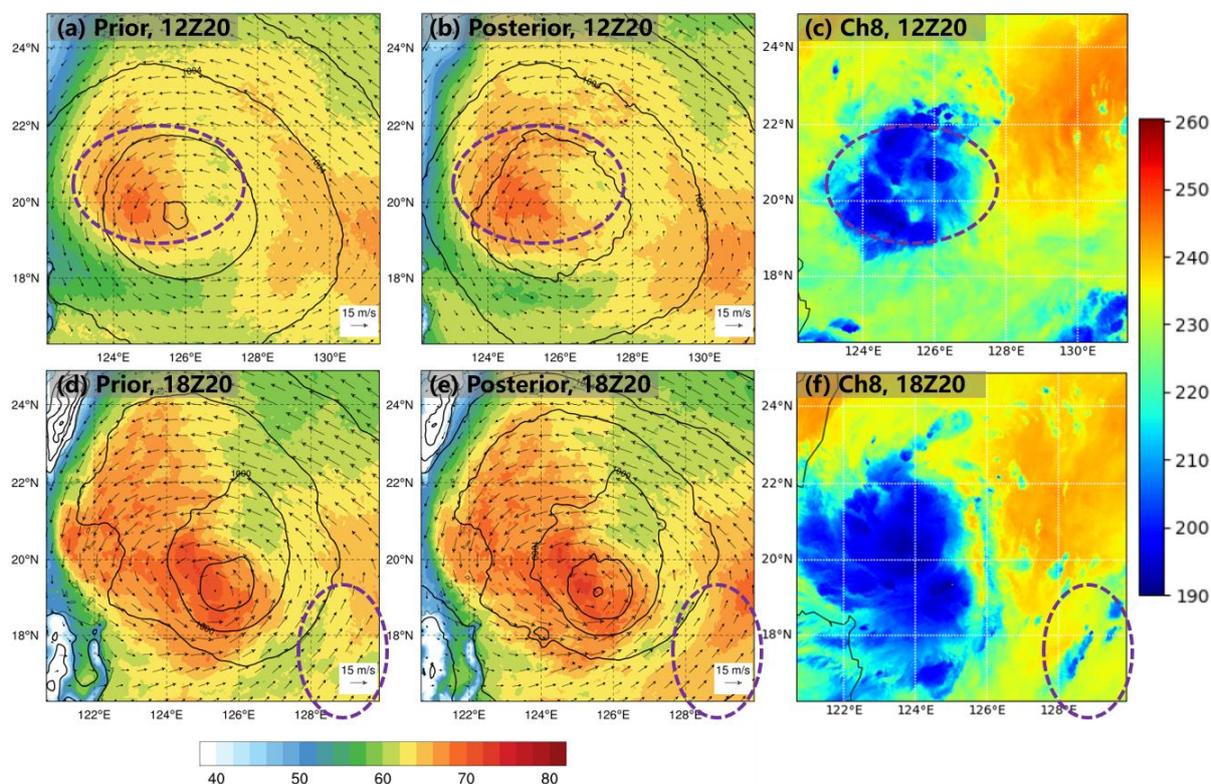


图 5.5 同化试验的集合平均分析场的同化前(a, d)、同化后(b, e)的 850 hPa 高度层上的水平风场(矢量)和相对湿度场(阴影)分布, 并叠加了对应的海平面气压(黑色等值线), 同时与向日葵 8 号的高层水汽通道 8 观测(c, f)对比, 分别对应 2017 年 7 月 20 日 12 时(a-c)和 18 时(d-f)。其中虚线椭圆为了对比作辅助参考。

图 5.5 展示了 850 hPa 高度上的不同时刻的同化前和同化后集合平均分析场的可降水量和水平风场。由于可降水量可以认为是整个垂直层上湿度叠加, 能够更有效地反应出分析场中的所有水汽分布。此外图 5.5 中还展示了高层水汽通道的红外辐射观测(通道 8), 用来对比同化前后的水汽分布与观测差异。在第一个同化时刻 2017 年 8 月 20 日 12 时, 可以看出较大水平风主要集中在 TC 中心的左侧区域, 同时强可降水量也分布于该区域内。通过与卫星红外水汽的通道 8 观测对比发现, 可降水量的分布特征与卫星观测的水汽分布很一致, 但是强水汽的分布范围较小。经过同化一次卫星的水汽观测后, 从同化后的分析场中可以看到位于强风区的风场得到增强, 可降水量强度较大的区域分布得到扩大, 这种分布与卫星的湿度观测更加接近。经过连续 6 小时的循环同化后于 8 月 20 日 18 时, 从该时刻同化前的集合平均分析场可以看出, 台风“天鸽”的强度得到加强, 这与观测很一致。从整体可降水量与观测的湿度分布上看, 它们分布范围很接近。从同化后的结果可以看出, “天鸽”主体部分的结构分布并未得到明显的改变, 但对于“天鸽”中心区域湿度得到加强, 此外对于湿度改变最显著的区域发

生在涡旋结构的外围，尤其在 TC 中心的东南向。对该地区的可降水量强度得到很大增强，这与从卫星的红外湿度通道观测一致。

可见，使用集合同化系统同化静止卫星的红外水汽通道观测后，水平风场、湿度以及强度都得到显著地增强，并通过与卫星观测对比发现，同化后分析场中湿度分布与观测十分接近。此外，对内核结构的外围区域的湿度场模拟也与观测更加一致。

### 5.4.3 同化卫星观测对预报的影响

前面分析表明同化卫星观测显著改善“天鸽”的风场、湿度以及更加精细的对流结构信息。虽然如此，但是通过同化卫星观测能够得到更好地描述出“天鸽”精细结构的分析场能否提高对“天鸽”的预报尤其强度预报，并与利用 FNL 再分析资料直接预报的结果对比。

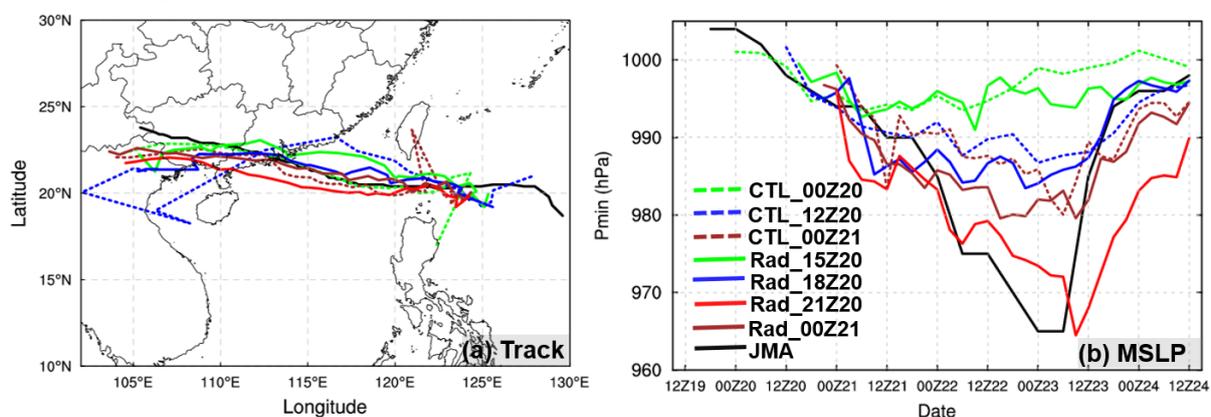


图 5.6 所有预报试验的路径(a)和强度(b)，其中虚线代表利用 20 日 00 时(CTL\_00Z20，绿色虚线)、12 时(CTL\_12Z20，蓝色虚线)以及 21 日 00 时(CTL\_00Z21，棕色虚线)的 FNL 直接做的确定性预报、彩色实线表示每 3 小时从 20 日 15 时至 21 日 00 时的同化后的集合平均分析场做的确定性预报，并与 JMA 的最佳路径观测(黑色实线)对比。

图 5.6 中展示了利用同化后分析场做的确定性预报结果、FNL 再分析资料直接预报结果、以及日本气象厅(JMA)的最佳路径观测。与实时业务预报一致，从 20 日 00 时之后的业务预报能预报出台风“天鸽”路径趋势，这与利用 NCEP FNL 再分析资料做的确定性预报很相符。从图 5.6a 中可以看出，虽然 FNL 资料的预报对“天鸽”路径模拟较好，但是在预报过程中存在一定的跳跃性。从同化后分析场的路径预报可以看出，路径更加向观测路径靠近，且路径表现得很平滑，没有出现与 FNL 预报类似的跳跃性。实时业务预报对该台风强度预报持续很差，这一点在利用 NCEP FNL 的再分析资料预报的结果上同样可以反映出，几乎所有时刻起始预报的强度演变都无法反应出强度的加强和减弱过程。虽然同化卫星观测后，最初几次同化后的平均分析场做的确定性预报仍然无法较好地模拟出强度的演变特征，但是与 FNL 的预报结果相比，随着同化越来越多的卫星观测，强度预报得到不断改善。直至 21 日 00 时，利用该时刻的同化后

平均分析场做的确定性预报能够十分准确地预报出台风“天鸽”的强度演变：登陆前的快速加强和登陆后的快速减弱过程都和观测十分吻合，除了最强时刻的时间上存在 2-3 小时的延后，这在很多同化试验中都得到反映。此外还可以发现，与上一章中的试验不同，这里仅仅经历 12 小时的循环同化便能够十分快速地将之前较差的强度模拟提高到与观测几乎一致。这在一定程度上可以表明新一代静止卫星的观测在改善 TC 强度预报上更加有效。当然，如果要得出更加详细的结果，则需要更多的对比试验用来证明。

## 5.5 本章小结

本章考察了新一代静止卫星向日葵 8 号全天气条件下的观测资料(高层水汽通道, 通道 8)的 EnKF 同化对西北太平洋登陆台风“天鸽”强度和结构预报的影响。研究发现, 新一代静止卫星水汽通道观测的短期循环同化后得到的平均分析场能显著改善“天鸽”的内核结构, 同时有效地消除了外围的虚假对流信息, 并能够十分清楚地模拟出 TC 的精细对流结构。此外, 同化卫星观测还能显著提高无云区域的模拟。该结果表明, 仅同化高层的水汽通道观测能够十分有效地改善低层 TC 的内核结构, 同时, 仅经过 6 小时的同化便能够很成功地模拟出 TC 的内核和外围结构。卫星同化使台风中心周围的水平风场得到增强, 并且降水量的分布和强度都与卫星的水汽观测更加一致。台风外围的湿度分布也得以显著提高并与观测十分接近。随着同化不断进行, “天鸽”的强度得到显著增强。

基于同化集合平均分析场做的确定性预报显示, 路径预报比利用 FNL 直接预报的结果更加接近观测且更加平滑。卫星同化对 TC 强度预报的改善最显著, 这与高时空分辨率的卫星观测有能力提供精细的 TC 内核结构信息存在着十分密切的关系。研究结果还表明, 前几个小时的同化对强度预报有一定的改善, 但是改善效果不是很明显, 直到持续同化 12 小时到 2017 年 8 月 21 日 00 时, 确定性预报开始准确地预报出接近观测的强度演变, 对于最强时刻以及最强强度的模拟和观测几乎完全一致。

综上所述, 新一代静止气象卫星全天气条件下的红外辐射观测对于改善数值预报模式在 TC 预报尤其是强度预报上具有十分重要的作用。尽管同化全天气条件下的卫星水汽通道的观测能够很成功地模拟出 TC 的强度及结构演变, 但是仍然存在着很多问题需要进一步探讨研究, 比如静止卫星的质量控制、如何确定最优的同化观测数、如何同化多通道卫星观测、如何选择观测、水平和垂直方向上的局地化以及集合的成员数等等。本研究中所选用的辐射传输模式 CRTM 存在着对不同探测通道不同卫星的误差或者偏差, 需要进一步加以改善。如何有效地处理模式误差也是今后提高卫星资料集合同化的研究重点。在本试验中, 仅同化了单一的高层通道的红外辐射观测, 而新一

代静止卫星具有十个可以观测到不同层次的红外辐射通道，如何尽可能多的利用不同通道的观测以达到更好的模拟效果也将需要进一步的研究。由于本研究的结论是基于个例得到的，是否具有普遍适用性还需要批量同化试验进行检验。

## 第六章 总结

本文使用高分辨率 WRF-ARW 云解析模式和基于该模式开发的 EnKF 同化系统，对 3 个 TC 分别考察了同化我国大陆地基多普勒雷达径向风、美国上一代静止气象卫星 GOES-13 以及新一代静止气象卫星向日葵 8 号全天气条件下的红外辐射通道覆盖了 TC 内核区域的高时空分辨率遥感观测对 TC 预报，特别是 TC 强度、结构和强降水预报的影响效果。

首先，本文通过首次同化我国沿海岸地基多普勒雷达径向风观测，展示了其对 TC 预报尤其是强度和降水预报的显著改善效果。研究结果显示，以 30 分钟间隔循环同化广州雷达径向风的超级观测，集合平均分析场显著改善了台风“韦森特”内核区域的风场、温度场和湿度场等结构，随着越来越多的观测同化进初始场，TC 的动力和热力结构都更加接近实际观测，可以清晰捕捉到紧密深厚的暖核结构的形成。雷达同化对 TC 强度分析的改善最显著。不论对快速增强过程还是对登陆后的快速减弱过程的强度演变，同化后的集合平均分析场都能与观测保持一致。

随着雷达径向风观测逐渐被同化，基于雷达同化分析场所做的确定性预报的 TC 预报得到了明显的改善。强度预报得到的改善最显著，逐步与观测强度演变接近。同时，雷达同化使 TC 的路径预报在趋势上也更加靠近观测，登陆点和登陆位置几乎和观测完全一致。而不同化雷达的预报试验与实时业务预报很类似，未能预报出强度增强或快速增强的过程。雷达同化对降水预报也有显著改善，同化径向风观测资料能够十分有效地改善降水的分布和强度预报，尤其在强降水预报上。台风降水总是伴随在路径附近，预报路径越接近观测，得到的降水预报也与自动站观测更一致。相对于前人主要是将雷达同化的初始时刻放在 TC 的形成阶段，本文展示了在 TC 最强时刻开始循环同化径向风观测的显著改善效果。

本文还基于同化分析场做的集合预报，考察了影响 TC 路径、强度以及降水的关键性因子。分析显示，集合初始场中的台风强度、中心位置和初始场中引导气流的相关关系在接下来的预报中扮演了重要角色。在集合预报中，初始偏强的涡旋倾向聚集于靠近观测 TC 中心和西北方向附近。更弱的 TC 倾向于有更强的初始偏南气流，且最终更加偏向北侧。路径和强度预报都与初始场中的 TC 涡旋强度有密切关系。初始场中最强(最弱)的集合成员倾向于具有最偏左(最偏右)的预报路径。基于偏相关关系分析法对初始位置和强度对预报的影响分析发现，在一个固定的纬度上更弱的初始 TC 涡旋更倾向于向北移动，而对一个固定强度，初始涡旋更偏北的 TC 涡旋倾向于依旧保持向北移动。初始场中强的 TC 涡旋在之后会保持更强的强度。由于弱的集合成员初始位置更靠南，较弱的集合成员的强度表现出更容易增强，因此初始的纬度被认为是影响强度预

报的一个重要因素。24 小时累积降水和台风中心纬度存在着很好的相关关系。更加偏左的路径(更低的纬度)与集合平均路径偏左的强降水存在着很好的相关关系,而更加偏右的路径(更高纬度)则与伴随集合平均或者偏右的更多降水有关。由于更强的 TC 倾向于进一步向南移动,因此初始强度和 24 小时累积降水有着相似的相关关系。

除了上述的我国大陆雷达资料的 EnKF 同化对 TC 预报的影响研究,本文还研究了美国上一代静止气象卫星 GOES-13 全天气条件下的高层红外辐射水汽通道观测资料的 EnKF 同化对大西洋飓风 Joaquin 预报的影响。结果显示,逐 3 小时同化卫星观测能够不断改善初始场中飓风的涡旋结构。飓风的三维动力(风场)和热力(温度和湿度)结构都得到显著提高,且更加符合前人所观测到的飓风结构特征。随着不断同化卫星观测进入初始场中,飓风的暖核结构逐渐发展成熟,模式的底层 850 hPa 左右出现一个与观测十分一致的次级最大位温扰动。如果不持续同化卫星观测或者只同化飓风的位置和强度观测,则未能获得这种真实的飓风内核结构。

同化卫星观测对路径预报的提高不显著,改善主要发生在前两天的预报中,但是总体影响很小,对后期的路径预报还产生了微弱的负效果。对于强度预报则完全是另外一种情况,同化卫星试验的确定性预报相较于不同化卫星的试验,在全部预报时间段内,强度预报误差都得到极大的减小,误差减小达到 50%。这进一步证明了观测到 TC 内核结构的高时空分辨率的遥感观测资料的同化有能力显著提高数值预报模式对 TC 的强度预报效果。

在 GOES-13 全天气条件下的高层红外辐射水汽通道观测资料同化研究基础上,本文进一步考察了新一代静止卫星中第一个业务化的向日葵 8 号卫星的全天气条件下水汽通道的辐射观测的 EnKF 同化对 2017 年的西北太平洋台风“天鸽”的预报影响。结果显示,以 30 分钟隔间同化卫星资料,仅经过 2-3 小时循环同化得到的分析场就能够十分准确地捕捉到与观测结构一致的台风涡旋以及周围精细的对流结构,还能有效消除虚假对流。不论是水平风场还是湿度场以及台风的强度都随着同化的不断进行得到显著改善。利用同化后的分析场做的确定性预报显示,随着循环同化更多的卫星观测进入初始场中,强度预报得到不断提高,尤其在经过 12 小时的循环同化后,基于集合平均分析场做的确定性预报显示了与观测几乎完全一致的强度演变。而不同化卫星观测的误差均很大,不能预报出强度的增强和减弱过程。卫星同化对路径的改善主要表现在更加平滑没有跳跃性且更与观测一致。

总而言之。本文使用先进的 EnKF 同化预报系统,展示了我国大陆地基多普勒雷达径向风观测、美国和日本全天气条件下的静止卫星水汽通道的辐射观测均有能力显著提高 TC 的预报尤其是强度和结构的预报,为未来我国雷达和 FY-4 号静止卫星资料 EnKF 同化系统的建设以及登陆 TC 业务预报特别是结构、强度和降水预报水平的提高提供了重要科学参考。本文下一步将通过更多个例的同化试验对研究结论加以检验,

还将探讨有可能对改善降水预报有重要的作用的反射率观测的有效同化方法。在卫星资料同化上,将进一步考察更多通道观测的同化对改善 TC 以及其他高影响天气系统预报的作用,同时对观测资料的质量控制以及误差处理都需要进一步完善。此外,由于辐射传输模式 CRTM 在不同的卫星、不同卫星的观测通道的计算上均有一定的误差,未来还需要进一步改进该模式以达到更好的卫星观测同化效果。



## 参考文献

- 陈杰, 闵锦忠, 王世璋, 等. 2012. WRF-EnSRF 系统同化多普勒雷达资料在多类型强对流天气过程的数值试验. 大气科学学报, 35(6): 720-729.
- 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. 大气科学学报, 36(2): 129-138.
- 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, 陈鹏, 等. 2015. 多普勒雷达资料同化在台风“桑美”预报中的应用研究. 海洋学报, (3), 25-36.
- 许小永, 刘黎平, 郑国光. 2006. 集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的数值试验. 大气科学, 30(4), 712-728.
- 张守峰, 余晖, 向纯怡. 2015. 中央气象台台风强度综合预报误差分析. 气象, 41(10): 1278-1285.
- Anderson, J. L. 2001. An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Monthly weather review*, 129(12), 2884-2903.
- Aksoy, A.; Dowell, D. C.; Snyder, C. 2009. A multicaser comparative assessment of the ensemble Kalman filter for assimilation of radar observations. Part I: Storm-scale analyses. *Monthly Weather Review*, 137(6), 1805-1824.
- Aksoy, A.; Dowell, D. C.; Snyder, C. 2010. A multicaser comparative assessment of the ensemble Kalman filter for assimilation of radar observations. Part II: Short-range ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 138(4), 1273-1292.
- Aksoy, A. 2013. Storm-relative observations in tropical cyclone data assimilation with an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 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. *Monthly Weather Review*, 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 analyses. *Monthly Weather Review*, 141(6), 1842-1865.
- Barker, D. M.; Huang, W.; Guo, Y. R.; et al. 2004. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: Implementation and initial results. *Monthly Weather Review*, 132(4), 897-914.
- Cangialosi, J.; Franklin, J. 2016: National Hurricane Center forecast verification report: 2015 hurricane season. NOAA Rep., 69 pp.

- Caya, A.; Sun, J.; Snyder, C. 2005: A comparison between the 4DVAR and the ensemble Kalman filter techniques for radar data assimilation. *Monthly Weather Review*, 133(11), 3081-3094.
- Chan, J. C.; Gray, W. M. 1982. Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships. *Monthly Weather Review*, 110(10), 1354-1374.
- Dong, J.; Xue, M. 2013: Assimilation of radial velocity and reflectivity data from coastal WSR-88D radars using ensemble Kalman filter for the analysis and forecast of landfalling Hurricane Ike (2008). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 139, 467–487, doi:10.1002/qj.1970.
- Dowell, D. C.; Zhang, F.; Wicker, L. J.; et al. 2004. Wind and temperature retrievals in the 17 May 1981 Arcadia, Oklahoma, supercell: Ensemble Kalman filter experiments. *Monthly weather review*, 132(8), 1982-2005.
- Du, N.; Xue M.; Zhao, K.; Min, J. 2012: Impact of assimilating airborne Doppler radar velocity data using the ARPS 3DVAR on the analysis and prediction of Hurricane Ike (2008). *J. Geophys. Res.*, 117, D18113, doi:10.1029/2012JD017687.
- Durden, S. L. 2013: Observed tropical cyclone eye thermal anomaly profiles extending above 300 hPa. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 4256–4268, doi:10.1175/MWR-D-13-00021.1.
- Emanuel, K.; Zhang, F. 2017: The role of inner-core moisture in tropical cyclone predictability and practical forecast skill. *J. Atmos. Sci.*, 74, 2315–2324, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-17-0008.1>.
- Evensen, G. 1994. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C5), 10143-10162.
- Evensen, G. 2003. The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation. *Ocean dynamics*, 53(4), 343-367.
- Fang, J.; Zhang, F. 2011. Evolution of multiscale vortices in the development of Hurricane Dolly (2008). *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(1), 103-122.
- Fujita, T.; Stensrud, D. J.; Dowell, D. C. 2007. Surface data assimilation using an ensemble Kalman filter approach with initial condition and model physics uncertainties. *Monthly weather review*, 135(5), 1846-1868.
- Gaspari, G.; Cohn, S. E. 1999. Construction of correlation functions in two and three dimensions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125(554), 723-757.
- Grell, G. A.; Devenyi, D. 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1693, doi:10.1029/2002GL015311.
- Hamill, T. M.; Whitaker, J. S. 2005. Accounting for the error due to unresolved scales in ensemble data assimilation: A comparison of different approaches. *Monthly weather review*, 133(11), 3132-3147.
- Hamill, T. M.; Whitaker, J. S.; Fiorino, M.; Benjamin, S. G. 2011. Global ensemble predictions of 2009's tropical cyclones initialized with an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 139(2), 668-688.
- Hawkins, H. F.; Imbembo, S. M. 1976: The structure of a small, intense hurricane-Inez 1966. *Mon. Wea.*

- Rev., 104, 418–442, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1976\)104,0418:TSOASI.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1976)104,0418:TSOASI.2.0.CO;2).
- Honda, T.; Kotsuki, S.; Lien, G. Y.; et al. 2018. Assimilation of Himawari-8 All-Sky Radiances Every 10 Minutes: Impact on Precipitation and Flood Risk Prediction. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Honda, T.; Miyoshi, T.; Lien, G. Y.; et al. 2018. Assimilating all-sky Himawari-8 satellite infrared radiances: A case of Typhoon Soudelor (2015). *Monthly Weather Review*, 146(1), 213-229.
- Hong, S.; Dudhia, J.; Chen, S. 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103–120, doi:10.1175/1520-0493(2004)132,0103:ARATIM.2.0.CO;2.
- Houtekamer, P. L.; Mitchell, H. L. 1998. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Monthly Weather Review*, 126(3), 796-811.
- Jordan, C. L. 1958: Mean soundings for the West Indies area. *J. Meteor.*, 15, 91–97, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1958\)015,0091:MSFTWI.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1958)015,0091:MSFTWI.2.0.CO;2).
- Landsea, C. W.; Franklin, J. L. 2013: Atlantic Hurricane database uncertainty and presentation of a new database format. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 3576–3592, doi:10.1175/MWR-D-12-00254.1.
- Lin, H. H.; Lin, P. L.; Xiao, Q. N.; 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), *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, 22(3), 325–345, doi:10.3319/TAO.2010.10.08.01(A).
- Marks, Jr, F. D.; Houze, Jr, R. A. 1984. Airborne doppler radar observations in Hurricane Debby. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 65(6), 569-582.
- Meng, Z.; Zhang, F. 2007. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part II: Imperfect model experiments. *Monthly weather review*, 135(4), 1403-1423.
- Meng, Z.; Zhang, F. 2008. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part III: Comparison with 3DVAR in a real-data case study. *Monthly Weather Review*, 136(2), 522-540.
- Meng, Z.; Zhang, F. 2008. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part IV: Comparison with 3DVAR in a month-long experiment. *Monthly Weather Review*, 136(10), 3671-3682.
- Minamide, M.; Zhang, F. 2017. Adaptive observation error inflation for assimilating all-sky satellite radiance. *Monthly Weather Review*, 145(3), 1063-1081.
- Nguyen, S. V.; Smith, R. K.; Montgomery, M. T. 2008. Tropicalcyclone intensification and predictability in three dimensions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134, 563–582.
- Noh, Y.; Cheon, W.-G.; Hong, S.-Y.; Raasch, S. 2003: Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data. *Bound.-Layer Meteor.*, 107, 401–427, doi:10.1023/A:1022146015946.

- Nystrom, R. G.; Zhang, F.; Munsell, E. B.; et al. 2018. Predictability and dynamics of Hurricane Joaquin (2015) explored through convection-permitting ensemble sensitivity experiments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 75(2), 401-424.
- Otkin, J. A. 2010. Clear and cloudy sky infrared brightness temperature assimilation using an ensemble Kalman filter. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D19).
- Otkin, J. A. 2012. Assimilation of water vapor sensitive infrared brightness temperature observations during a high impact weather event. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D19).
- Oye, R., C. Mueller; Smith, C.; 1995: Software for radar data translation, visualization, editing and interpolation. Preprints, 27th Conf. on Radar Meteorology, Vail, CO, Amer. Meteor. Soc., 359–361.
- Qin, Z.; Zou, X.; Weng, F. 2013. Evaluating added benefits of assimilating GOES imager radiance data in GSI for coastal QPFs. *Monthly Weather Review*, 141(1), 75-92.
- Rappaport, E. N.; Franklin, J. L.; Avila, L. A.; et al. 2009. Advances and challenges at the National Hurricane Center. *Weather and Forecasting*, 24(2), 395-419.
- Reasor, P. D.; Montgomery, M. T.; Bosart, L. F. 2005. Mesoscale observations of the genesis of Hurricane Dolly (1996). *Journal of the atmospheric sciences*, 62(9), 3151-3171.
- Shieh, O. H., M. Fiorino, M. E. Kucas, and B. Wang, 2013: Extreme rapid intensification of Typhoon Vicente (2012) in the South China Sea. *Wea. Forecasting*, 28, 1578–1587, doi:10.1175/WAF-D-13-00076.1.
- Sippel, J. A.; Braun, S. A.; Shie, C. L. 2011. Environmental influences on the strength of Tropical Storm Debby (2006). *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(11), 2557-2581.
- Sippel, J. A.; Zhang, F. 2010. Factors affecting the predictability of Hurricane Humberto (2007). *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(6), 1759-1778.
- Skamarock, W. C.; Coauthors, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-4751STR, 113 pp., <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>.
- Snyder, C.; Zhang, F. 2003. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 131(8).
- Stern, D. P.; Nolan, D. S. 2009: Reexamining the vertical structure of tangential winds in tropical cyclones: Observations and theory. *J. Atmos. Sci.*, 66, 3579–3600, <https://doi.org/10.1175/2009JAS2916.1>.
- Stern, D. P.; Zhang, F. 2016: The warm-core structure of Hurricane Earl (2010). *J. Atmos. Sci.*, 73, 3305–3328, doi:10.1175/JAS-D-15-0328.1.
- Tong, M.; Xue, M. 2005. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model: OSS experiments. *Monthly Weather Review*, 133(7), 1789-1807.
- Torn, R. D.; Hakim, G. J. 2008. Performance characteristics of a pseudo-operational ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 136(10), 3947-3963.
- Torn, R. D.; Hakim, G. J. 2009. Ensemble data assimilation applied to RAINEX observations of Hurricane Katrina (2005). *Monthly Weather Review*, 137(9), 2817-2829.

- Wang, M.; Xue, M.; Zhao, K.; Dong, J. 2014. Assimilation of T-TREC-retrieved winds from single-Doppler radar with an ensemble Kalman filter for the forecast of Typhoon Jangmi (2008). *Monthly Weather Review*, 142(5), 1892-1907.
- Wang, M.; Xue, M.; Zhao, K. 2016. The impact of T-TREC-retrieved wind and radial velocity data assimilation using EnKF and effects of assimilation window on the analysis and prediction of Typhoon Jangmi (2008). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(1), 259-277.
- Weng, Y.; Zhang, M.; Zhang, F. 2011. Advanced data assimilation for cloud-resolving hurricane initialization and prediction. *Computing in Science & Engineering*, 13(1), 40-49.
- Weng, Y.; Zhang, F. 2012. Assimilating airborne Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter for convection-permitting hurricane initialization and prediction: Katrina (2005). *Monthly Weather Review*, 140(3), 841-859.
- Weng, Y.; Zhang, F. 2016. Advances in convection-permitting tropical cyclone analysis and prediction through EnKF assimilation of reconnaissance aircraft observations. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 94(4), 345-358.
- Whitaker, J. S.; Hamill, T. M. 2002. Ensemble data assimilation without perturbed observations. *Monthly Weather Review*, 130(7), 1913-1924.
- Xue, M.; Dong, J. 2013. Assimilating best track minimum sea level pressure data together with Doppler radar data using an ensemble Kalman filter for Hurricane Ike (2008) at a cloud-resolving resolution. *Acta Meteorologica Sinica*, 27(3), 379-399.
- Yang, C.; Liu, Z.; Bresch, J.; et al. 2016. AMSR2 all-sky radiance assimilation and its impact on the analysis and forecast of Hurricane Sandy with a limited-area data assimilation system. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 68(1), 30917.
- Zhang, F.; Meng, Z.; Aksoy, A. 2006. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part I: Perfect model experiments. *Monthly weather review*, 134(2), 722-736.
- Zhang, F.; Snyder, C.; Sun, J. 2004. Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 132(5), 1238-1253.
- Zhang, F.; Snyder, C. 2007. Ensemble-based data assimilation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(4), 565-568.
- 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. *Monthly Weather Review*, 137(7), 2105-2125.
- Zhang, F.; Weng, Y.; Gamache, J. F.; Marks, F. D. 2011. Performance of convection-permitting hurricane initialization and prediction during 2008–2010 with ensemble data assimilation of inner-core airborne Doppler radar observations. *Geophysical Research Letters*, 38(15).
- Zhang, F.; Weng, Y. 2015. Predicting hurricane intensity and associated hazards: A five-year real-time forecast experiment with assimilation of airborne Doppler radar observations. *Bulletin of the American*

*Meteorological Society*, 96(1), 25-33.

Zhang, F.; Minamide, M.; Clothiaux, E. E. 2016. Potential impacts of assimilating all-sky infrared satellite radiances from GOES-R on convection-permitting analysis and prediction of tropical cyclones. *Geophysical research letters*, 43(6), 2954-2963.

Zhang, Q.; Wu, L.; Liu, Q. 2009. Tropical cyclone damages in China 1983–2006. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(4), 489-496.

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. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D6).

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: L12803, DOI: 10.1029/2009GL038658.

Zhao, K.; Xue, M.; Lee, W. C. 2012. Assimilation of GBVTD - retrieved winds from single - Doppler radar for short - term forecasting of super typhoon Saomai (0608) at landfall. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 138(665), 1055-1071.

Zhu, L.; Wan, Q.; Shen, X.; et al. 2016. Prediction and predictability of high-impact Western Pacific landfalling Tropical Cyclone Vicente (2012) through convection-permitting ensemble assimilation of doppler radar velocity. *Monthly Weather Review*, 144(1), 21-43.

Zhu, X.; Zhu, J. 2004: New generation weather radar network in China. *Meteor. Sci. Technol.*, 32 (4), 255–258.

Zou, X.; Qin, Z.; Zheng, Y. 2015. Improved tropical storm forecasts with GOES-13/15 imager radiance assimilation and asymmetric vortex initialization in HWRF. *Monthly Weather Review*, 143(7), 2485-2505.

Zou, X.; Xiao, Q. 2000. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *Journal of the atmospheric sciences*, 57(6), 836-860.

Zou, X.; Xiao, Q.; Lipton, A. E.; Modica, G. D. 2001. A numerical study of the effect of GOES sounder cloud-cleared brightness temperatures on the prediction of Hurricane Felix. *Journal of Applied Meteorology*, 40(1), 34-55.

## 致谢

首先，我要感谢我的博士生导师北京大学大气与海洋科学系孟智勇教授。在我的博士期间，她给予了细心指导和帮助，让我感到十分有幸能够接受到她的指导。如果没有她的帮助，我不可能在四年时间中完成我的博士论文，并将我们的研究工作发表。由于我的英文基础比较差，写作能力很有限，还记得在写第一篇文章时，她几乎将我所写论文的每一句甚至其中的每个字都做了批注并修改，告诉我很多单词的用法。她教会了我如何将科研做好，让我认识到科研不仅是一份工作，更重要的是科研的过程，虽然在研究中有各种艰辛的历程，但这也正是科研带给我们的乐趣，研究的不确定性才更值得我们更加深入地去尝试去探索。同时，对待科研的态度是我从孟老师身上学习到的另外一个重要的课程，在科研的任何一步，都不可大意，一定要时刻保持仔细认真负责的态度。稍有大意，很有可能就会犯下大错。孟老师还为我提供了两年公派出国访问经历。除了科研得到提高，对我的英语交流能力也得到很大的改善。即使在国外访问期间，她仍然定期和我保持联系，关心并督促我的科研工作。因此无论怎样，孟老师都是我的博士论文得以顺利完成最重要的人。

其次，我要感谢美国宾州州立大学气象系的 Paul Markowski 和张福青教授。在访问的两年期间，他们给我的科研工作提供了巨大的无私帮助，并帮助我同很多优秀的科学家交流，让我很快地发表了一篇高质量论文。在生活中，尤其在初到美国，他们热心地帮助我尽快融入到美国社会和学校中。不论在科研还是生活中，他们的帮助和指导都让我对科研和生活的理解和认识达到了新的高度，对我以后的职业生涯都会有着重要的作用。同时，在访问期间很多气象系的其他老师和学生与我有着很多的交流并对我给予帮助，在此十分感谢他们，尤其是 Paul Markowski 和张福青教授的课题组成员，由于人数庞大，这里就不一一列举。同时，在这里也要感谢国家留学基金委为我两年的留学生涯提供的经济资助，如果没有该资助我也不可能有能力去美国进行长达两年的交流访问。

最后，我要感谢我的家人。首先，感谢我的父母，他们都是普通农民，正是他们对我的教育和无私奉献才让我能够从小学、初中一直读到如今的博士阶段。没有他们辛勤的付出和悉心照料，我不可能有现在的收获，更不可能完成我的学业。此外，在我的成长过程中我的舅舅们给了我巨大的帮助，还记得很小的时候，他们就给我灌输“读书改变农村人命运”的思维，让我认识到读书对一个农村孩子的重要性。我还要感谢姜珊，博士期间我们长期处于异地，但是她一直支持并鼓励我做好博士研究工作，没有丝毫抱怨，对她的感激无以言表。可以肯定的是，没有她的支持，我肯定不可能安心顺利的完成我的博士论文。

此外，我要感谢北京大学的强对流天气分析和数值模拟团队(SWANS)的师兄师姐和师弟师妹们：张云济、岳健、姚聃、黄龄、于慧珍、白兰强、唐晓静、张慕容、周瑞琳、李飒以及凡达和刘泓君。和他们的长期相处和交流中，除了学习到了很多宝贵的科研经验外，还让我在科研之余的生活充满乐趣和活力。

## 北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明

### 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名：朱磊 日期：2018年6月1日

### 学位论文使用授权说明

(必须装订在提交学校图书馆的印刷本)

本人完全了解北京大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：

- 按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；
- 学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务，在校园网上提供服务；
- 学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；
- 因某种特殊原因需要延迟发布学位论文电子版，授权学校一年/两年/三年以后，在校园网上全文发布。

(保密论文在解密后遵守此规定)

论文作者签名：朱磊 导师签名：高智勇  
日期：2018年6月1日