



北京大学

# 博士研究生学位论文

题目：一次登陆台风预报对雷达同化  
的资料敏感性研究

姓 名：岳 健

学 号：1001110143

院 系：物理学院大气与海洋科学系

专 业：气象学

研究方向：中小尺度气象学与数值天气预报

导师姓名：孟智勇 副教授

二零一六年十一月

## 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、拍照或以其他方式传播。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

登陆台风是沿海地区最具破坏力的自然灾害之一,对我国经济和人民生命财产安全构成严重威胁。虽然目前台风的路径预报总的来说有了很大提高,但台风登陆后的降水业务预报精度仍不能满足防灾减灾需求,尤其是复杂下垫面条件下降水预报更加困难,甚至台风的路径预报也会出现较大误差,因而需要有效地同化沿海雷达资料。之前对登陆台风的雷达资料同化研究多着眼于同化对预报的提高程度,尚无工作系统研究登陆台风预报对雷达资料的敏感性,而这对于设计合理的雷达同化策略至关重要。本文利用高分辨率的数值模式和集合卡尔曼滤波资料同化方法,以2009年8月先后登陆台湾和我国大陆东南沿海并造成台湾近50年最严重灾害的台风Morakot为例,考察了在岛屿和海峡复杂下垫面条件下台风登陆后路径和降水预报对台湾沿海雷达资料的敏感性。

一方面,本文考察了Morakot登陆台湾后的路径和降水预报对沿海雷达资料的敏感性。结果表明,相比于不同化试验(NoDA),同化Morakot登陆前12小时内的多部雷达的径向风观测能使台风登陆后的24小时平均路径预报误差减小约44%,且登陆后24小时累积强降水预报技巧提高近2.1倍。其中,同化台风登陆前6小时内的观测非常重要,其效果与同化台风登陆前12小时内的观测类似,但明显好于只同化台风登陆前6-12小时的观测。此外,当台风中心与沿海雷达相距较远时,同化台风内核覆盖度最高的一部雷达的观测对预报的提高贡献最大,且很接近多雷达同化的效果。但是,应该避免在台风即将登陆时开始同化台风内核覆盖度较高的单部雷达的观测,否则容易在台风中心附近及观测的台风移动方向的前方产生不合理的强风场增量,使台风中心向远离所同化雷达的方向偏移,并可能使同化后的台风中心相对于同化前的位移矢量几乎垂直于观测的台风移动方向,而进一步的同化一般难以对这种较大的初始偏差加以迅速纠正,从而台风分析路径可能会始终严重偏离观测路径,导致台风路径和降水预报变差。

另一方面,本文考察了Morakot登陆我国大陆后的路径和降水预报对台湾沿海雷达资料的敏感性。结果表明,合理地同化台湾的雷达资料对经过台湾登陆我国大陆的台风的预报十分重要。同化台湾多部雷达的径向风观测能使台风的初始位置和强度误差分别比NoDA减小30%和34%,并能明显改善初始场的台风中尺度结构和大尺度引导气流,从而使台风登陆大陆后的24小时平均路径预报误

差比 NoDA 减小约 64%，登陆后的暴雨预报技巧比 NoDA 提高近两倍。本文的研究还表明，对这个个例而言，同化台风内核覆盖度最高的一部台湾雷达的观测能明显改善对初始引导气流起关键作用的台风西北侧高压脊的模拟，并明显改善台风初始结构。因此，综合考虑台风登陆大陆后的路径和降水时，同化上述雷达的观测对预报的提高贡献最大，且与多雷达同化的效果相当。另外，得益于同化的影响范围随着循环同化次数的增多而扩大，以及路径预报、台风结构和水汽辐合条件的改善，同化台风中心周围的观测对 Morakot 登陆后的远距离降水预报的提高尤为明显。

关键词：登陆台风，雷达同化，资料敏感性，降水预报

# **The Sensitivity Study of Radar Data Assimilation on Forecasting a Landfalling Typhoon**

Jian Yue (Meteorology)

Supervised by Prof. Zhiyong Meng

## **Abstract**

Landfalling typhoons are one of the most destructive natural disasters for the coastal regions, and have long been severe threats to our economy and people's lives and properties. At present, although the track forecast has been greatly improved, the operational rainfall forecast after a typhoon made landfall still cannot satisfy the demand for disasters prevention and mitigation. Especially, it would be very hard to improve the accuracy of typhoon rainfall forecast, even of the track forecast, with a complex underlying surface. Therefore, efficiently assimilating the coastal radar data is necessary. Previous studies on the typhoon radar data assimilation (DA) mainly focus on to what extent the forecast can be improved by DA, however, there have been no studies that systematically pay attention to the sensitivity of radar DA on forecasting a landfalling typhoon, which is critical for designing a reasonable radar DA strategy. Using a high-resolution numerical weather prediction model and the ensemble Kalman filter DA method, this study explores the sensitivity of assimilating Taiwan coastal radar observations on the track and rainfall forecasts of Typhoon Morakot, which made landfall in Taiwan and southeastern China in August 2009 and caused the most severe damages recorded in 50 years to Taiwan.

The sensitivity of coastal radar observations on the track and rainfall forecasts after Typhoon Morakot (2009) made its first landfall in Taiwan was examined. The results showed that the 24-h averaged track forecast error after landfall could be decreased by about 44% and the forecast skill of the 24-h heavy rainfall after landfall could be tripled, when the radial velocity ( $V_r$ ) from all available radars during the 12 h immediately before Morakot's landfall were assimilated. Particularly, assimilating the  $V_r$  data during the 6 h immediately before typhoon landfall played a critical role in

the improvement, and its performance was similar to that of assimilating the Vr data during the 12 h immediately before typhoon landfall and was much better than that of assimilating the earlier 6-h Vr data only. Moreover, when the typhoon was far away from the coastal radars, assimilating the Vr data from a single radar with the largest typhoon inner-core coverage contributed the most, and its performance was similar to that of the multiple-radar DA experiment. However, it should be avoided to start assimilating the Vr data from such a single radar when the typhoon was about to make landfall. Otherwise, there would be prone to emerge an unreasonably strong first-time wind increment around the typhoon center and in front of the observed typhoon's moving direction. Consequently, the analyzed typhoon center would be shifted away from this assimilated radar, and the displacement of the typhoon center would likely be almost perpendicular to the observed typhoon's moving direction. Generally, such a large initial error cannot be quickly corrected by the following DA cycles, thus, the analyzed typhoon track would severely deviate the observed track during the entire DA window, which subsequently worsen the track and rainfall forecasts.

This study also explored the sensitivity of Taiwan coastal radar observations on the track and rainfall forecasts after Typhoon Morakot (2009) made its second landfall in southeastern China. The results showed that the reasonable assimilation of Taiwan coastal radar data would be critical for improving the forecast of typhoons that made landfall in the Chinese mainland after passing over or near Taiwan. By intermittently assimilating the Vr data from all available radars, the initial typhoon position and intensity errors could be decreased by 30% and 34%, respectively, and the initial typhoon mesoscale structure and the large-scale steering flow could also be greatly improved. Thus, the 24-h averaged track forecast error after landfall was decreased by about 64% and the forecast skill of the 24-h heavy rainfall after landfall was almost tripled. The results also showed that assimilating the Vr data from a single Taiwan radar with the largest typhoon inner-core coverage would significantly improve the simulations of both the initial typhoon structure and the ridge of the high pressure system to the northwest of Morakot, which was the key factor affecting the initial steering flow for this case. Consequently, assimilating the Vr data from such a Taiwan

radar had the greatest contribution to the track and rainfall forecasts after Morakot's landfall, with a similar performance to the multiple-radar DA experiment. Moreover, benefiting from the expansion of the DA affected region as the number of the assimilation cycles increased, and the improvements in the forecasts of typhoon track, structure and moisture convergence, assimilating the observations near the typhoon center could also be in favor of the remote rainfall forecast after Morakot's landfall.

**Keywords:** Landfalling typhoon, Radar data assimilation, Data sensitivity, Rainfall forecast





目录

|  |           |
|--|-----------|
| <b>第一章 绪论 .....</b>                              | <b>1</b>  |
| 1.1 研究背景和动机.....                                 | 1         |
| 1.2 本文的研究内容和目标.....                              | 6         |
| 1.3 本文创新点.....                                   | 7         |
| 1.4 章节安排.....                                    | 7         |
| <b>第二章 模式、资料与方法.....</b>                         | <b>8</b>  |
| 2.1 模式介绍.....                                    | 8         |
| 2.2 资料简介.....                                    | 9         |
| 2.3 集合平方根滤波.....                                 | 11        |
| 2.4 连续协方差局地化.....                                | 13        |
| 2.5 质量控制与超级观测.....                               | 13        |
| 2.6 本章小结.....                                    | 15        |
| <b>第三章 台风 Morakot (2009) 观测特征分析 .....</b>        | <b>16</b> |
| 3.1 个例概况.....                                    | 16        |
| 3.2 天气形势.....                                    | 18        |
| 3.3 中尺度结构特征.....                                 | 20        |
| 3.4 本章小结.....                                    | 23        |
| <b>第四章 Morakot (2009) 登陆台湾后的预报对雷达径向风同化的资料敏感性</b> | <b>24</b> |
| 4.1 不同化试验.....                                   | 24        |
| 4.2 同化试验设计.....                                  | 28        |
| 4.2.1 初始扰动集合.....                                | 28        |
| 4.2.2 同化试验流程.....                                | 29        |
| 4.2.3 不同雷达的观测特点.....                             | 30        |
| 4.3 控制试验的同化效果.....                               | 31        |
| 4.3.1 风场误差.....                                  | 31        |
| 4.3.2 路径预报.....                                  | 33        |
| 4.3.3 降水预报.....                                  | 34        |
| 4.3.4 中尺度结构预报.....                               | 37        |
| 4.4 同化效果对雷达资料的敏感性.....                           | 41        |
| 4.4.1 风场误差.....                                  | 41        |
| 4.4.2 路径预报.....                                  | 41        |
| 4.4.3 降水预报.....                                  | 44        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.4.4 中尺度结构预报.....                               | 44        |
| 4.5 同化窗对同化效果的影响.....                             | 44        |
| 4.5.1 同化窗对多雷达同化效果的影响.....                        | 45        |
| 4.5.2 同化窗对单雷达同化效果的影响.....                        | 45        |
| 4.6 本章小结.....                                    | 49        |
| <b>第五章 Morakot (2009) 登陆大陆后的预报对雷达径向风同化的资料敏感性</b> | <b>50</b> |
| 5.1 不同化试验.....                                   | 50        |
| 5.2 同化试验设计.....                                  | 53        |
| 5.3 控制试验的同化效果.....                               | 54        |
| 5.4 同化效果对雷达资料的敏感性.....                           | 58        |
| 5.5 台风预报对雷达资料的敏感性的原因分析.....                      | 60        |
| 5.5.1 路径预报.....                                  | 60        |
| 5.5.2 降水预报.....                                  | 63        |
| 5.6 本章小结.....                                    | 67        |
| <b>第六章 总结 .....</b>                              | <b>69</b> |
| <b>参考文献.....</b>                                 | <b>71</b> |
| <b>致谢 .....</b>                                  | <b>80</b> |

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景和动机

热带气旋是形成于热带或副热带 26.5℃ 以上广阔洋面上的气旋性环流。世界气象组织将近中心持续风速在 12 级至 13 级（即  $32.7\text{m s}^{-1}$  至  $41.4\text{m s}^{-1}$ ）的热带气旋定义为台风或飓风。北太平洋西部地区通常称其为台风，而北大西洋及东太平洋地区则称其为飓风。热带气旋一般是由东风波或季风槽等扰动引起的，并由暖洋面上水汽凝结释放的潜热维持发展，其形成后通常向西向极移动，有的消散于海上，有的则登陆。登陆热带气旋常常带来强风和强降水，有可能引发洪水、泥石流等，是沿海地区最具破坏力的自然灾害之一（Rappaport, 2000; Zhang Q 等, 2009; Peduzzi 等, 2012）。

我国是世界上遭受台风灾害最严重的国家之一。夏秋季节，热带气旋频繁生成于西北太平洋上，并向西向极移动、增强（Wu 和 Wang, 2004; Wu 等, 2005）。平均来说，每年有 7–9 个热带气旋登陆我国沿海地区，对我国经济和人民生命财产安全构成严重威胁（Zhang Q 等, 2009; Chen 等, 2011）。近年来，在全球气候变化背景下，不同海域热带气旋的发生频率、维持时间、强度和降水等都发生了显著变化（Emanuel, 2005; Webster 等, 2005; Bender 等, 2010; Park 等, 2013）。从 1975 年到 2009 年，登陆我国的热带气旋的年平均陆上路径长度增加了 67%，年平均陆上移动速度下降了 14%，从而使其年平均陆上维持时间增加了近一倍，并导致沿海及内陆地区的台风降水及其相关灾害明显增多（Chen 等, 2011）。据统计，我国历史上最严重的六次强降水极端天气事件均是由登陆台风造成的（Chen 等, 2010）。因此，研究如何提高台风登陆后的路径和降水预报变得更加重要。

在过去几十年中，随着模式分辨率的提高、涡旋初始化方法的改进、物理参数化方案的调整以及集成预报模式的增多，热带气旋的路径预报虽然总的来说有了很大提高（Rappaport 等, 2009; Cangialosi 和 Franklin, 2011），但是，在复杂下垫面地形条件下，台风路径的预报误差仍然比较大，与之相关的台风降水业务预报能力很低，远不能满足防灾减灾需求（Cheung 等, 2008; Gao 等, 2009）。台风降水常常表现出多尺度特征，其强度和分布会受到台风路径、移速、垂直风

切变和高空槽等多种因素的影响,复杂下垫面会大大增加台风路径、降水和中尺度精细结构的预报不确定性(Lin 等, 2001; Gao 等, 2009; Yu 和 Cheng, 2013)。本文的研究目标就是考察台风 Morakot (2009) 登陆台湾和大陆的过程中,在复杂的岛屿、海峡地形条件下,台风路径和降水预报对沿海雷达同化的资料敏感性。

初始场的不确定性是登陆台风路径和降水预报误差的一个主要来源。资料同化是提高初始场准确度的一个重要手段(Talagrand, 1997)。由于热带气旋的大部分生命史在观测资料稀缺的海上,因此对热带气旋预报的提高在很大程度上依赖于同化卫星(Liu 等, 2012; Wu 等, 2014)、飞机下投式探空仪(Chou 和 Wu, 2008; Weissmann 等, 2011; Chen 等, 2013)和机载雷达观测(Zhang 等, 2011; Zhang 和 Weng, 2015)对模式初始场的改进。Goerss (2009)考察了卫星观测对热带气旋路径预报的影响,发现同化多种卫星观测能够使 24 小时路径预报提高约 20%,而 120 小时路径预报甚至提高 40%以上;其中,同化地球同步卫星的轨迹风对路径预报的影响最大。Torn 和 Hakim(2009)在登陆飓风 Katrina(2005)的整个生命史中循环同化飞机下投式探空仪观测,发现当下投式探空仪分布在飓风周围且与高分辨率模式配合使用时,可以大大减小飓风的位置和强度误差。

由于卫星和飞机观测的时空分辨率低,难以描述热带气旋的精细结构,卫星同化观测算子还不能较准确地考虑云与降水中的水物质粒子对辐射传输的影响,因而卫星和飞机观测的同化对预报效果的改善有限,甚至会出现同化后预报变差的问题(Abersson, 2011; Berger 等, 2011)。Schwartz 等(2012)考察了同化卫星微波辐射观测对台风 Morakot (2009)预报的影响,发现对台风加强阶段的强度预报和台风路径预报影响不大,且对台风登陆后降水预报的影响有正有负,这是由于同化微波辐射只能改善初始场中台风非内核区的大尺度环境场。Torn 和 Hakim (2009)发现如果下投式探空仪的位置比较稀疏,仅能在低分辨率模式中反映出大尺度环境的信息,那么同化这种观测对热带气旋的预报几乎没有贡献。

相比于卫星和飞机,多普勒雷达能够对热带气旋的三维结构和演变特征提供高时空分辨率观测。雷达径向风和反射率观测能反映涡旋尺度的风场信息和对流尺度的微物理特性(Marks, 2003; Zhang, 2011)。从上世纪 40 年代至今,机载和地基多普勒雷达已经被广泛应用于热带气旋的探测分析、诊断研究和短临预报等领域(Reasor 等, 2000; Marks, 2003; Yu 和 Cheng, 2008; Roy 等, 2010)。

随着计算资源的提高,以及雷达观测网的不断完善,同化高时空分辨率的雷达观测对热带气旋预报的提高起着越来越重要的作用。近年来,雷达资料同化被广泛证明对热带气旋预报的提高有显著贡献(Zhang 等, 2009, 2011; Dong 和 Xue, 2013; Zhang 和 Weng, 2015),并逐渐成为我国登陆台风研究中的热点(Zhao 等, 2012a, b; Li 等, 2013; Wang 等, 2014; Zhu 等, 2016)。

近几十年来,同化机载雷达观测对大西洋登陆飓风的路径、强度、结构和降水预报均有明显提高(Xiao 等, 2009; Weng 和 Zhang, 2012)。Pu 等(2009)利用三维变分(3DVar)同化方法考察了美国国家航空航天局(NASA)的外场试验采集到的机载雷达观测对登陆飓风 Dennis(2005)预报的影响,发现同化雷达反演风能够改善飓风内核区的对流条件和辐合、辐散结构,从而在一定程度上减小风暴路径预报误差,并对飓风的近海强度变化和降水预报有明显提高。Weng 和 Zhang(2012)利用集合卡尔曼滤波(EnKF)对机载雷达径向风观测的同化可以明显改善初始场中飓风内核的动力和热力结构(比如风、温度和湿度)。对 2008–2012 年美国国家海洋与大气管理局(NOAA)的机载雷达监测到的 22 个大西洋飓风的统计表明,在考虑了前处理、同化观测数据和积分模式所必需的时间成本的情况下,利用 EnKF 同化机载雷达观测可以使美国国家飓风中心(NHC)的 2–4 天飓风强度业务预报误差平均减小 25%–28%,而同化后的飓风路径预报准确度与 NHC 业务预报相当(Zhang 和 Weng, 2015)。

相比于比较成熟的对大西洋飓风的机载雷达同化研究,对太平洋台风的相关研究还比较少。2008 年,全球观测系统研究与可预报性试验太平洋亚洲区域试验(T-PARC; Elsberry 和 Harr, 2008)和热带气旋结构外场试验(TCS-08)中采集到的多普勒雷达观测为研究机载雷达资料同化对太平洋台风的生成和预报的影响提供了契机(Zhang 等, 2012)。Li 等(2014)利用四维变分(4DVar)同化方法研究了机载雷达观测对预报台风 Nuri(2008)的生成的影响,发现同化机载雷达观测能够增强初始场中的中层涡旋和水汽条件,且有利于扰动中心的深对流发展,从而对台风的生成预报有明显提高。此外,同化机载雷达观测还可以使模拟的台风生成前和生成后的降水结构及环境流场更加真实。

虽然机载雷达观测的同化可以显著改善热带气旋的预报,但并不是所有的海域都有机载雷达的观测。此外,由于机载雷达的时空覆盖度会受到飞行任务的限

制,且高分辨率的雷达观测数据在飞机与地面计算中心之间较慢的传输速度会增加时间成本,因此沿海地基雷达资料同化对提高登陆热带气旋的预报就变得非常重要(Zhao和Jin, 2008; Zhao和Xue, 2009; Dong和Xue, 2013)。特别是随着我国登陆台风的年平均陆上维持时间的增加,通过有效地同化沿海地基雷达资料来改善台风登陆前的初始场,从而减小台风登陆后的路径和降水预报误差显得更加重要。

在以前的地基雷达资料同化研究中,大部分工作都是侧重展示有无雷达径向风的同化时热带气旋的预报效果对比以及不同同化方法的效果比较。Zhang F等(2009)利用EnKF在云解析的数值模式中同化了三部沿海地基多普勒雷达径向风观测,探究其对于近海快速加强的登陆飓风Humberto(2007)的初始化和预报的影响,并与3DVar的同化效果进行了对比。结果表明,EnKF分析场可以较准确地反映飓风的位置、强度和中尺度结构,能够明显改善对飓风的快速形成和近海快速加强的预报,而3DVar几乎完全没有能力再现这个过程。Weng等(2011)利用三种同化方法考察了同化一部沿海地基雷达径向风观测对登陆飓风Katrina(2005)预报的影响,发现利用EnKF初始化涡旋对飓风路径和强度预报的提高最明显;4DVar虽然对飓风路径预报的改善与EnKF相当,但却明显低估了飓风最强时段的最大地面风速;而3DVar的表现明显比其他两种同化方法差,但是仍然好于业务预报。进一步地,Zhu等(2016)发现利用EnKF在台风Vicente(2012)登陆前最强时段循环同化一部沿海地基雷达的径向风观测可以显著提高台风路径、强度和登陆后降水的预报。这些研究表明,同化地基雷达径向风观测可以明显改善登陆热带气旋的路径、强度和降水预报,且EnKF方法的同化效果明显好于3DVar。近年来,EnKF对数值预报的贡献已被许多研究证实(Whitaker等, 2008; Torn和Hakim, 2009)。目前,加拿大国家气象中心(CMC)已经在业务上使用EnKF来进行集合预报初始化(Houtekamer等, 2009)。Hamill等(2011)通过对比利用EnKF同化多种观测资料的高分辨率集合预报系统和业务集合预报系统[如欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、CMC、美国国家环境预报中心(NCEP)和英国气象局(UKMO)]发现,将高分辨率全球模式和EnKF资料同化方法结合起来可以在很大程度上提高热带气旋的业务集合预报水平。

相比于径向风,雷达反射率同化的改善效果并不十分显著。由于对微物理过

程中凝结核谱分布的观测非常困难,非线性的雷达反射率观测算子具有很大不确定性(Jung等,2010)。Dong和Xue(2013)发现同时同化雷达径向风和反射率对登陆飓风预报的改善效果与单独同化雷达径向风的效果相当,表明雷达径向风的贡献占主导地位。Wang等(2014)在同化雷达反演风的基础上再同化雷达反射率,对台风预报也没有更多提高。Zhao等(2012a)也发现同化雷达径向风比同化雷达反射率对台风路径和强度预报的提高贡献更大。

除了对沿海雷达资料的直接同化,利用GBVTD(Ground Based Velocity Track Display)或T-TREC(Typhoon circulation Track Radar Echo with Correlations)技术基于一部雷达的径向风或反射率观测反演出较完整的台风三维风场结构,并同化雷达反演风以提高登陆台风预报的研究正逐渐开展。Zhao等(2012b)利用3DVar考察了同化沿海地基雷达观测对登陆超强台风Saomai(2006)预报的影响,发现循环同化GBVTD反演风对初始台风结构和强度的改善比直接同化雷达径向风更明显,且对台风路径、强度和登陆后降水的预报均有提高。类似地,Li等(2013)利用3DVar分别在台风Meranti(2010)登陆前8、6、4和2小时将沿海地基雷达观测同化到对流解析的数值模式中,发现同化T-TREC反演风对初始台风结构和强度的改善也比直接同化雷达径向风更明显,且对台风路径、强度、结构和降水预报均有提高;但是,由于反演风和径向风对台风内核的覆盖度差异随着台风越来越靠近雷达而逐渐减小,因此同化反演风的优势也逐渐降低。进一步地,Wang等(2014)利用更先进的EnKF考察了循环同化沿海地基雷达观测对登陆台风Jangmi(2008)初始化和预报的影响。结果表明,同化T-TREC反演风比直接同化雷达径向风能在更短的时间内建立合理的强涡旋,且对台风路径、强度和降水预报均有提高。虽然雷达反演风的同化对提高登陆台风预报有重要贡献,但是基于单部雷达的反演技术无法发挥沿海雷达观测网的优势,而多部雷达反演存在时间同步困难、只能覆盖部分台风环流的问题(Kosiba和Wurman,2014),且反演风存在误差相关并需要额外的计算资源(Du等,2012)。因此,在雷达观测网日趋完善的情况下,对多部雷达原始观测的同化更显重要。

前人的工作大部分都是考察同化一部雷达观测的效果或者同化频率的影响,而对被同化雷达的个数、雷达对台风内核的覆盖度、同化开始时刻相对于台风登陆时刻的提前量以及同化窗长度的敏感性研究十分有限。Zhao等(2012a)利用

3DVar 考察了逐小时循环同化台湾和大陆的 8 部沿海地基雷达观测对登陆台风 Meranti (2010) 预报的影响, 发现经过两次同化多部雷达的径向风和反射率观测后可以充分建立起台风的涡旋尺度环流, 而更多次同化还能提高台风的次涡旋尺度结构模拟, 从而大大提高台风的路径和强度预报, 并改善不同化时模式对台风登陆后降水的低估。而同化台风内核覆盖度高的一部雷达的观测也能有效地提高预报, 但是需要增加同化次数才能得到与多雷达同化效果相当的台风环流结构, 且预报技巧略差于多雷达的同化效果。此外, 敏感性试验还表明, 3 或 6 小时的较低同化频率会使台风的分析强度显著偏弱, 并导致台风的路径和强度预报误差变大。然而, Zhao 等 (2012a) 并没有逐一地考察不同雷达的影响, 也没有考察是否在任何时段同化台风内核覆盖度高的一部雷达的观测都能对预报有较大提高。此外, 这些结论是基于 3DVar 同化方法得到的, 而利用更先进的 EnKF 同化方法对沿海地基雷达的资料敏感性还鲜有研究。本文将以 2009 年 8 月先后登陆台湾和我国大陆并造成严重灾害的台风 Morakot 为例, 利用 EnKF 对复杂下垫面条件下沿海雷达径向风同化的资料敏感性进行研究, 以期设计合理的雷达同化策略, 提高我国台风业务预报水平提供科学参考。本文作者对近十年的西北太平洋台风的统计表明, 登陆我国大陆的台风中有约 73% 的个例先登陆台湾或在距离台湾岛 500km 海域内经过, 台湾雷达能比大陆沿海雷达更早地观测到这类台风的环流结构, 考察台风登陆大陆后的路径和降水预报如何受到台湾沿海雷达同化的影响及其对台湾雷达资料的敏感性具有重要意义。

## 1.2 本文的研究内容和目标

本文将以 2009 年 8 月先后在台湾花莲和福建霞浦登陆并造成严重灾害的台风 Morakot 为例, 利用 EnKF 考察我国登陆台风预报对雷达径向风同化的资料敏感性。一方面, 本文将研究被同化雷达的个数、雷达对台风内核的覆盖度、同化开始时刻相对于台风登陆时刻的提前量、同化窗的长度等对 Morakot 登陆台湾后路径和降水预报的影响, 并从初始场误差、分析增量和中尺度结构模拟等角度分析可能的原因。另一方面, 本文将通过多雷达和单雷达同化研究台湾沿海雷达观测对 Morakot 登陆大陆后路径和降水预报的影响, 并讨论同化台风中心周围的观测如何能影响 Morakot 登陆后的远距离降水预报。

本文希望能够通过研究一次登陆台风预报对雷达同化的资料敏感性, 为未来



沿海雷达同化策略的合理设计以及我国台风业务雷达资料同化系统的建立提供科学参考。

### 1.3 本文创新点

本文首次利用 WRF-EnKF 同化系统研究了台风登陆后的路径和降水预报对台湾沿海雷达资料的敏感性,发现同化台风登陆前数小时内的观测对预报的提高十分重要,且应该避免在台风即将登陆时开始同化台风内核覆盖度较高的单部雷达的观测,否则容易在台风中心附近及观测的台风移动方向的前方产生不合理的强风场增量,导致台风路径和降水预报变差,这为合理、有效地同化雷达资料提供了科学依据。

本文首次利用 EnKF 研究并发现了合理地同化台湾沿海雷达的径向风观测可以显著提高台风登陆我国大陆后的路径和降水预报,而且通过对每部雷达资料的敏感性分析找到了对改善台风 Morakot (2009) 的预报起关键作用的初始场因子,这为揭示海峡两岸气象资料共享对提高我国登陆台风预报的贡献提供了科学参考。

### 1.4 章节安排

本文的第二章将会介绍使用的数值模式、观测数据、资料同化方法和雷达资料前处理技术。第三章将会对台风 Morakot (2009) 发生时的大尺度天气背景和中尺度结构特征进行简单介绍。第四章和第五章将会分别考察 Morakot 登陆台湾和大陆后的路径和降水预报对雷达同化的资料敏感性,并分析原因。第六章是本文的总结。

## 第二章 模式、资料与方法

从上世纪 80 年代至今,随着中小尺度气象学研究的深入和高性能计算机技术的不断提高,中尺度天气数值模式取得了快速的发展。目前,国内外应用较多的中尺度模式包括:美国研究、业务机构共同研发的非静力中尺度预报模式 WRF (Weather Research and Forecasting),美国 Oklahoma 大学风暴分析与预报中心 (CAPS) 研发的非静力区域预报模式 ARPS,中国气象局研发的新一代全球/区域同化预报系统中尺度模式 GRAPES\_Meso 等。其中, WRF 模式采用高度模块化和并行化的技术,集成了迄今为止中尺度方面的研究成果,为模拟和研究区域尺度、中尺度以及对流尺度的复杂天气过程提供了平台。近年来, WRF 模式被广泛应用于热带气旋的研究和预报中 (Pu 等, 2009; Zhang 和 Weng, 2015)。因此,本文采用 WRF 模式作为研究工具对台风 Morakot (2009) 进行模拟。

### 2.1 模式介绍

WRF 模式是由美国国家大气研究中心 (NCAR)、NCEP、地球系统研究实验室 (ESRL)、CAPS 等联合开发的新一代非静力中尺度数值预报模式 (Skamarock 等, 2008)。WRF 模式采用完全可压缩的欧拉静力方程,以及二阶或三阶 Runge-Kutta 时间积分方案,它在水平方向上采用 Arakawa C 跳点网格,在垂直方向上采用跟随地形的流体静力气压坐标,并且可以提供高分辨率 (~0.9km) 精细地形和下垫面植被资料。WRF 模式可以用作理想和实际模拟研究,包含单向和双向反馈机制,支持固定的和移动的模拟区域,采用兰勃脱、墨卡托等多种地图投影方案,并能够利用极地傅里叶滤波和周期性东西边界对全球进行模拟。模式的预报变量包括:水平和垂直风,扰动位温,扰动位势,干空气的扰动地面气压,湍流动能,水汽混合比,雨/雪混合比,云水/云冰混合比等。WRF 模式还包含多种物理过程参数化方案:复杂多相态的云微物理过程参数化,中尺度天气模拟中的积云对流参数化,全植被 (包括土壤、雪盖、海冰等) 多层陆面过程参数化,行星边界层的湍流动能参数化,以及考虑了云影响和地面通量的长波、短波辐射参数化等。

WRF 模式由前处理系统、资料同化模块 (WRF-DA)、主模式和后处理可视化等部分组成。前处理系统主要用于确定模拟嵌套区域,并将地形、植被、其他

模式提供的初边界气象场插值到模拟区域中。WRF-DA 基于变分资料同化技术，可以将观测数据分析到前处理系统产生的插值场中或者主模式循环运行产生的模拟结果中，也可以产生扰动集合，但并不是必需的模块。主模式利用动力学框架和物理参数化对模拟区域内的大气过程进行数值积分运算，其中动力学求解器包括两个：由 NCAR 研发的 ARW (Advanced Research WRF) 和由 NCEP 研发的 NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model)，本文使用的是前者。后处理部分是对模式计算结果进行可视化诊断分析，包括将物理量从模式  $\eta$  垂直层转换到等压面，以及将直接输出的模式变量转换成非直接输出的物理量等。

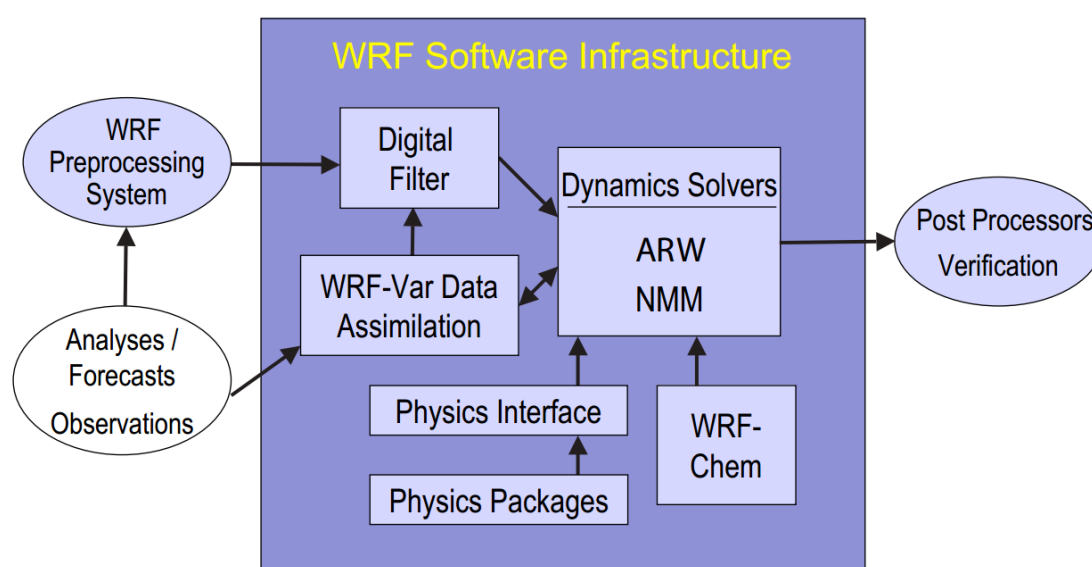


图 2.1 WRF 模式的组成部分 (引自 Skamarock 等, 2008)。

## 2.2 资料简介

本文使用 NCEP-GFS 分析场和预报场为 WRF 模式提供初始条件和边界条件，资料的时间分辨率为 3 小时，水平分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。GFS 资料在垂直方向上覆盖了地面、1000–10hPa 的 26 个气压层、边界层以及对流层顶等，并包含很多预报量和诊断量，比如地面气压、海平面气压、位势高度、温度、水平和垂直风、相对湿度、土壤相关变量和臭氧等。GFS 可以提供覆盖全球的格点资料，是美国业务天气预报数值模式之一。同时，本文基于 NCEP 全球最后分析资料 (FNL) 和 ECMWF 全球再分析资料 (ERA-Interim) 对 Morakot (2009) 发生时的天气背景和结构特征进行分析。FNL 所用的模式与 GFS 相同，但时间分辨率 (6 小时) 和水平分辨率 ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) 均比 GFS 低。为了同化更多的观测资料 (包括全球

通信系统和其他来源的常规和非常规观测), FNL 的初始化时间比 GFS 延迟 1 个小时左右。而 ERA-Interim 的水平分辨率可以达到  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ , 可以更准确地定位台风路径和诊断分析。另外, 本文还使用了台湾中央气象局的最佳台风路径, 台湾 406 个自动雨量站的逐小时降水观测, 我国大陆东南沿海的 512 个地面自动观测站的逐小时降水观测, 以及台湾沿海的四部 S 波段 (10cm) 业务多普勒雷达的径向风和组合反射率观测 (~6 分钟/体扫)。

台湾业务多普勒雷达网包括一部位于五分山 (WFS) 的 WSR-88D 型号雷达和三部分别位于花莲 (HL)、垦丁 (KT) 和七股 (CG) 的 Gematronik 1500S 型号雷达, 且这四部雷达天线的海拔高度依次约为 766、63、41 和 38 米。每部雷达包括 9 个仰角 ( $0.5^{\circ}, 1.5^{\circ}, 2.4^{\circ}, 3.3^{\circ}, 4.3^{\circ}, 6.0^{\circ}, 9.9^{\circ}, 14.6^{\circ}, 19.5^{\circ}$ ), 径向风观测的最大范围为 230km。台湾岛具有复杂的中尺度地形, 全岛山系纵贯南北: 主脊中央山脉位置偏东, 平均高度在 2000 米以上, 并拥有多个超过 3000 米的山峰; 雪山山脉位于台湾北部、中央山脉的西侧, 呈东北-西南走向; 而中央山脉和雪山山脉以西为向台湾海峡延展的宽窄不一的冲积平原 (图 2.2)。因此, 考虑到台湾岛复杂山脉地形对雷达电磁波的阻挡, 以及雷达电磁波对人体健康和军事活动的不利影响, 以上四部沿海雷达在较低仰角上只能对某些方位角范围进行扫描, 比如 HL (KT) 雷达只能提供台湾岛以东 (以南) 海面上的雷达观测 (图 2.3)。

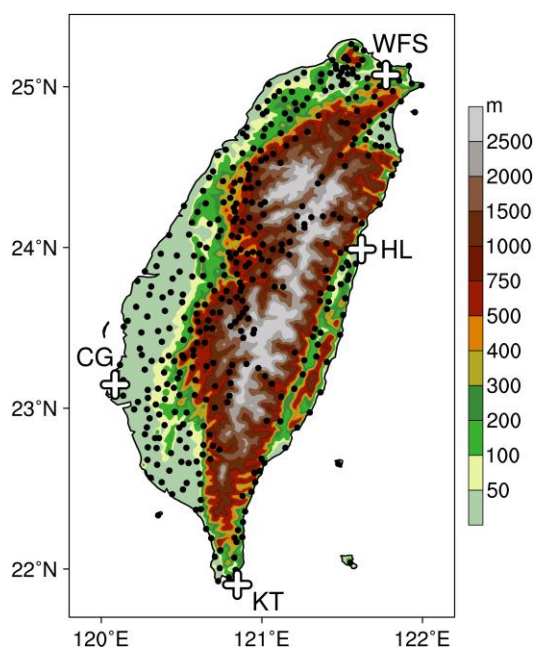


图 2.2 台湾的地形高度 (单位: m) 分布。图中黑色圆点表示地面自动雨量站, 白色十字分别表示五分山 (WFS)、花莲 (HL)、垦丁 (KT) 和七股 (CG) 四部沿海雷达的位置。

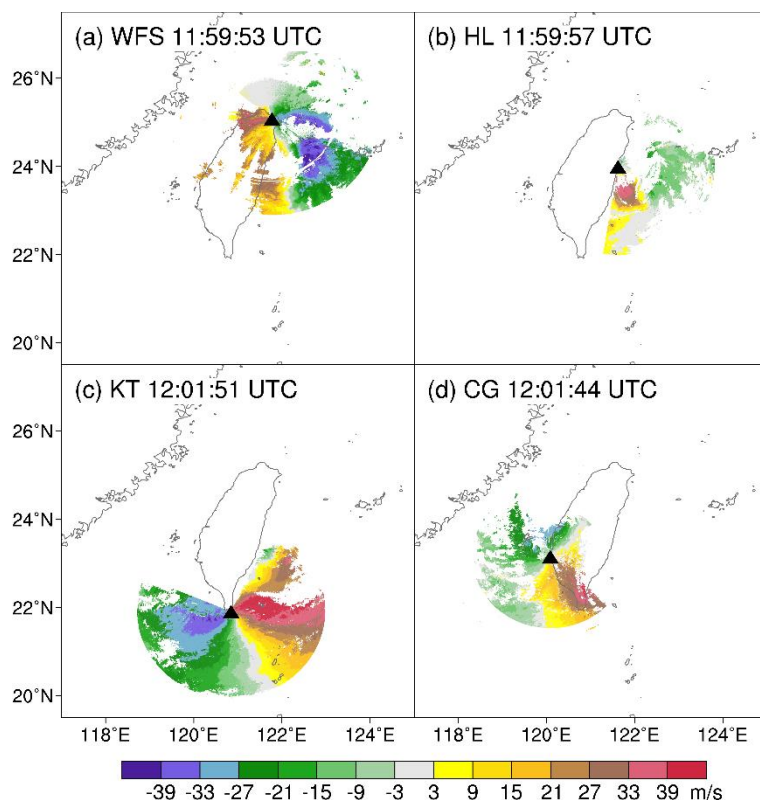


图 2.3 (a) WFS、(b) HL、(c) KT 和 (d) CG 雷达的  $0.5^\circ$  仰角径向风观测 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ ), 时间为 2009 年 8 月 7 日 12 时。图中黑色三角表示对应雷达的位置。

### 2.3 集合平方根滤波

随着计算资源的增加, 集合同化方法从上世纪 90 年代开始被逐渐应用到地球物理领域 (Evensen, 1994, 2003; Houtekamer 和 Mitchell, 1998, 2005)。集合同化是一系列大气 (海洋) 状态估计方法的统称, 它利用集合来代表误差的概率分布函数及其随时间的传递, 其中 EnKF 及其变种是应用最广泛的 (Lorenz, 2003; Zhang 和 Snyder, 2007; Meng 和 Zhang, 2011)。EnKF 利用短期集合预报来估计观测量和模式变量 (非观测) 之间的流依赖的背景误差协方差, 并将观测信息在空间上和变量之间进行传播 (Snyder 和 Zhang, 2003; Meng 和 Zhang, 2007, 2008)。本文使用的集合平方根滤波 (EnSRF) 是被广泛应用的 EnKF 变种之一, 其同化效果相比于传统 EnKF 更优 (Whitaker 和 Hamill, 2002)。在 EnKF 被应用于大气研究的初期, 为了避免由于系统性地低估分析误差协方差而引起的滤波发散问题, 需要利用被随机扰动的观测来更新不同的集合成员 (Houtekamer 和 Mitchell, 1998)。然而, 对于成员个数有限的集合来说, 扰动观测会增加集合同化中对背景误差协方差估计的取样误差。2002 年, Whitaker 和 Hamill 提出了一种在概念上更加简单的、不需要对观测进行扰动的集合滤波算法——EnSRF。在

假设观测和背景误差不相关的前提下，EnSRF 逐一地同化观测，而非同时同化所有观测。

与传统 EnKF 算法类似，EnSRF 利用前面观测所更新的集合扰动来为同化下一个观测提供背景误差协方差，并将前面观测所更新的集合平均作为同化下一个观测的背景场。EnSRF 同化观测的更新方程如下：

$$\bar{x}^a = \bar{x}^b + K(y^o - H\bar{x}^b), \quad (2.1)$$

$$x'^a = x'^b - \tilde{K}Hx'^b, \quad (2.2)$$

$$K = P^b H^T (HP^b H^T + R)^{-1}, \quad (2.3)$$

$$\tilde{K} = \alpha K, \quad (2.4)$$

$$\alpha = (1 + \sqrt{\frac{R}{HP^b H^T + R}})^{-1}, \quad (2.5)$$

其中， $\bar{x}^b$ 和 $\bar{x}^a$ 分别表示背景场和分析场的集合平均， $x'^b$ 和 $x'^a$ 分别表示背景场和分析场的集合扰动， $y^o$ 表示观测。 $H$ 表示将模式变量从模式空间投射到观测空间的观测算子，它可以是非线性的，比如将温度、湿度和臭氧浓度转换成辐射。 $\tilde{K}$ 是用于更新集合扰动的卡尔曼增益矩阵，它在传统卡尔曼增益矩阵 $K$ 的基础上乘以小于1的系数 $\alpha$ ，相当于在传统 EnKF 中扰动观测对集合发散度的增加。 $P^b$ 是背景误差协方差矩阵，无论对于传统 EnKF 还是 EnSRF 来说，并不需要直接计算 $P^b$ ，而需要利用集合估计流依赖的 $P^b H^T$ 和 $HP^b H^T$ 。 $R$ 是观测误差协方差矩阵，由于 EnSRF 每次只同化一个观测，因此 $R$ 是一个常数。

对于成员个数有限的集合来说， $K$ 对 $P^b$ 的非线性依赖常常引起集合平均分析误差的低估，从而减小同化中对观测的权重，最终导致滤波发散。为了避免这个问题，集合协方差膨胀(Anderson, 2001)、双 EnKF 系统(Houtekamer 和 Mitchell, 1998)、集合协方差松弛 (Zhang 等, 2004) 等一系列增大集合方差的方法被提出。本文采用协方差松弛方法来避免滤波发散，即：

$$x'_{new}^a = (1 - \beta)x'^a + \beta x'^b, \quad (2.6)$$

由此，新的分析场集合扰动 $x'_{new}^a$ 是利用(2.2)式计算出的分析场集合扰动 $x'^a$ 和背景场集合扰动 $x'^b$ 的加权平均而得到的。由于实际预报模式误差的存在，以及同化观测会使不确定性降低， $x'^a$ 小于 $x'^b$ ，而本文中松弛系数 $\beta$ 取为 0.8 可以增大分

析场集合扰动的不确定性。

## 2.4 连续协方差局地化

考虑到高分辨率的地基多普勒雷达观测可以对多尺度的大气状态进行观测，本文采用 Zhang 等（2009）提出的连续协方差局地化方法（Successive covariance localization, SCL）来同化雷达径向风观测。SCL 技术假设大尺度和小尺度天气误差同时存在，利用 Gaspari 和 Cohn（1999）的五阶相关函数，在不同模拟区域中采用不同的局地化影响半径（ROI）同化不同的随机取样观测，从而减小不同尺度天气过程的误差，并降低计算成本和取样误差。与早期的经验客观分析所使用的连续订正方法类似，SCL 方法的具体操作流程如下：首先，用较大的影响半径同化相对少的观测来减小有重要动力学意义的大尺度天气误差；然后，用较小的影响半径同化相对多的观测来减小中小尺度天气误差和仍然存留的大尺度天气误差。这种同化过程需要不断地重复，直到观测网能解析的所有尺度天气误差均充分地减小。与使用单一影响半径的传统同化方法相比，SCL 方法的优势已经被 Zhang 等（2009）证实。

本文对台风 Morakot（2009）的模拟采用三重嵌套区域，由外到内的水平分辨率依次为 40.5, 13.5 和 4.5km（详见第四、五章），并使用如下的 SCL 设置：首先，在三个模拟区域中均使用 1215km 的水平影响半径同化随机选取的 10% 的观测，以减小大尺度背景场的误差；然后，在两个嵌套区域中均使用 405km 的水平影响半径同化随机选取的另外 20% 的观测，以减小台风尺度的误差；最后，在最内重区域中使用 135km 的水平影响半径同化随机选取的另外 60% 的观测，以减小更小尺度的误差。换句话说，在从外向内的三个模拟区域中依次同化 10%，30% 和 90% 的观测，这是由于天气系统的尺度越小，其自由度越大而平衡度越小。而剩余 10% 的观测将留作检验，不会被同化到任何区域中。

## 2.5 质量控制与超级观测

多普勒雷达通过发射电磁波并检测回波信号中由降水粒子径向运动引起的频率变化，来获取降水强度和风场径向分量的信息。多普勒雷达的最大探测距离  $R_{max}$  与最大不模糊速度  $V_{max}$  成反比：

$$R_{max} = \frac{c}{2\omega}, \quad (2.7)$$

$$V_{max} = \pm \frac{\omega\lambda}{4}, \quad (2.8)$$

其中,  $c$ 表示光速,  $\omega$ 表示脉冲重复频率,  $\lambda$ 表示波长。在最大探测距离内, 当实际风速过大并使粒子沿雷达波束方向的径向速度超过最大不模糊速度时, 就会发生速度折叠, 即测得的径向速度与真实径向速度相差 $2nV_{max}$  ( $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ )。在强烈的天气系统(如台风)中风速非常大, 常常会造成径向速度折叠。因此, 必须首先对原始雷达观测资料进行退模糊处理, 才能保证同化雷达径向风观测的潜在贡献。本文使用 NCAR 研发的雷达资料读写软件 SOLO(Nettleton 等, 1993)对雷达观测进行手动退模糊。首先, 利用 SOLO 软件找到雷达原始径向速度图像上具有显著速度折叠特征的区域; 然后, 输入每部雷达各自的最大不模糊速度即可将退模糊后的正确径向速度写入雷达观测文件中。

考虑到雷达观测的空间分辨率( $\sim 250$ 米)远高于本文使用的模式网格格距, 资料稀疏化必不可少。本文借鉴了 Zhang 等(2009)提出的产生雷达径向风超级观测(SO)的方法。超级观测是通过将极坐标系下的多个原始径向风观测进行平均而得到的。为了最小化不同超级观测之间的相关性, 每个原始观测像素点至多能够被用来产生一个超级观测。同时, 为了避免将方向差异很大的径向风进行平均而带来风速抵消的问题, 本文将产生一个超级观测的多个原始观测像素点限制在径向距离不超过 5km, 方位角不超过  $5^\circ$  的范围内(以下简称“取样格”)。另外, 为了纠正径向速度手动退模糊可能造成的主观错误, 在产生超级观测的过程中还需要以下 5 个数据质量控制的步骤: (1) 为了消除难以分辨的观测噪音和地面杂波的影响, 去掉任何小于  $2\text{m s}^{-1}$  或大于  $70\text{m s}^{-1}$  或距离雷达 4km 范围内的原始径向风观测; (2) 为了避免被平均的多个原始像素点之间存在较大的发散度, 需要计算取样格内的平均值和标准差, 并去掉任何一个与平均值相差两倍标准差以上的原始像素点; (3) 当一个取样格内的有效原始像素点少于 4 个时, 该取样格不能被用于产生超级观测; (4) 当一个取样格的标准差超过所有取样格的标准差的平均值的两倍时, 该取样格不能被用于产生超级观测; (5) 在一个有效的取样格内, 将距离中心最近的至多 10 个原始像素点进行平均, 以得到该取样格所对应的超级观测。此外, 在同化过程中, 如果一个超级观测与预报背景场的差异超过观测误差的 5 倍, 则该超级观测将不被同化。本文假设径向风的观测误差为  $3\text{m s}^{-1}$ 。



## 2.6 本章小结

本章详细介绍了本文使用的 WRF 模式、观测和再分析资料、资料同化方法以及数据的前处理技术等。

### 第三章 台风 Morakot (2009) 观测特征分析

本章将基于台风最佳路径、地面自动站观测、FNL 再分析资料和雷达观测等对台风 Morakot (2009) 登陆台湾和我国大陆东南沿海的过程进行分析, 以全面了解 Morakot 的大尺度天气背景、中尺度结构特征及其造成的严重灾害。

#### 3.1 个例概况

2009年8月2日06时(世界时,下同), Morakot 在距离台湾岛东岸约 1000km 的太平洋海面上形成。之后, Morakot 先向东缓慢移动再折向西移动, 并逐渐加强(图 3.1)。8月5日12时, 台湾中央气象局发布海上台风警报; 8月6日00时, 升级为海上陆上台风警报。Morakot 于8月6日09时达到最强, 其近中心最大平均风速为  $40\text{m s}^{-1}$ , 并在之后的 32 个小时内维持此强度而继续向西移动。8月7日18时, Morakot 登陆台湾东部花莲县并开始减弱。Morakot 以约  $3\text{m s}^{-1}$  的速度缓慢地穿过台湾岛北部, 于8月8日06时离开台湾岛进入台湾海峡, 强度减弱为强热带风暴。此后, Morakot 以约  $2\text{m s}^{-1}$  的速度在台湾海峡上缓慢地向西北方向移动, 继续对台湾造成影响。

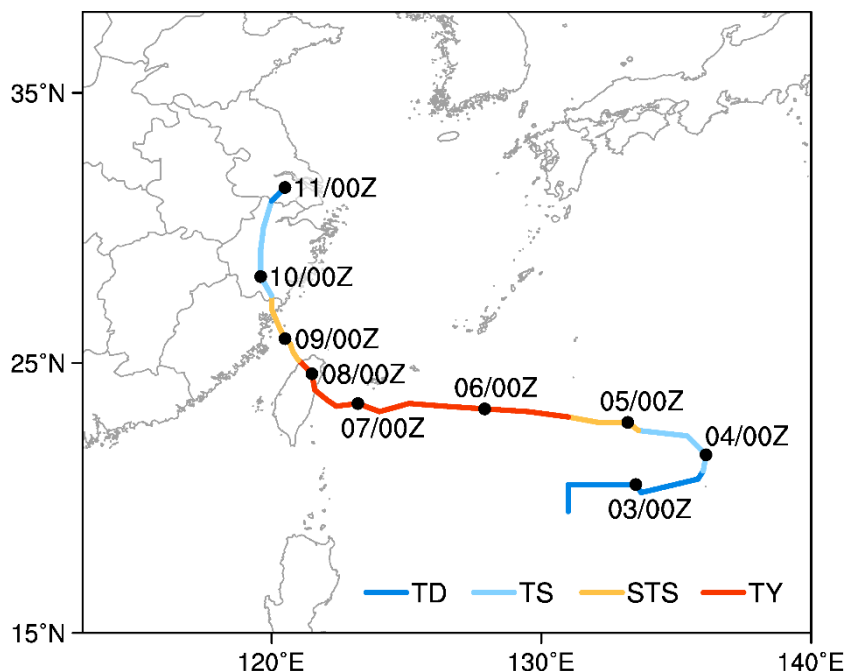


图 3.1 台湾中央气象局的 Morakot (2009) 最佳路径(时间为 2009 年 8 月 2 日 06 时到 8 月 11 日 00 时), 不同的颜色分别代表热带低压 (TD), 热带风暴 (TS), 强热带风暴 (STS) 和台风 (TY) 等级。

Morakot 给台湾带来了 50 年一遇的极端强降水, 8 月 7-9 日的累积降水在台湾南部地区超过 2000mm (图 3.2a)。除了 Morakot 的环流半径比较大、登陆台湾后及在台湾海峡上的移动异常缓慢 (Wang 等, 2012) 之外, 台风环流与台湾岛山脉地形之间的相互作用也是发生强降水的重要原因 (Fang 等, 2011; Yu 和 Cheng, 2013)。Morakot 登陆后 24 小时累积降水主要分布在 23.5°N 以南的中央山脉山脊及其西侧平原上 (图 3.2b), 最大值为 1345.5mm, 与 24 小时累积降水的世界纪录 (1825mm) 比较接近。持续的强降水引发台湾多地泥石流、山体滑坡等灾害, 导致 700 多人死亡, 直接经济损失高达 260 亿元。Morakot 是台湾历史上死亡人数最多的台风, 其间受灾最严重的是台湾南部的高雄县小林村, 山体滑坡导致该村被埋且约 660 人遇难。

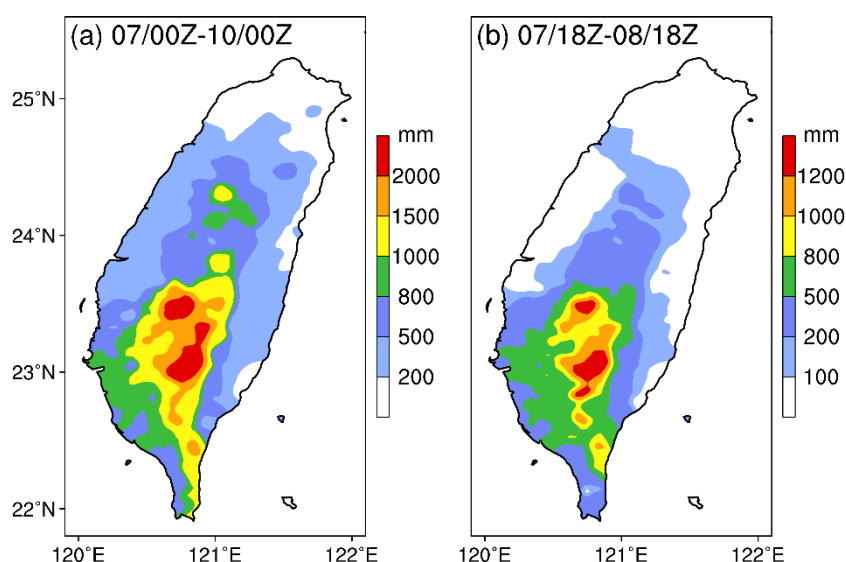


图 3.2 观测的 (a) 2009 年 8 月 7-9 日和 (b) Morakot 登陆台湾后 24 小时的累积降水 (单位: mm) 分布。

Morakot 于 8 月 9 日 12 时再次登陆福建霞浦, 此时其强度减弱为强热带风暴 (近中心最大平均风速为  $25\text{m s}^{-1}$ ; 图 3.1)。之后, Morakot 向北移动并逐渐减弱, 相继给福建、浙江、安徽、上海、江苏等地带来大到暴雨, 造成严重内涝。Morakot 登陆后的 24 小时内, 长江三角洲大部分地区 (包括浙江北部、江苏中南部等) 累积降水达到 50mm 以上, 局部地区达到 100mm 以上 (图 3.3a)。Morakot 于 8 月 10 日 18 时减弱为热带低压, 并开始逐渐消散。虽然 Morakot 登陆我国大陆后的强度和降水量低于其登陆台湾后的强度和降水量, 但是仍然给我国东南沿海多省市造成了严重灾害。受强降水影响, 浙江、福建、安徽等地 20 余条河流

发生超警戒位洪水，沿海地区近 6000 间房屋倒塌，约 136,000 间房屋受到不同程度的损坏，因灾死亡 9 人，直接经济损失达 8.9 亿元。然而，业务部门对 Morakot 登陆我国大陆后的 24 小时累积降水预报存在很大误差，严重高估了福建北部和浙江中南部的降水强度，并严重低估了江苏中南部的降水强度（图 3.3b）。

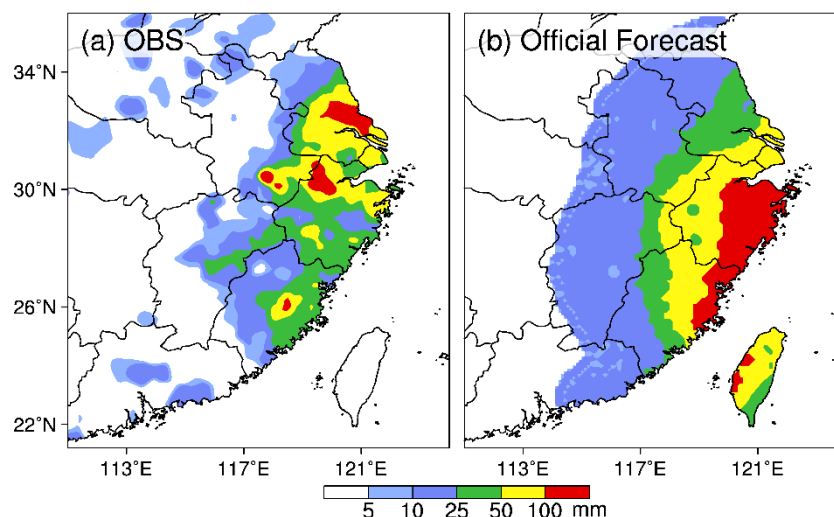


图 3.3 (a) 观测和 (b) 业务预报的 Morakot (2009) 登陆福建后 24 小时的累积降水 (单位: mm) 分布。

### 3.2 天气形势

Morakot 登陆台湾前，其东北侧的太平洋副热带高压较强，西脊点 (以 5880m 等值线为代表) 可向西伸展到我国黄海海域 (图 3.4a, b)。研究表明，热带气旋的运动常常与其周围环境风场的平流作用密切相关 (Chan 和 Gray, 1982; Holland, 1984)。因此，受副热带高压南侧的大尺度环境风场的引导，Morakot 向西移动而逐渐靠近台湾。同时，台风周围的水汽条件从 8 月 7 日 00 时到 12 时越来越有利于强降水的发生，尤其是台湾海峡和台湾岛西南侧的可降水量超过  $75\text{kg m}^{-2}$  的范围明显扩大 (图 3.4a, b)。Morakot 登陆台湾后，副热带高压开始减弱东退并呈西北-东南向分布，其西脊点仅能到达日本附近，从而促使 Morakot 缓慢地向西北方向移动 (图 3.4c, d)。同时，台风周围充足的水汽条件继续维持，有利于强对流和强降水的发生。另外，Morakot 登陆台湾后，南海北部的低空西南气流逐渐变得活跃。

Morakot 进入台湾海峡后，副热带高压继续减弱东退，台风周围的水汽条件开始变差且可降水量超过  $75\text{kg m}^{-2}$  的范围出现不对称性 (图 3.5a)。Morakot 登陆福建时，副热带高压开始增强 (如 5880m 等值线从  $15^{\circ}\text{N}$  至  $35^{\circ}\text{N}$  均向西扩展)，

而台风周围的可降水量高值区仍具有明显的不对称性 (图 3.5b)。Morakot 登陆后, 副热带高压进一步增强西伸; 到 8 月 10 日 12 时, 30°N 附近的副热带高压比台风登陆前向西扩展了约 10 个经距 (图 3.5c, d)。受副热带高压西侧的偏南环境风场的引导, Morakot 登陆后逐渐向北移动。同时, 台风周围的水汽条件在登陆后明显减弱, 可降水量高值区集中分布在距离台风中心较远的长江三角洲及以北地区, 与观测的强降水落区比较吻合。

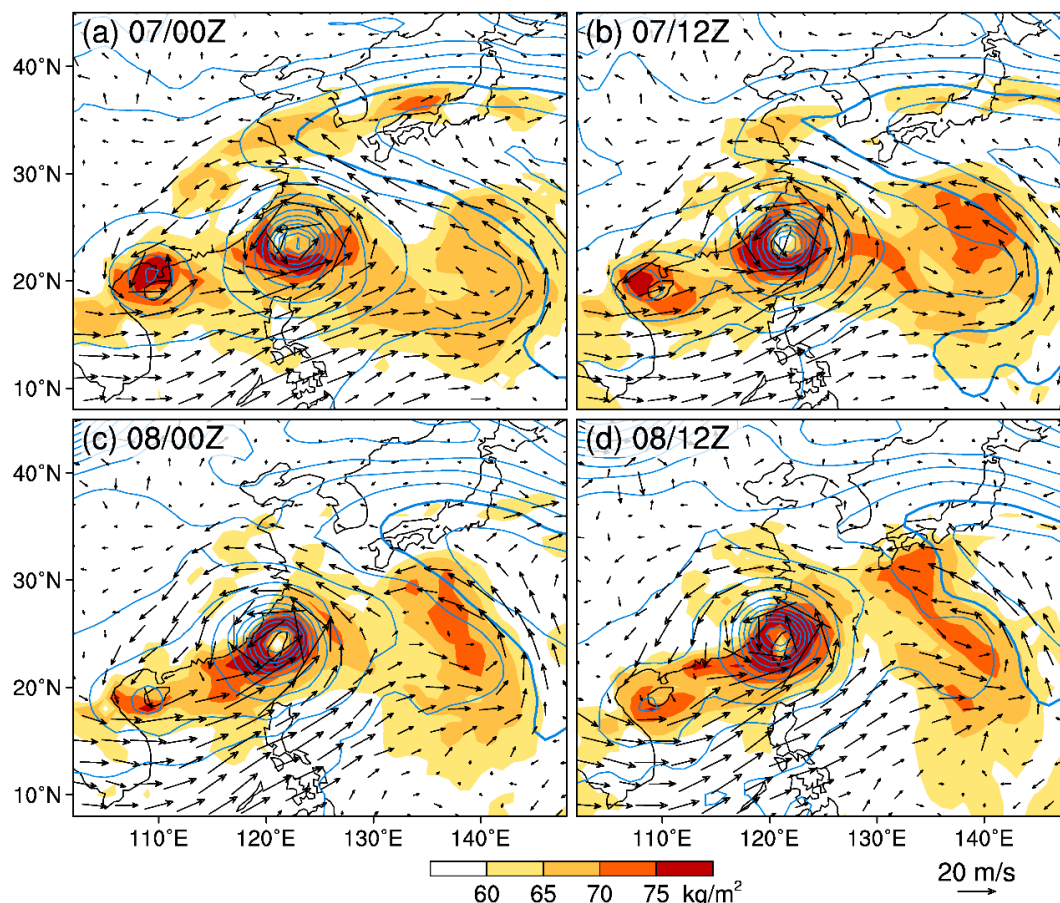


图 3.4 FNL 再分析的 2009 年 8 月 (a) 7 日 00 时, (b) 7 日 12 时, (c) 8 日 00 时, (d) 8 日 12 时的 500hPa 位势高度 (单位: m; 等值线间隔为 20m 且 5880m 加粗), 850hPa 风场 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ ; 参考矢量标在图的右下角) 和可降水量 (填色; 单位:  $\text{kg m}^{-2}$ )。

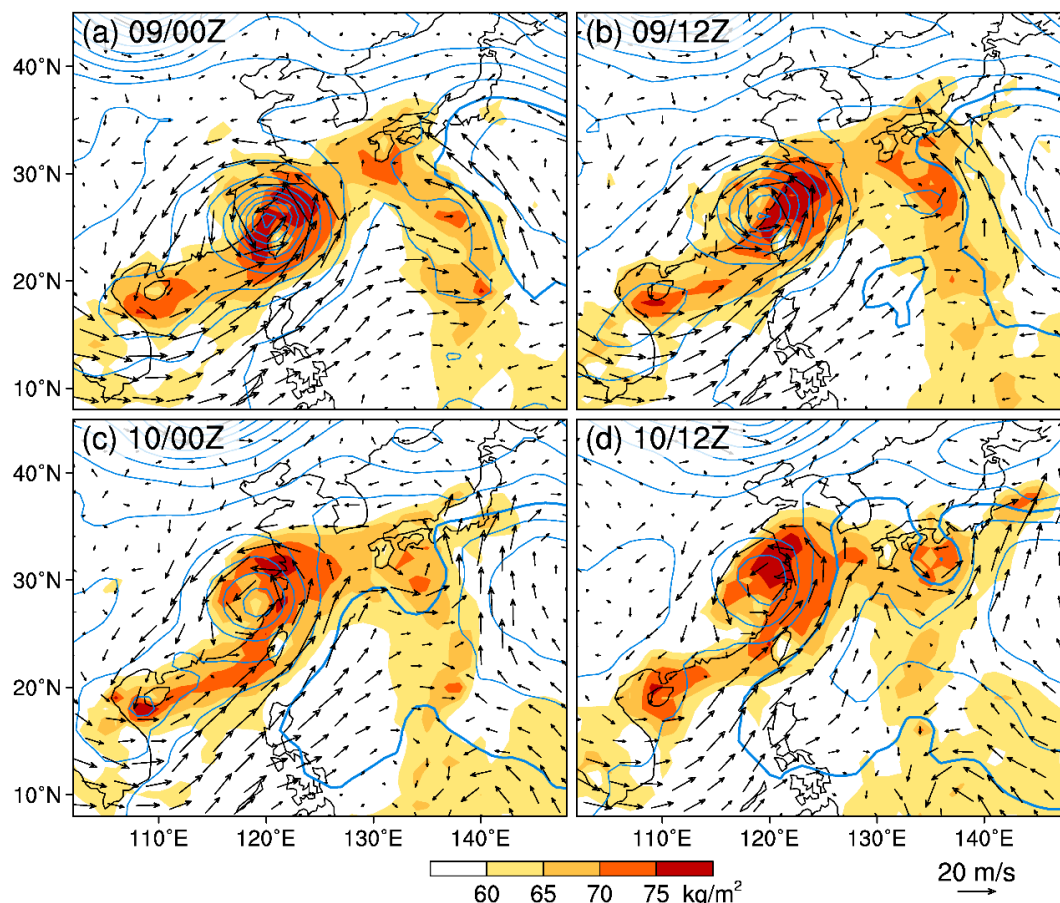


图 3.5 与图 3.4 相同，但时间为 2009 年 8 月 (a) 9 日 00 时，(b) 9 日 12 时，(c) 10 日 00 时，(d) 10 日 12 时。

### 3.3 中尺度结构特征

在 Morakot 接近、登陆台湾的过程中，台湾沿海的四部业务多普勒雷达为台风不同区域的中尺度结构演变特征提供了高时空分辨率的观测。8 月 7 日 06 时至 18 时，HL 和 WFS 两部雷达的  $0.5^\circ$  仰角径向风观测可以较好地反映台风内核区低层环流的特点，比如近台风中心的强切向风位置（图 3.6a-f）。同时，KT 雷达的观测表明台湾岛以南的低空西南气流逐渐活跃（图 3.6g-i），而 CG 雷达的观测则反映出台湾海峡上的北风分量逐渐加强（图 3.6j-l），这些特征与 FNL 再分析资料的结果比较一致。

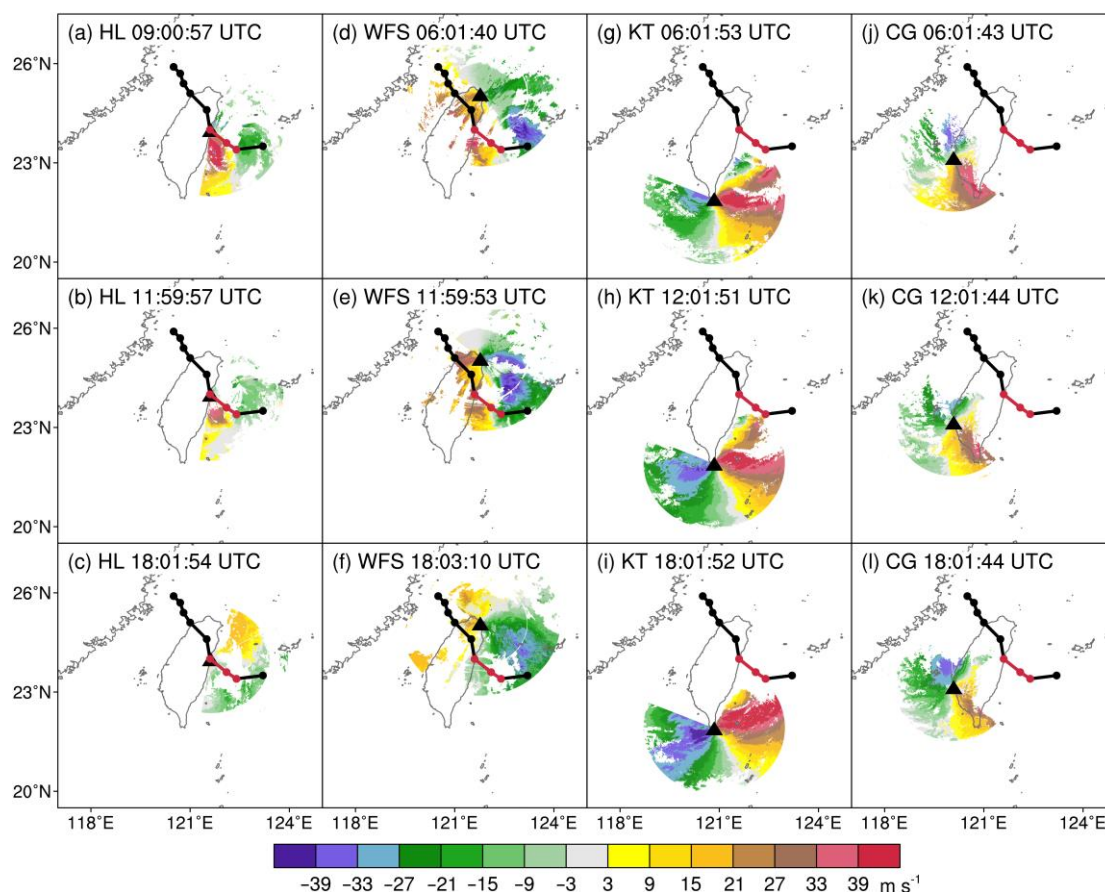


图 3.6 (a-c) HL, (d-f) WFS, (g-i) KT 和 (j-l) CG 雷达的 0.5° 仰角径向风观测 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ ), 时间从上到下分别为 2009 年 8 月 7 日 06 时 (HL 雷达因 7 日 06 时缺测而用 7 日 09 时代替), 12 时和 18 时。图中点线表示 8 月 7 日 00 时到 8 月 9 日 00 时的 Morakot 最佳路径, 黑色三角表示对应雷达的位置。

Morakot 登陆台湾后, 在 22°N 与 23°N 之间, 有一条东西向的强对流带 (雷达组合反射率  $\geq 40\text{dBZ}$ ) 从台湾海峡延伸至台湾岛西南部并长时间维持, 而嵌入其中的强对流单体在海面上不断生成、发展, 并向下游传播 (图 3.7)。从 8 月 8 日 00 时开始, 这条东西向的强对流带在 23°N 附近准静止地维持了约 15 个小时。同时, 传播至强对流带东末端处的对流单体由于中央山脉的地形抬升作用而增强, 这可能是强对流带与 Morakot 登陆后 24 小时累积强降水的纬度位置一致的原因。另外, 从雷达回波的时间演变还可以发现, Morakot 具有明显的不对称结构, 其降水主要发生在台风环流的东、南部。因此, 水汽凝结产生的潜热加热也不对称, 并由此产生指向东南方向的力, 从而进一步减慢 Morakot 的移动速度 (Wang 等, 2012)。

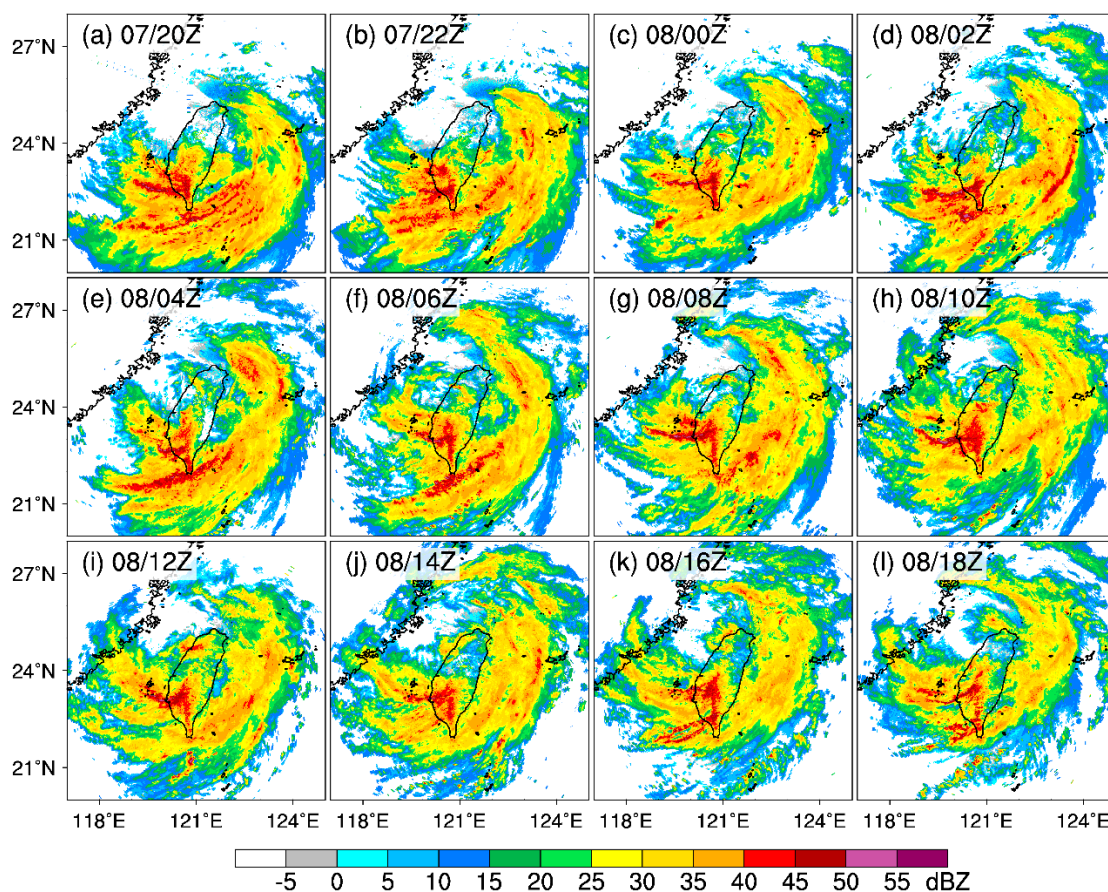


图 3.7 Morakot 的雷达组合反射率（单位：dBZ）的演变，时间为 2009 年 8 月 7 日 20 时到 8 月 8 日 18 时（间隔为 2 小时）。

由于 Morakot 在台湾海峡上的移动异常缓慢，在其离开台湾岛的 12 个小时内，四部台湾沿海雷达仍然可以观测到台风不同区域的环流结构(图 3.8)。其中，WFS 雷达对台风内核区的覆盖最好，而距离台风最远的 KT 雷达由于台风的进一步远离只能提供越来越少的径向风观测。另外，Morakot 在台湾海峡上的稳定少动也使四部雷达在 8 月 8 日 06 时到 18 时的低层风场结构变化较小。



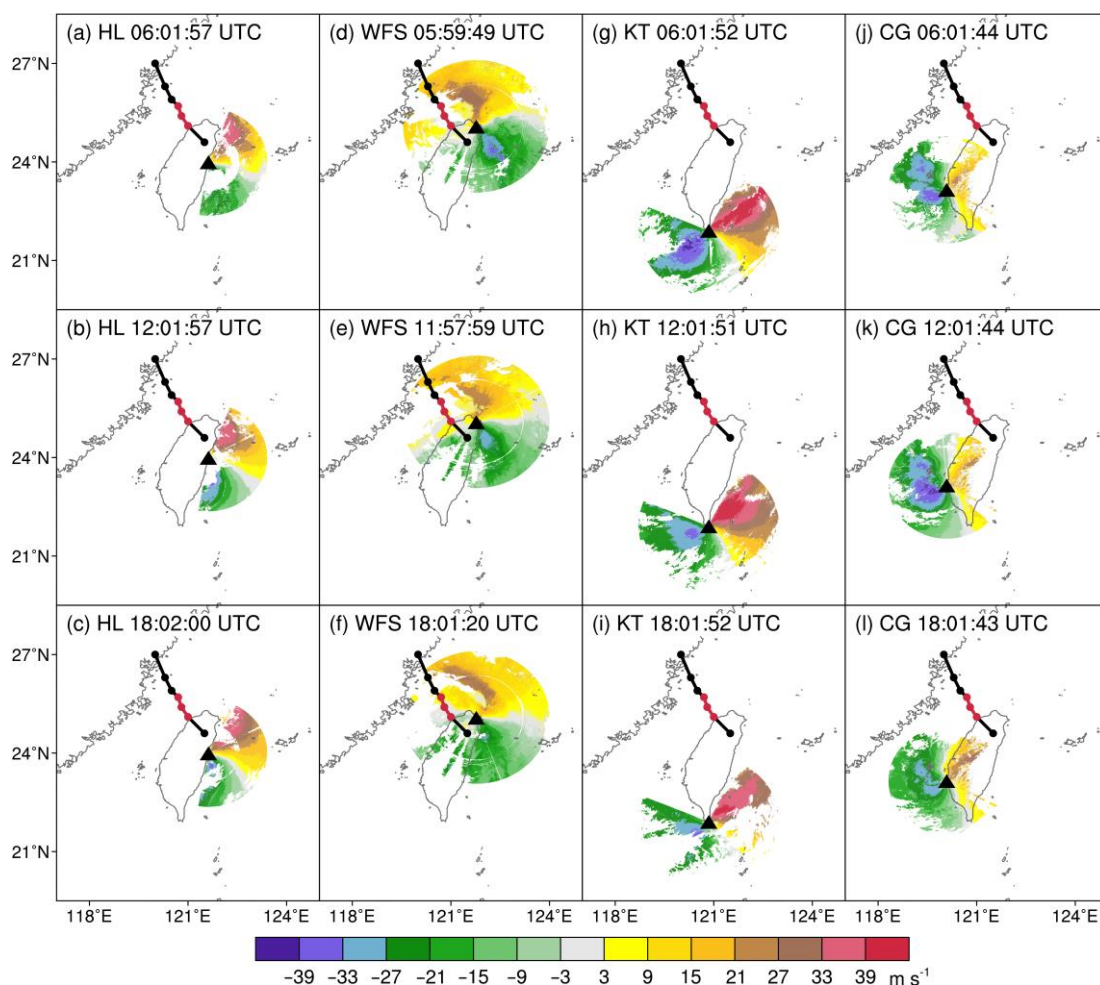


图 3.8 (a-c) HL, (d-f) WFS, (g-i) KT 和 (j-l) CG 雷达的  $0.5^\circ$  仰角径向风观测 (单位:  $m s^{-1}$ ), 时间从上到下分别为 2009 年 8 月 8 日 06 时, 12 时和 18 时。图中点线表示 8 月 8 日 00 时到 8 月 9 日 12 时的 Morakot 最佳路径, 黑色三角表示对应雷达的位置。

### 3.4 本章小结

本章利用观测和再分析资料对台风 Morakot (2009) 登陆台湾和我国东南沿海的过程进行了分析, 得到以下主要结论:

(1) 太平洋副热带高压的加强西伸和减弱东退对 Morakot 的运动有重要的引导作用, 且台风周围的水汽条件有利于 Morakot 登陆台湾后强降水的发生和登陆大陆后远距离降水的发生。

(2) Morakot 登陆台湾后, 有一条准静止强对流带从台湾海峡延伸至台湾岛西南部, 而嵌在其中的对流单体不断向下游传播且在山脉地形的抬升作用下增强, 有利于下游的台湾岛南部发生强降水。

## 第四章 Morakot (2009) 登陆台湾后的预报对雷达径向风同化的资料敏感性

本章将利用 WRF-EnKF 系统循环同化雷达径向风观测, 考察台风 Morakot (2009) 登陆台湾后路径和降水预报对沿海雷达的资料敏感性(包括被同化雷达的个数、雷达对台风内核的覆盖度、同化开始时刻相对于台风登陆时刻的提前量、同化窗的长度等), 旨在为合理、高效地利用沿海雷达观测资料来提高我国登陆台风的预报提供科学参考。

### 4.1 不同化试验

在考察同化雷达径向风的影响之前, 先进行不同化任何观测的模拟试验。不同化试验(NoDA)以 2009 年 8 月 7 日 00 时的 GFS 分析场为初始场, 以 8 月 7 日 00 时到 8 月 8 日 18 时的逐 3 小时 GFS 预报场为边界场, 利用 WRF 模式的 3.6.1 版本对 Morakot 登陆台湾的整个过程进行 42 小时模拟, 其中包含本章着重考察的台风登陆后 24 小时的预报时段(图 4.1a)。模拟采用双向三重嵌套区域(图 4.2a), 由外到内的水平分辨率依次为 40.5, 13.5 和 4.5km。最外重区域(D1)包含  $150 \times 110$  个格点, 覆盖了我国中东部和西北太平洋的大部分地区; 而两个内重嵌套区域分别包含  $172 \times 151$  (D2) 和  $250 \times 250$  (D3) 个格点, 且最内重区域覆盖了台湾沿海所有雷达的最大径向风探测范围(230km 半径)和 Morakot 登陆台湾的路径(图 4.2b)。每个模拟区域均采用 35 个垂直层<sup>1</sup>, 模式最顶层为 10hPa。试验采用以下物理参数化方案: 包含六种水物质(水汽、云水、雨、雪、云冰以及霰)的 WSM6 云微物理方案(Hong 等, 2004), Grell-3D 集合积云参数化方案(仅在水平分辨率无法解析云的 D1 和 D2 中使用; Grell 和 Devenyi, 2002), YSU 行星边界层方案(Noh 等, 2003), RRTM 长波辐射方案(Mlawer 等, 1997), Dudhia 短波辐射方案(Dudhia, 1989), 以及包含 5 层土壤热扩散的陆面参数化方案等。

<sup>1</sup> 35 个模式垂直层:  $\eta = 1.00000, 0.99258, 0.98275, 0.96996, 0.95372, 0.93357, 0.90913, 0.87957, 0.84531, 0.80683, 0.76467, 0.71940, 0.67163, 0.62198, 0.57108, 0.51956, 0.46803, 0.42030, 0.37613, 0.33532, 0.29764, 0.26290, 0.23092, 0.20152, 0.17452, 0.14978, 0.12714, 0.10646, 0.08761, 0.07045, 0.05466, 0.03981, 0.02580, 0.01258, 0.00000$ 。

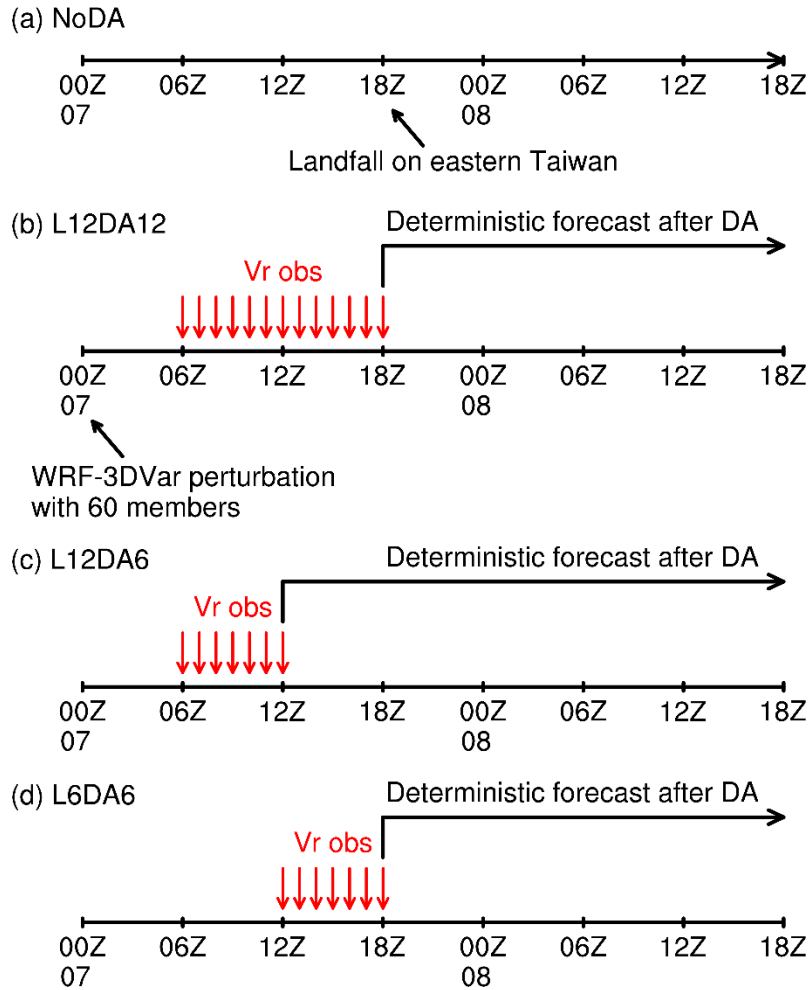


图 4.1 (a) NoDA 和 (b) L12DA12、(c) L12DA6、(d) L6DA6 三组 EnKF 循环同化试验的流程圖。

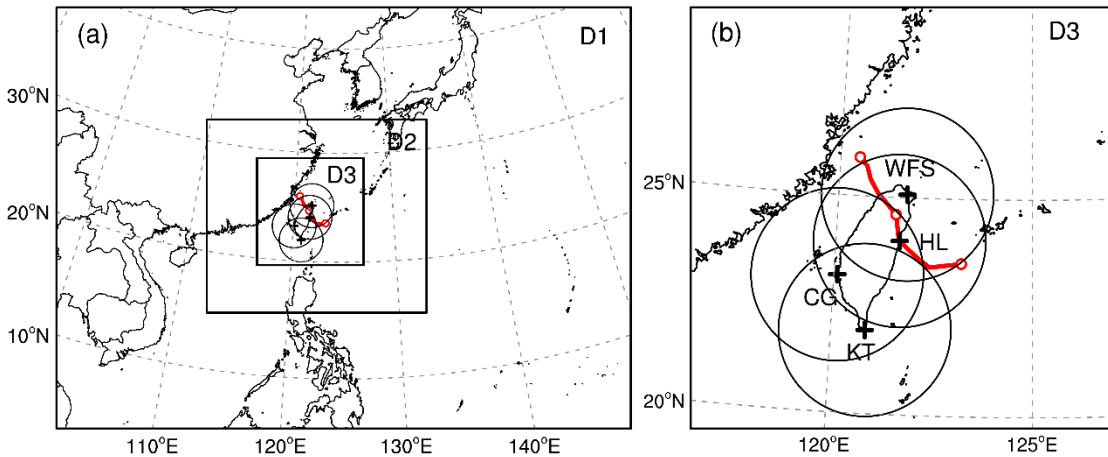


图 4.2 (a) 三重嵌套的模拟区域设置以及 (b) 最内重区域 D3 的放大。图中红线表示 Morakot 的最佳路径 (时间为 2009 年 8 月 7 日 00 时到 8 月 9 日 00 时), 其中 00 时的台风位置均用圆点标出; 黑色十字和圆圈分别表示台湾沿海的四部雷达位置和每部雷达的最大径向风探测范围 (230km 半径)。

在 NoDA 中, Morakot 的路径预报误差较大。由于台湾岛复杂多山地形的影响, 海平面气压场和台风低层环流场 (如 850hPa) 不能被用来定位台风中心。在本章中, 为了避免利用单一气压层对过岛台风定位产生的不连续路径, 将 700hPa 和 500hPa 的台风环流中心 (综合考虑风速低值中心和逆时针风向) 取平均来作为模拟的台风中心位置。NoDA 模拟的台风登陆时刻比观测晚, 登陆后台风先向西北方向移动, 再折向东北方向, 而后又向西北偏北方向移动 (图 4.3)。总的来说, 模拟的台风移速比观测慢, 且登陆后以向北移动为主, 与观测中 Morakot 向西北方向移动不符。8 月 8 日 18 时, 观测的 Morakot 已经离开台湾岛 12 个小时且位于台湾海峡上, 而模拟的台风才刚刚离开台湾岛。NoDA 对 Morakot 登陆台湾后 24 小时的平均路径预报误差接近登陆时刻台风位置误差的两倍 (图 4.4a)。

受较差路径预报的影响, 降水预报也出现了较大误差。虽然 NoDA 模拟的台风登陆后 24 小时的累积降水主要分布在台湾南部, 但是强降水范围明显比观测小, 且降水的精细位置与观测有较大差别 (图 4.3)。特别地, 与观测中 800mm 以上强降水主要分布在 23°N 以北不同, 模拟的 800mm 以上强降水几乎全部集中在 23°N 以南。为了定量地评估试验对降水的模拟能力, 本文使用 TS 评分来衡量降水预报技巧。首先, 将网格化的降水模拟结果双线性插值到自动雨量观测站处; 然后, 对某个降水量阈值  $\tau$  利用以下公式计算 TS 评分:

$$TS = \frac{hit}{hit+miss+false\_alarm}, \quad (4.1)$$

其中, *hit* 表示观测和模拟的降水都大于  $\tau$  的站点个数, *miss* 表示观测的降水大于  $\tau$  而模拟的降水小于  $\tau$  的站点个数, *false\_alarm* 表示观测的降水小于  $\tau$  而模拟的降水大于  $\tau$  的站点个数。结果表明, NoDA 对弱降水 (如  $\tau \leq 400\text{mm}$ ) 的 TS 评分较高 (0.5 以上), 而对强降水的模拟能力较差, 对  $\tau$  为 600, 800, 1000mm 的平均 TS 评分仅为 0.18 (图 4.4b)。

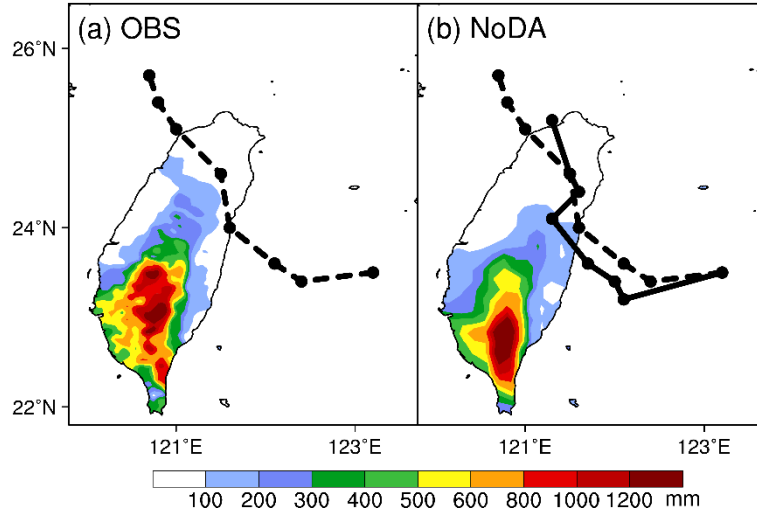


图 4.3 (a) 观测和 (b) NoDA 预报的 Morakot 登陆台湾后 24 小时的累积降水 (填色; 单位: mm) 分布。图中黑色虚线和实线分别表示最佳路径和 NoDA 预报的台风路径 (时间为 2009 年 8 月 7 日 00 时到 8 月 8 日 18 时, 间隔为 6 小时)。

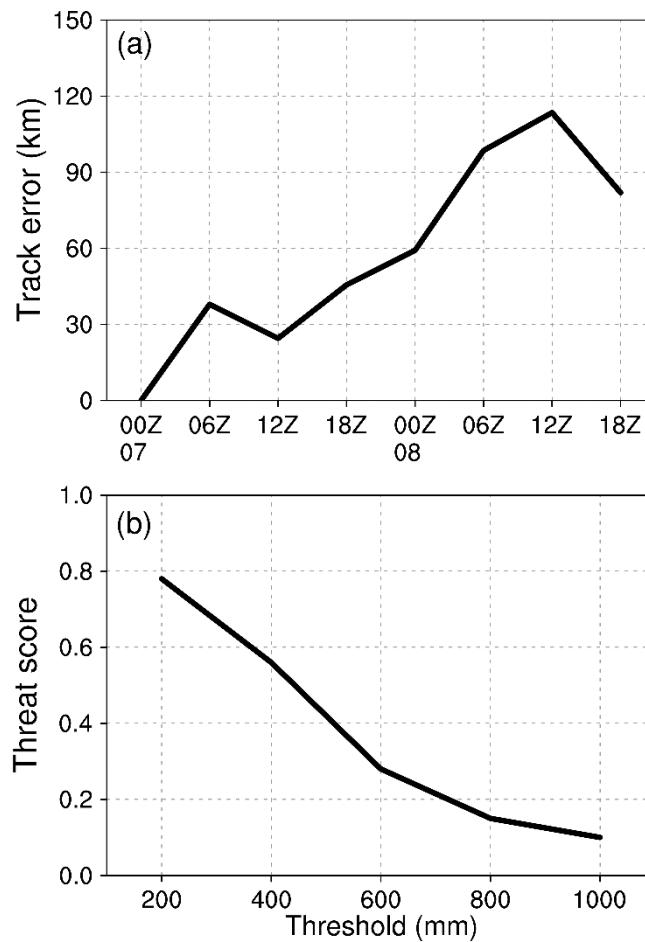


图 4.4 (a) NoDA 的逐 6 小时路径预报误差 (单位: km; 时间为 2009 年 8 月 7 日 00 时到 8 月 8 日 18 时), (b) NoDA 预报的台风登陆台湾后 24 小时累积降水的 TS 评分。

## 4.2 同化试验设计

### 4.2.1 初始扰动集合

为了考察利用 EnKF 同化雷达径向风观测对台风 Morakot 预报的影响,需要在保持与 NoDA 的模拟区域、物理参数化方案等相同的情况下,对 2009 年 8 月 7 日 00 时的初始场进行满足一定条件的随机扰动,产生 60 个集合成员。本文使用 WRF 模式的 3DVar 系统产生初始扰动集合,即在以 GFS 分析场为集合平均的基础上加上从缺省的 cv3 背景误差协方差中随机取样的扰动。背景误差协方差 cv3 是通过美国国家气象中心 (NMC) 的方法得到的,其利用 NCEP 的 GFS 模式对一年内发生的 357 个天气事件进行试验,并对每个事件的同一预报时间取 48 小时预报与 24 小时预报的差值场,再进行统计分析。为了得到平衡的初始扰动,需要首先对物理空间的控制变量(包括流函数、非平衡速度势、非平衡地面气压、非平衡温度和假相对湿度)进行满足正态分布(平均值为 0,标准差为 1)的随机扰动;然后,通过递归滤波和经验正交函数变换分别在水平和垂直方向上将随机扰动从物理空间映射到模式空间;最后,利用平衡方程将控制变量转换成模式预报变量。被扰动的模式预报变量包括水平风、位温、扰动气压和水汽混合比,而其他的模式预报变量(如垂直风、雨/雪混合比、云水/云冰混合比等)则不被扰动。

为了使初始随机扰动的不确定度与 GFS 模式的统计分析误差相匹配,需要对控制变量的方差、水平和垂直尺度进行调节,从而使对模式预报变量的扰动在模拟区域三维空间内的平均集合发散度满足:水平风的  $u$  和  $v$  分量约为  $2\text{m s}^{-1}$ ,位温约为  $1\text{K}$ ,扰动气压约为  $100\text{Pa}$ ,水汽混合比约为  $0.5\text{g kg}^{-1}$ 。其中,某个变量在模式格点  $(k, j, i)$  处的集合发散度:

$$Spread(k, j, i) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [R_m(k, j, i) - \bar{R}(k, j, i)]^2}, \quad (4.2)$$

$M$  表示集合成员总数,  $m$  是用于索引集合成员的编号,  $R$  代表某个变量,而  $\bar{R}$  则表示该变量的集合平均。另外,还需要对模式的侧边界条件进行更新以匹配新的初始扰动集合。

### 4.2.2 同化试验流程

为了考察台风路径和降水预报对雷达资料的敏感性,本章设计了三组同化试验。第一组试验对比了同化多部沿海雷达和同化只能观测到 Morakot 部分环流的单部沿海雷达的影响。具体地说,先将 2009 年 8 月 7 日 00 时的包含 60 个成员的初始扰动集合进行 6 小时预积分,以得到较真实的、具有流依赖特征的背景误差协方差结构;然后,在 8 月 7 日 06 时到 18 时逐小时地循环同化多部雷达和每部雷达的径向风超级观测;最后,用 8 月 7 日 18 时 EnKF 分析场的集合平均来初始化之后的 24 小时确定性预报(图 4.1b)。需要指出,HL 雷达在 8 月 7 日 06 时到 08 时缺测(图 4.5),考虑到同化开始时间的一致性,这组试验只包括 WFS、KT 和 CG 三部雷达的同化。由于同化第一个观测与 Morakot 登陆台湾之间相差 12 个小时且同化窗长度也为 12 个小时,因此这组试验以“L12DA12”为名称后缀,且以 All\_L12DA12, WFS\_L12DA12, KT\_L12DA12 和 CG\_L12DA12 分别表示同化多部雷达的试验以及单独同化 WFS, KT 和 CG 雷达的试验。其中, All\_L12DA12 是本章的控制试验。

第二组试验在保持与第一组试验相同的同化开始时间的基础上,将同化窗缩短了一半,并用 EnKF 分析场的集合平均来初始化之后的 30 小时确定性预报(图 4.1c),从而考察同化窗长度对 Morakot 登陆台湾后预报的影响。与第一组试验类似,这组试验以“L12DA6”为名称后缀,并包括 All\_L12DA6, WFS\_L12DA6, KT\_L12DA6 和 CG\_L12DA6 四个试验。

为了进一步考察同化开始时间和同化窗距离台风登陆时刻远近的影响,第三组试验的首次同化比前两组试验晚了 6 个小时,而同化结束时间保持与第一组相同。具体地说,先将 8 月 7 日 00 时的初始扰动集合进行 12 小时预积分,然后从 8 月 7 日 12 时开始逐小时地循环同化多部雷达和每部雷达的径向风超级观测,再用 8 月 7 日 18 时 EnKF 分析场的集合平均来初始化之后的 24 小时确定性预报(图 4.1d)。考虑到同化窗涵盖了 Morakot 登陆台湾前的 6 个小时,这组试验以“L6DA6”为名称后缀。另外,由于 HL 雷达在 8 月 7 日 12 时到 18 时有连续的观测(图 4.5),因此本组增加了单独同化 HL 雷达的试验,即包括 All\_L6DA6, WFS\_L6DA6, KT\_L6DA6, CG\_L6DA6 和 HL\_L6DA6 五个试验,其中 All\_L6DA6 不同化 HL 雷达的观测。

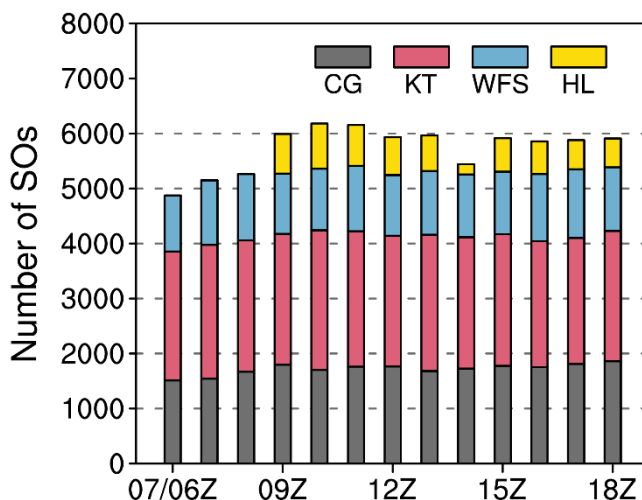


图 4.5 同化窗（2009 年 8 月 7 日 06 时到 18 时）内各雷达的径向风超级观测数量。

### 4.2.3 不同雷达的观测特点

以上三组同化试验中，每部雷达提供的径向风超级观测的个数随时间变化不大（图 4.5）。但是，由于不同位置的雷达受山脉地形等的限制不同，其扫描圆盘完整度也会不同（图 2.3），从而导致不同雷达提供的超级观测个数差别很大。其中，KT 雷达的超级观测最多，平均为 2394 个；CG 雷达次之，平均可提供 1721 个超级观测；而 HL 雷达的超级观测最少，平均仅有 606 个。从 8 月 7 日 06 时到 18 时，多雷达同化试验（All\_\*）中的超级观测总数基本维持在 5000 个左右。

除了超级观测的个数不同之外，每部雷达对台风环流结构的观测角度也不同。为了较准确地描述每部雷达在 Morakot 移近台湾岛的过程中对台风观测的特点，将一部雷达对台风内核的覆盖度做如下定量化考察：首先，将以台风观测位置为中心的  $200\text{km} \times 200\text{km}$  方形区域等分成 1600 个格子，从而使格子大小与超级观测的水平分辨率相当；然后，计算至少包含一个超级观测（任何雷达扫描高度均可）的格子数占总格子数的百分比。在 Morakot 登陆台湾前的 12 小时内，不同雷达的台风内核覆盖情况如图 4.6 所示。总的来说，WFS 雷达对 Morakot 内核的覆盖度最高，且随着台风的靠近而逐渐增大，在台风登陆前的 2-3 小时达到最大（30%）；而 KT 和 CG 雷达均对 Morakot 内核的覆盖度很低，基本小于 10%；HL 雷达的台风内核覆盖度随着其超级观测个数以及相对于台风位置的变化而具有不同的演变特征。



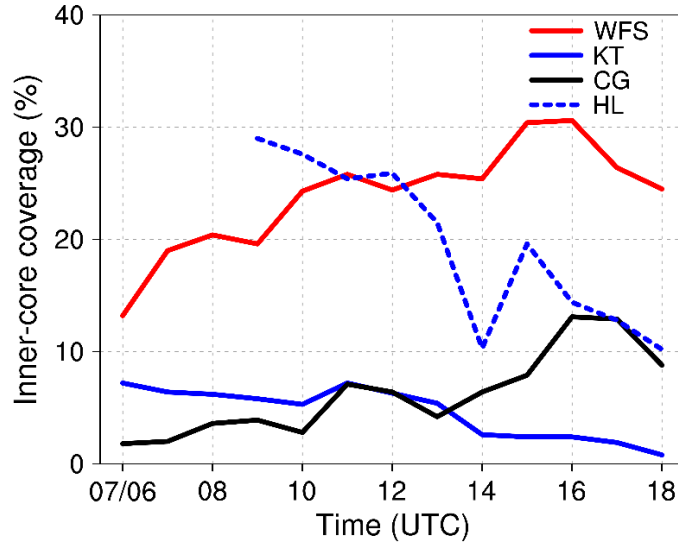


图 4.6 同化窗 (2009 年 8 月 7 日 06 时到 18 时) 内各雷达的径向风超级观测对 Morakot 的内核覆盖度 (%)。

### 4.3 控制试验的同化效果

#### 4.3.1 风场误差

在 Morakot 登陆台湾前的 12 小时内, 同化多部雷达的径向风超级观测可以有效地减小风场误差。本文利用径向风的均方根误差 (RMSE) 来代表风场误差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (V_n - O_n)^2}, \quad (4.3)$$

其中,  $N$  表示所有未缺测的沿海雷达的径向风超级观测检验样本总数 (详见 2.5 节),  $n$  是用于索引超级观测检验样本的编号,  $V_n$  表示将模拟的径向风双线性插值到第  $n$  个检验样本观测  $O_n$  处的结果。需要指出, 检验样本是从每部雷达的未被同化的超级观测中随机选取的相同个数 (以每个同化时刻可以提供的待检验超级观测个数最少的雷达为标准) 的样本总和。这种误差检验方法反映的是同化能否有效地减小台风整体环流背景场的误差, 这对于预报表现将起关键作用。在同化窗内, All\_L12DA12 的背景场和分析场径向风均方根误差如图 4.7a 中黑色虚线所示。作为对比, NoDA 的径向风误差在图 4.7a 中用灰色实线表示。结果表明, 与 NoDA 中风场误差先快速增加而后缓慢下降至与初始时刻基本相同的情况不同, All\_L12DA12 的风场误差在前三次同化中不断降低, 且首次同化时下降最快, 之后虽然因预报误差快速增长以及误差饱和现象导致其与 NoDA 的差距缩小, 但在 Morakot 登陆前的 2 小时内分析风场误差再次明显下降。为了定量地评估同

化雷达观测的贡献, 本文使用以下公式来计算误差的降低率或预报技巧的提高率:

$$I = \frac{X_{NoDA} - X_{DA}}{X_{NoDA}}, \quad (4.4)$$

其中,  $X_{DA}$ 和 $X_{NoDA}$ 分别代表同化试验和不同化试验中的物理量(比如, 径向风均方根误差, 台风路径误差, 降水 TS 评分等)。8月7日18时(同化窗结束时刻), All\_L12DA12的分析场径向风误差相比于NoDA降低了约56%(图4.7a)。

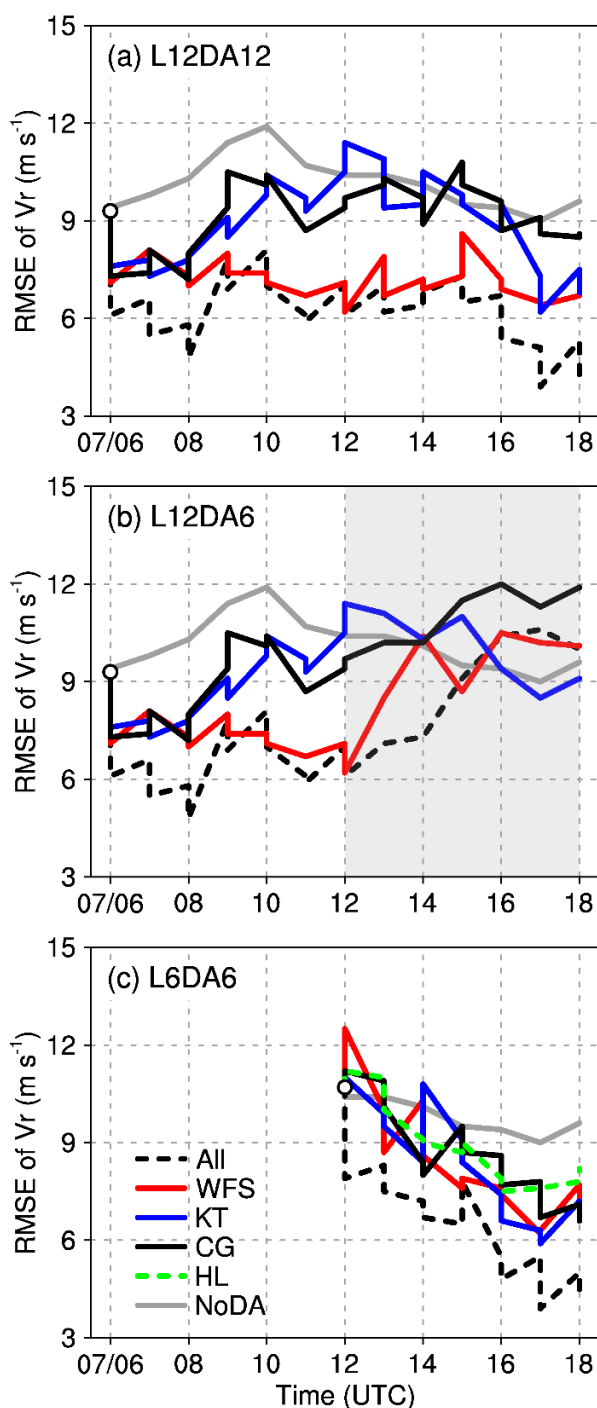


图 4.7 同化窗(2009年8月7日06时到18时)内试验(a) \*\_L12DA12, (b) \*\_L12DA6

和 (c) \*\_L6DA6 的背景场和分析场径向风均方根误差 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) 演变。图例在 (c) 中显示, (b) 中灰色阴影标出了确定性预报的时段。

### 4.3.2 路径预报

得益于初始风场误差的大幅减小, 循环同化多部沿海雷达的径向风观测可以显著提高 Morakot 登陆台湾后的确定性路径预报, All\_L12DA12 的 8 月 7 日 18 时到 8 月 8 日 18 时的平均路径预报误差比 NoDA 下降约 44% (图 4.8b, d)。虽然 All\_L12DA12 中 Morakot 登陆时间、地点比观测偏早、偏西南, 但与 NoDA 中台风登陆后缓慢地向偏北方向移动不同, All\_L12DA12 中台风的移速、移向均与观测比较接近。8 月 8 日 18 时, All\_L12DA12 预报的台风在台湾海峡上的位置误差 (约 46km) 远低于此时 NoDA 预报的台风位置误差 (约 82km)。

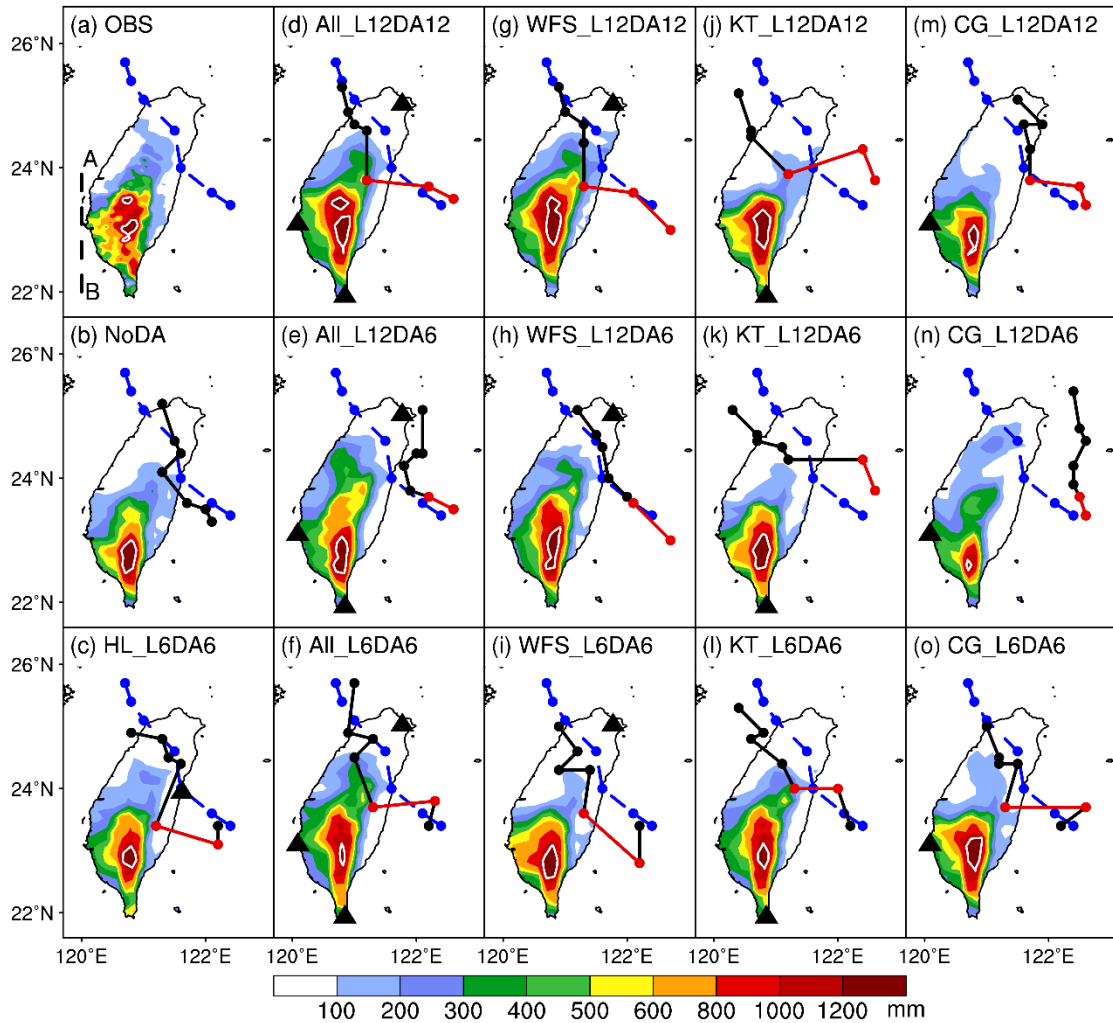


图 4.8 (a) 观测的, (b) NoDA 模拟的, 以及在 L12DA12, L12DA6 和 L6DA6 组循环同化 (c) HL, (d-f) 多部雷达, (g-i) WFS, (j-l) KT 和 (m-o) CG 的径向风观测后预报的 Morakot 登陆台湾后的 24 小时累积降水 (填色; 单位: mm) 分布。图中白色等值线为 1200mm

强降水范围,蓝色虚线和黑色实线分别表示最佳路径和各试验预报的台风路径(时间为2009年8月7日06时到8月8日18时,间隔为6小时,其中红色部分标出了同化窗内分析场的台风位置),黑色三角表示被同化的雷达位置,(a)中的虚线AB为图4.10中计算台湾岛上游纬向水汽通量的截面位置。

### 4.3.3 降水预报

除了路径预报的提高, All\_L12DA12 对 Morakot 登陆台湾后的 24 小时累积降水预报也更加准确。与 NoDA 相比, All\_L12DA12 预报的弱降水和强降水范围均明显向北扩展,降水分布与观测更加接近(图 4.8a, b, d)。虽然 All\_L12DA12 的强降水( $\geq 800\text{mm}$ )范围比观测大,但可以较准确地预报出  $23^\circ\text{N}$  以北的强降水,尤其是其预报的两个  $1200\text{mm}$  以上强降水极值中心的位置基本与观测吻合。All\_L12DA12 的降水 TS 评分在弱降水和强降水阈值上均明显高于 NoDA,且对  $600\text{mm}$  以上的降水预报技巧提高更多(图 4.9)。特别地, All\_L12DA12 对降水阈值为  $600, 800, 1000\text{mm}$  的平均 TS 评分为  $0.55$ , 比 NoDA 提高了近  $2.1$  倍。然而, All\_L12DA12 的降水分布呈现明显的地形降水特征,对中央山脉以西平原上观测到的强降水有明显低估。

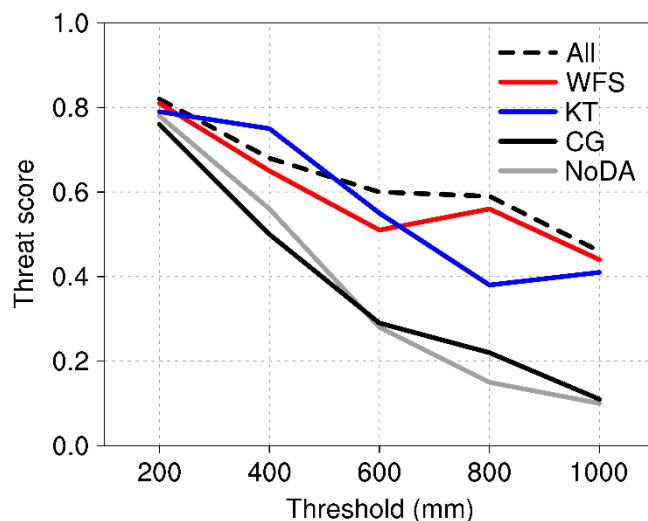


图 4.9 NoDA 和\*\_L12DA12 预报的 Morakot(2009)登陆台湾后的 24 小时累积降水 TS 评分。

All\_L12DA12 对降水预报的提高在很大程度上依赖于更准确的水汽输送位置和强度。由于台湾岛南部南北向的中央山脉的阻挡,当上游纬向风输送的高湿空气与山脉地形相互作用时,有利于在中央山脉主脊及其西侧平原上发生强降水。为了考察水汽输送的影响,先利用以下公式计算垂直积分的纬向水汽输送:

$$Q_u = \frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} qu dp, \quad (4.5)$$

其中,  $p_t$ 和 $p_s$ 分别取为 700hPa 和地面气压,  $q$  表示比湿,  $u$  表示纬向风,  $g$  为重力加速度。然后, 取经过 (120°E, 22°N) 和 (120°E, 24°N) 的截面 (图 4.8a 中虚线 AB) 代表台湾岛南部的上游地区, 并计算 8 月 7 日 18 时到 8 月 8 日 18 时的逐小时通过 AB 截面的整层 (地面至 700hPa) 纬向水汽输送。结果表明, 在 NoDA 中, 较强的上游纬向水汽输送 ( $\geq 1000\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) 出现在 22°N 与 23°N 之间, 并在 Morakot 登陆台湾后的 24 小时内一直维持 (图 4.10a), 这与其预报的下游台湾岛南部的累积强降水纬度位置十分吻合 (图 4.8b), 且对水汽输送起决定性作用的是风场结构而非水汽条件 (图 4.10b,c)。而 All\_L12DA12 和 NoDA 之间的上游纬向水汽输送差异场则表明, 同化雷达径向风可以使确定性预报中的纬向水汽输送增强; 同时, 在 Morakot 登陆台湾后的大部分时间内保持 23°N 以北的水汽输送增量比 23°N 以南的增量 (图 4.11a), 这有利于 All\_L12DA12 预报的台湾岛南部的强降水向北扩展至 23°N 与 24°N 之间 (图 4.8d)。进一步分析表明, 以上水汽输送的变化取决于同化雷达径向风对风场结构的改变 (即持续增强 23°N 以北的纬向风), 而非对水汽条件的改变 (图 4.12a, 4.13a)。

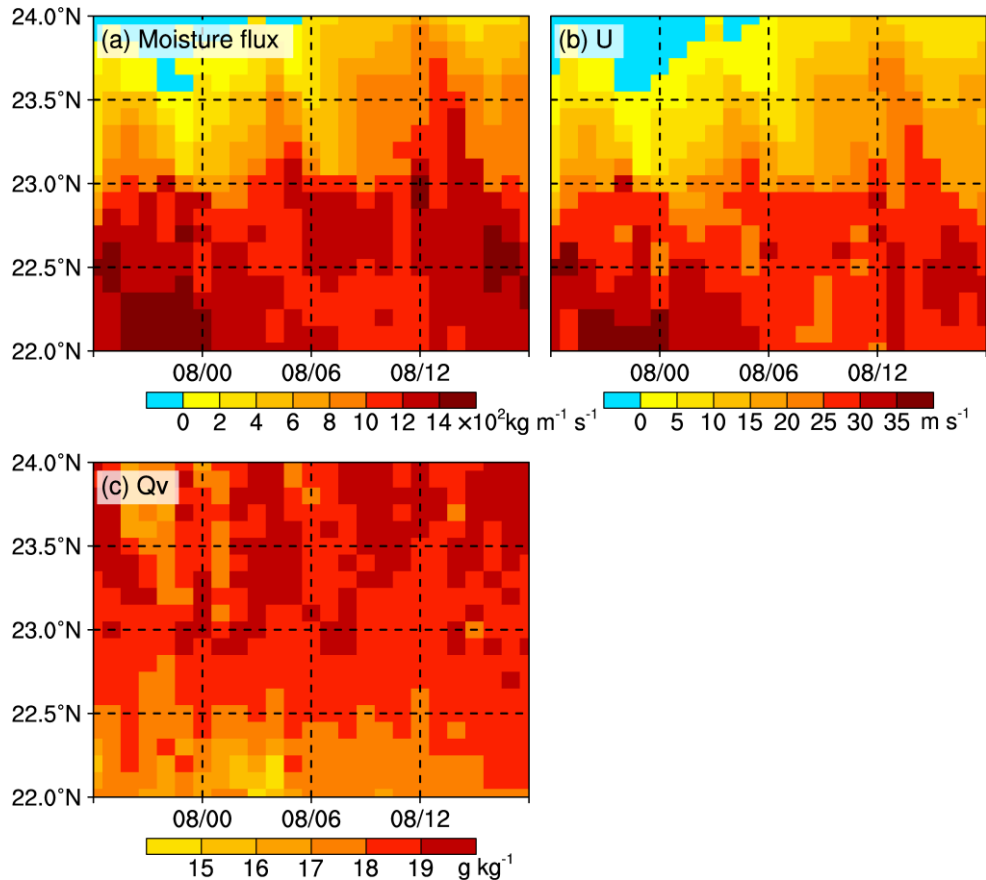


图 4.10 NoDA 预报的经过图 4.8a 中 AB 截面的 (a) 垂直积分 (从地面到 700hPa) 纬向水汽通量 (单位:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ), (b) 850hPa 纬向风 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) 和 (c) 850hPa 比湿 (单位:  $\text{g kg}^{-1}$ )

$\text{kg}^{-1}$ ) 的演变 (时间为 2009 年 8 月 7 日 18 时到 8 月 8 日 18 时)。

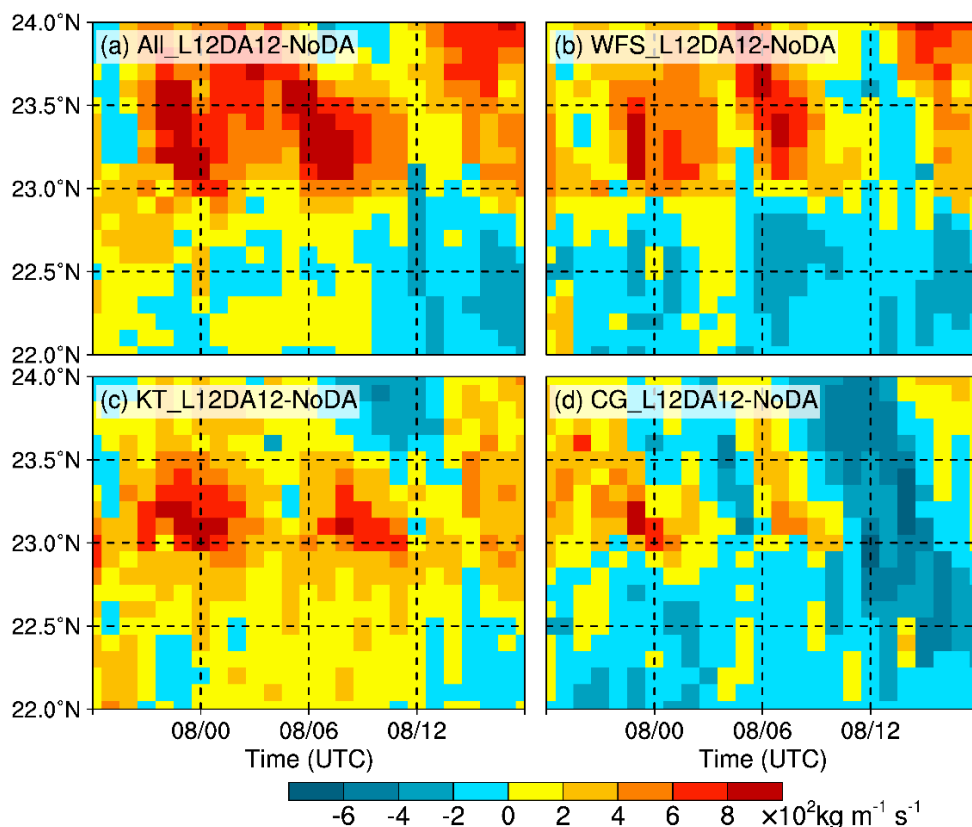


图 4.11 (a) All\_L12DA12, (b) WFS\_L12DA12, (c) KT\_L12DA12, (d) CG\_L12DA12 分别与 NoDA 之间的经过图 4.8a 中 AB 截面的垂直积分 (从地面到 700hPa) 纬向水汽通量差异 (单位:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) 的演变 (时间为 2009 年 8 月 7 日 18 时到 8 月 8 日 18 时)。

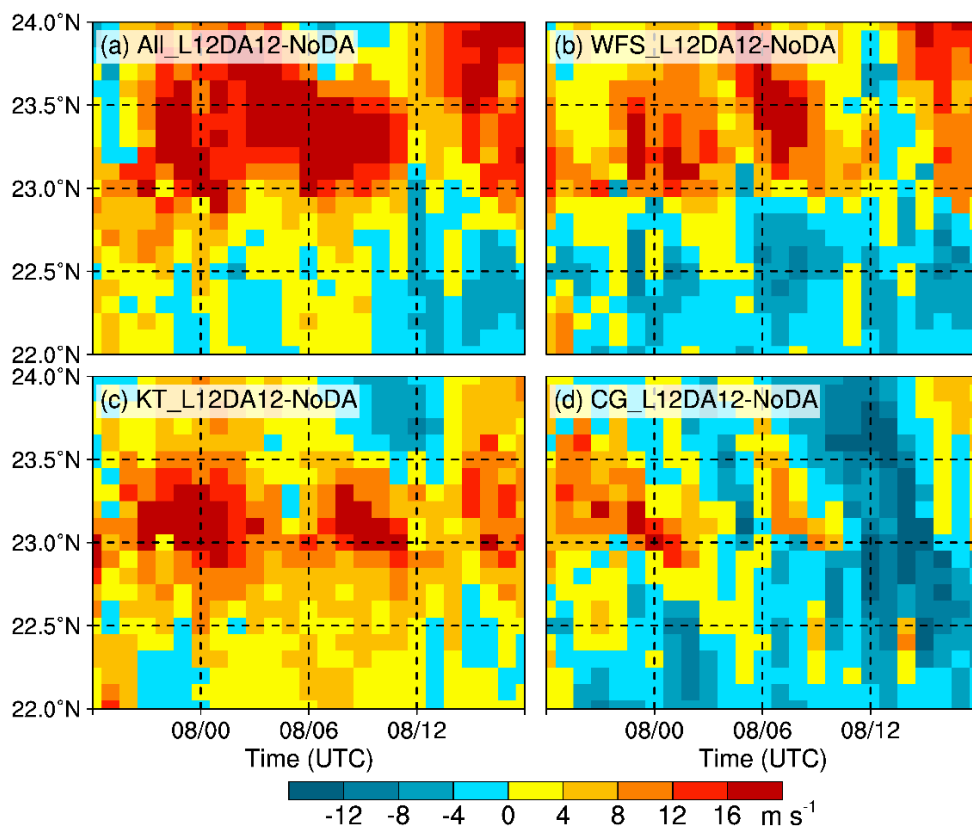


图 4.12 与 4.11 相同，但为经过图 4.8a 中 AB 截面的 850hPa 纬向风差异（单位： $\text{m s}^{-1}$ ）的演变。

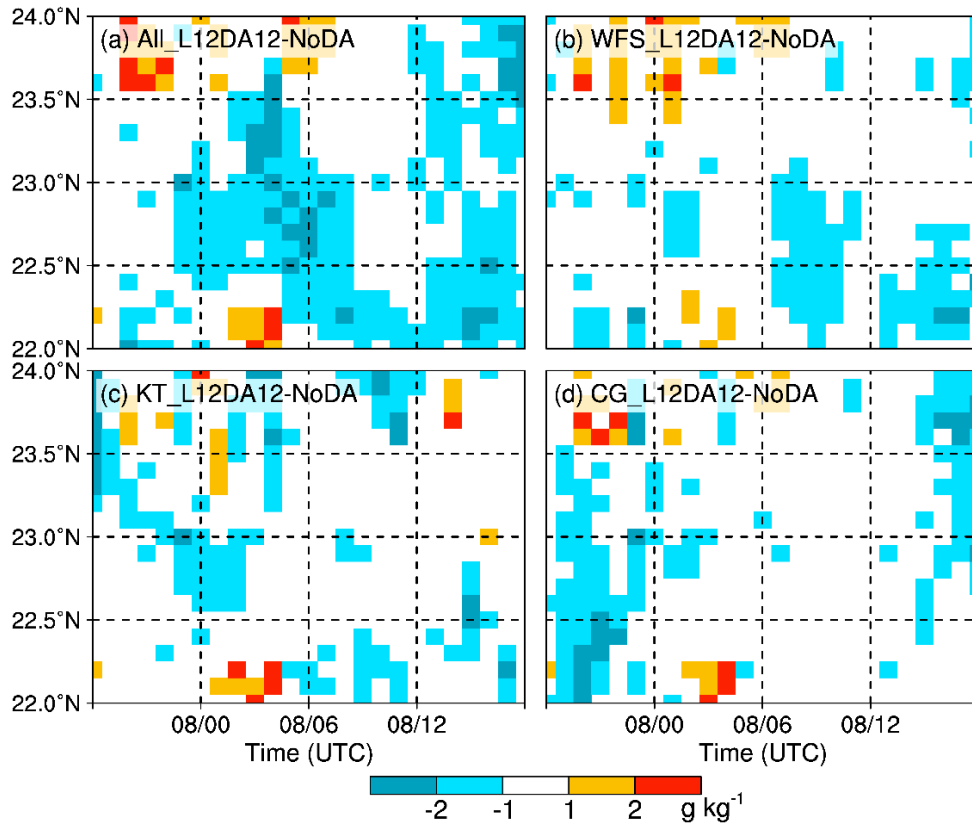


图 4.13 与 4.11 相同，但为经过图 4.8a 中 AB 截面的 850hPa 比湿差异（单位： $\text{g kg}^{-1}$ ）的演变。

#### 4.3.4 中尺度结构预报

All\_L12DA12 对台湾岛南部上游地区的准静止强对流带的预报也有显著提高。Morakot 登陆台湾后，有一条东西向的强对流带从台湾海峡延伸至台湾岛西南部，并在 8 月 8 日 00 时到 15 时准静止地维持在  $23^{\circ}\text{N}$  附近（详见 3.3 节），与下游台湾岛南部的累积强降水的观测纬度比较吻合。目前已有观测分析方面的研究表明，Morakot 在台湾岛南部造成的极端强降水与这条准静止强对流带有密切关系（Chien 和 Kuo, 2011; Yu 和 Cheng, 2013）。因此，考察雷达资料同化对这条强对流带预报的影响具有重要意义。结果表明，NoDA 模拟的大于 40dBZ 的雷达回波比观测明显偏南或呈现零散分布（图 4.14a-d, m-p）。而 All\_L12DA12 虽然对准静止强对流带的强度预报比观测偏强，但可以再现观测中强对流带的形态和位置的演变特征（图 4.14e-h）。

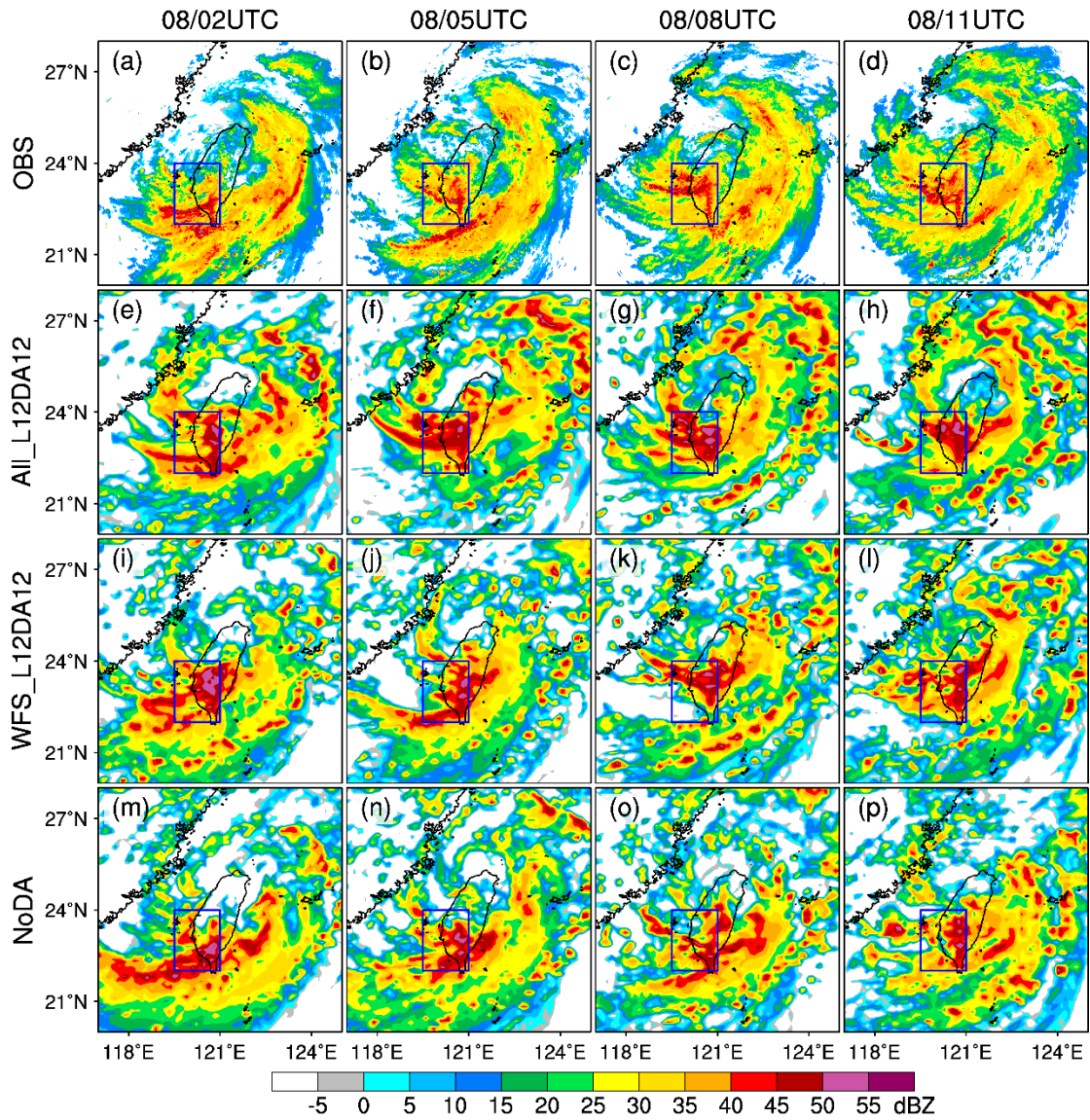


图 4.14 (a-d) 观测的和 (e-h) All\_L12DA12, (i-l) WFS\_L12DA12, (m-p) NoDA 预报的雷达组合反射率(单位: dBZ)的演变, 时间从左到右依次为 2009 年 8 月 8 日 02 时, 05 时, 08 时和 11 时。每张小图的蓝色方框用于定位台湾西南沿海的准静止强对流带。

All\_L12DA12 对准静止强对流带预报的提高与低层风场辐合线的模拟有密切关系。Yu 和 Cheng (2014) 通过观测分析发现, 在 Morakot 登陆台湾和进入台湾海峡期间, 台风低层环流与活跃在南海上的西南季风气流相互作用, 并在准静止强对流带的观测位置附近发生辐合。通过分析与图 4.14 对应的 850hPa 模拟风场发现, 在 NoDA 中, 由于前期台风环流的偏北分量在台湾海峡上抵达的最南纬度位置偏南 (22°N 附近), 导致其与低纬西南气流之间的辐合发生在较低纬度 (图 4.15i, j); 而后期由于台风缓慢地向北移动, 台湾海峡上的台风环流偏北分量减弱并向北收缩, 使其不再与低纬西南气流发生辐合, 而只在有风速变化的



台风环流中发生零星散乱的辐合 (图 4.15k, l)。然而, All\_L12DA12 预报的台风路径与观测比较接近, 且模拟的低纬西南气流比 NoDA 偏强、偏北, 从而有利于台风环流偏北分量与西南气流在台湾海峡上发生辐合 (图 4.15a-d)。由于 All\_L12DA12 的辐合较强、呈准东西向线状, 并维持在 23°N 附近, 与预报的准静止强对流带的形态和位置十分吻合, 因此低层风场辐合线对产生和维持这条强对流带有重要作用。

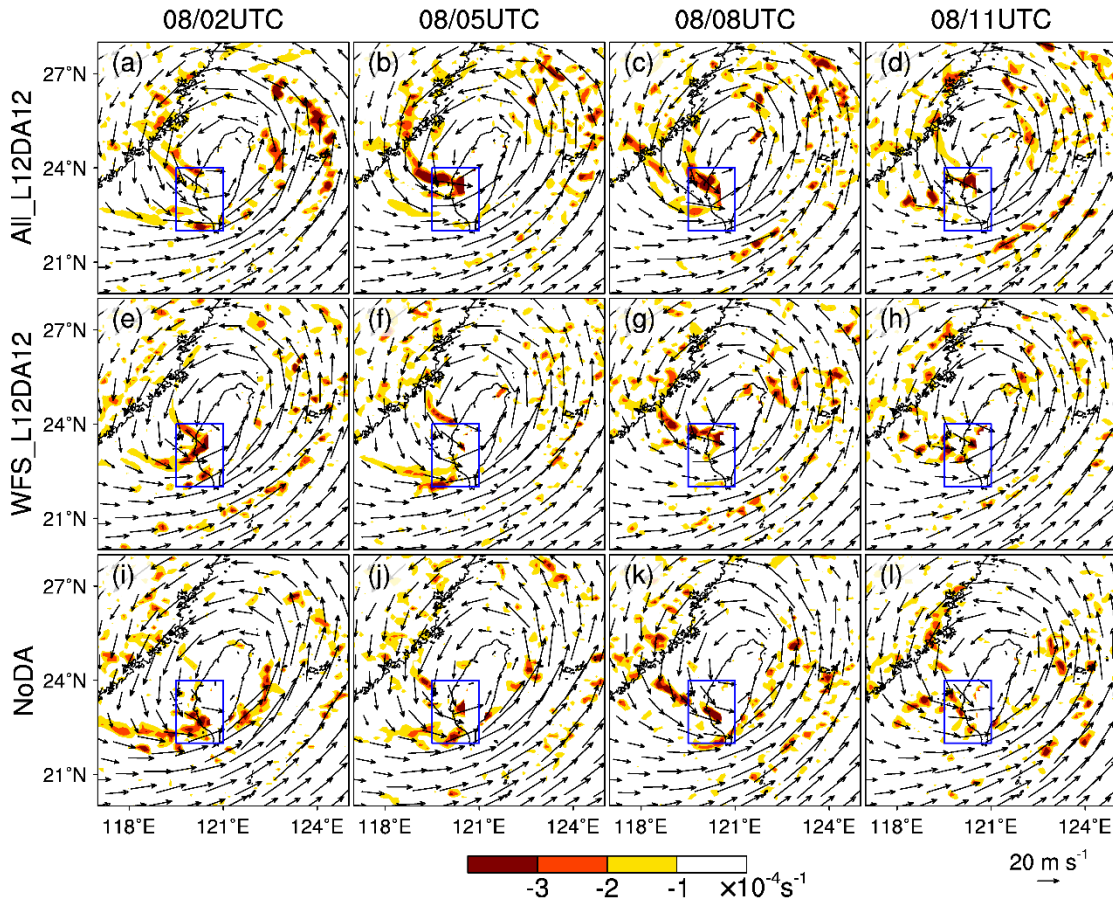


图 4.15 (a-d) All\_L12DA12, (e-h) WFS\_L12DA12 和 (i-l) NoDA 预报的 850hPa 风场 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ , 参考矢量标在图的右下角) 及其散度 (填色; 单位:  $\text{s}^{-1}$ ), 时间从左到右依次为 2009 年 8 月 8 日 02 时, 05 时, 08 时和 11 时。每张小图的蓝色方框与图 4.14 中的蓝色方框相同。

在观测和 All\_L12DA12 中, 台湾海峡上的准静止强对流带均对下游台湾岛南部的强降水有指示作用, 下面以 All\_L12DA12 在 8 月 8 日 08 时的模拟强对流带 (图 4.14g) 为例进一步研究二者的关系。图 4.16a-e 为东西向的强对流带自南向北的雷达回波和风矢量 ( $u, w$ ) 的垂直剖面结构, 其中 119°E-120°E 表示强对流带在台湾海峡上的部分, 而 120°E-121°E 为强对流带延伸至台湾岛上的部分。结果表明, 此时这条强对流带在 23.3°N 附近发展最强烈, 其大于 40dBZ 的雷达

回波在东西方向上范围最大，并在台湾岛上出现最强上升运动。同时，在 23.3°N 附近有深厚的高湿空气从台湾海峡输送到台湾岛（图 4.16i），从而为强降水的发生提供了充足的水汽供应；而 23.3°N 两侧的纬向水汽输送的强度和厚度逐渐减小，不利于对流的发展和维持（图 4.16f-h, j）。需要注意的是，虽然在 23.1°N 附近的纬向水汽输送与 23.3°N 相似，但二者的对流强度却有很大差别，这可能与低层上升运动的差异有关。在 23.3°N 附近，从台湾海峡延伸至台湾岛南部有明显的低层上升运动，促进对流向上发展；上升的气块受到水汽凝结释放的潜热加热而继续加速上升，从而有利于强降水的发生。虽然台湾岛的中央山脉地形对低层气流抬升起到一定作用，但在 120°E 附近（台湾岛上游）的低层上升运动很可能是由风场辐合造成的。而对水汽通量辐合和风矢量 ( $v, w$ ) 的经向垂直剖面的分析也表明，台湾岛上游较强的低层辐合发生在 23.3°N 附近（图 4.16k-o），这与前面关于台风环流与西南气流辐合而产生强对流带的结论一致。综上分析，台湾海峡上的准静止强对流带为下游台湾岛南部的强降水提供了充足的水汽输送和低层辐合上升运动。

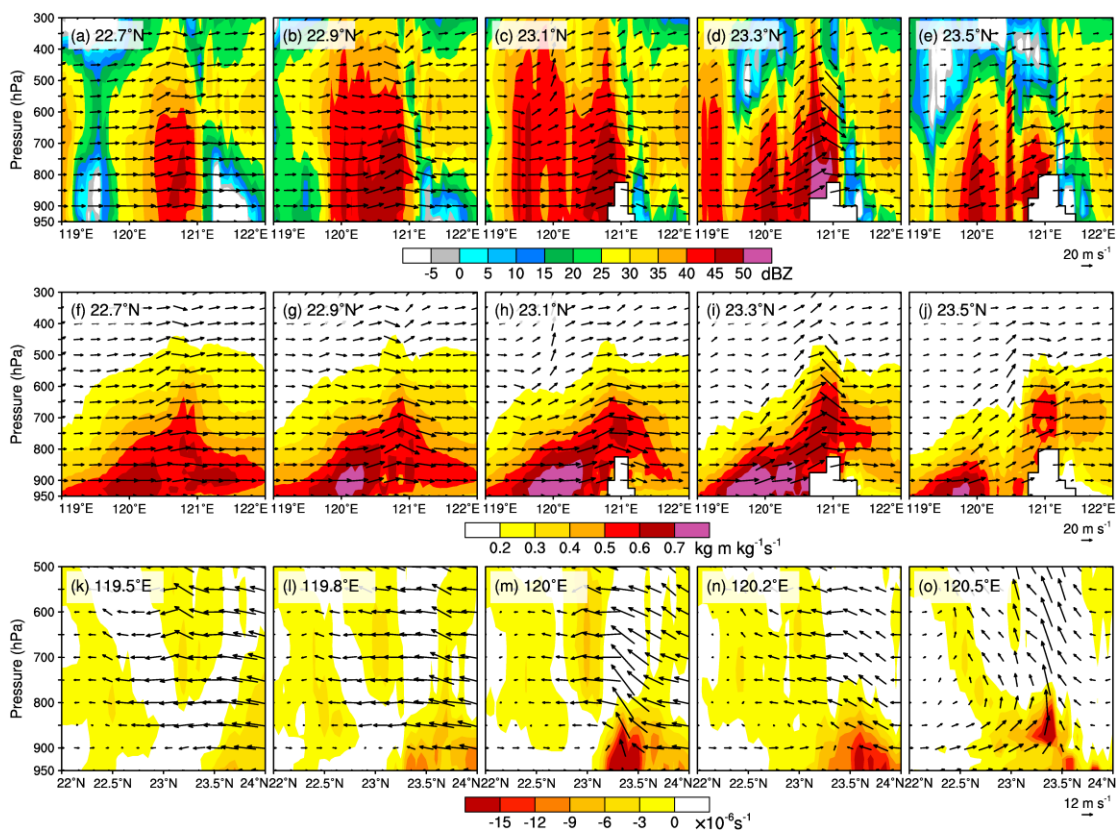


图 4.16 AII\_L12DA12 模拟的 (a-e) 雷达反射率 (填色; 单位: dBZ) 和风场沿着 22.7°N-23.5°N 的纬向垂直剖面, 时间为 2009 年 8 月 8 日 08 时; (f-j) 与 (a-e) 相同, 但为纬向水汽通量 (填色; 单位:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) 的垂直剖面; 以及 (k-o) 水汽通量辐合 (填色; 单位:  $\text{s}^{-1}$ )

和风场沿着 119.5°E–120.5°E 的经向垂直剖面。图中的垂直速度均扩大了 10 倍，参考矢量标在每行的右下角。

#### 4.4 同化效果对雷达资料的敏感性

为了考察不同位置的沿海雷达对台风不同区域环流结构的观测对同化效果的影响，还进行了与 All\_L12DA12 流程相同的单雷达同化试验：WFS\_L12DA12，KT\_L12DA12 和 CG\_L12DA12（详见 4.2.2 节）。

##### 4.4.1 风场误差

与 All\_L12DA12 不同，单雷达同化试验的风场误差只在首次同化时有效地减小，之后即出现误差饱和（图 4.7a）。其中，KT\_L12DA12 和 CG\_L12DA12 的风场误差在 2 个小时后的循环同化中逐渐增大至与 NoDA 的风场误差相当。在最后 1 小时同化窗内，KT\_L12DA12 的风场误差明显减小，而 CG\_L12DA12 的风场误差基本维持不变，从而导致它们在同化窗结束时刻的分析风场误差分别比首次同化分析风场误差减小 11% 和增大 18%，且分别比 NoDA 此时的风场误差减小 29% 和 10%。而 WFS\_L12DA12 的风场误差从第二次同化开始基本维持不变，且同化 3 个小时后的风场误差与 All\_L12DA12 相当，明显低于其他两个单雷达同化试验。但是，在最后 3 小时同化窗内，WFS\_L12DA12 的风场误差先增大而后缓慢下降，导致其同化窗结束时刻的分析风场误差仅比首次同化分析风场误差减小 6%，且比 NoDA 此时的风场误差减小 30%。总的来说，同化单雷达观测资料对台风整体环流模拟误差的降低不如同化多雷达观测资料明显。

##### 4.4.2 路径预报

得益于循环同化使初始场的风场误差减小，三个单雷达同化试验的确定性台风路径预报均比 NoDA 有提高。其中，WFS\_L12DA12 在同化窗内的台风分析路径比 KT\_L12DA12 更接近观测，从而使二者在初始风场误差和初始台风位置误差几乎相同的情况下，WFS\_L12DA12 预报的台风路径与观测更接近（图 4.8g, j）。WFS\_L12DA12 预报的台风登陆后 24 小时平均路径误差比 NoDA 减小 41%，与 All\_L12DA12 很接近，且远低于其他两个单雷达同化试验（图 4.17a）。而由于 CG\_L12DA12 的初始风场误差最大，导致其预报的台风移速明显比观测偏慢（图 4.8m），且登陆后的 24 小时平均路径预报误差最大（仅比 NoDA 减小 5%，图 4.17a）。

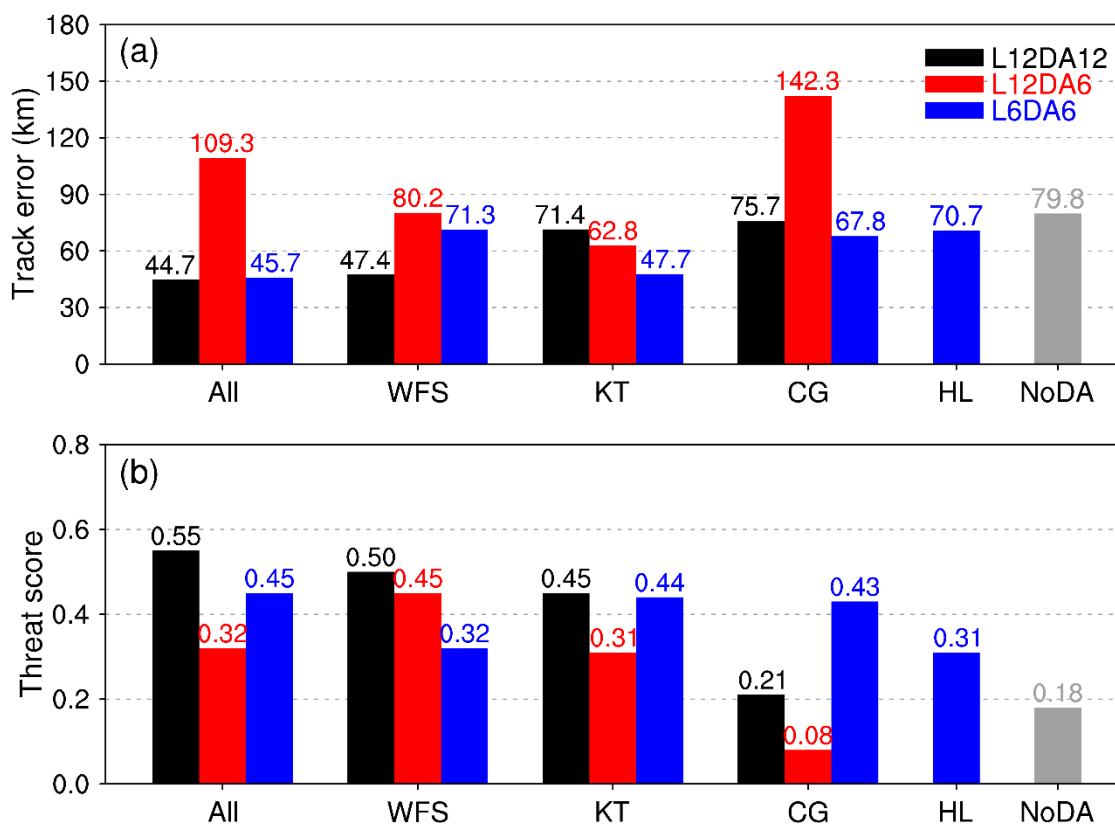


图 4.17 NoDA、多雷达和单雷达同化试验预报的 Morakot (2009) 登陆台湾后的 (a) 24 小时平均路径误差 (单位: km) 和 (b) 24 小时累积降水在 600, 800, 1000mm 的平均 TS 评分, 时间为 2009 年 8 月 7 日 18 时到 8 月 8 日 18 时, 图例在 (a) 中显示。

除了初始场的台风整体环流误差, 首次同化的风场增量结构和台风中心位置改变方向也可能对台风路径预报有很大影响。结果表明, 首次同化单雷达的径向风超级观测后的台风中心相对于同化前有远离被同化雷达的特点。虽然首次同化 WFS 雷达的观测使台风中心位置改变最大, 但由于其对台风内核的覆盖度最高, 导致台风中心附近的风场增量比较对称 (图 4.18b)。而同化台风内核覆盖度较低的 KT 和 CG 雷达的观测会在被同化的雷达附近产生局地较强的风场增量, 呈现不对称结构 (图 4.18b, c)。另外, KT\_L12DA12 的台风中心位置的改变方向与观测的台风移动方向几乎垂直, 导致其在整个同化窗内的台风分析路径与观测路径有很大偏差 (图 4.8j)。虽然 All\_L12DA12 的首次同化也在 KT 和 CG 雷达附近产生较强的风场增量, 但其在台风中心附近的风场增量呈现较对称的气旋性结构 (图 4.18a)。

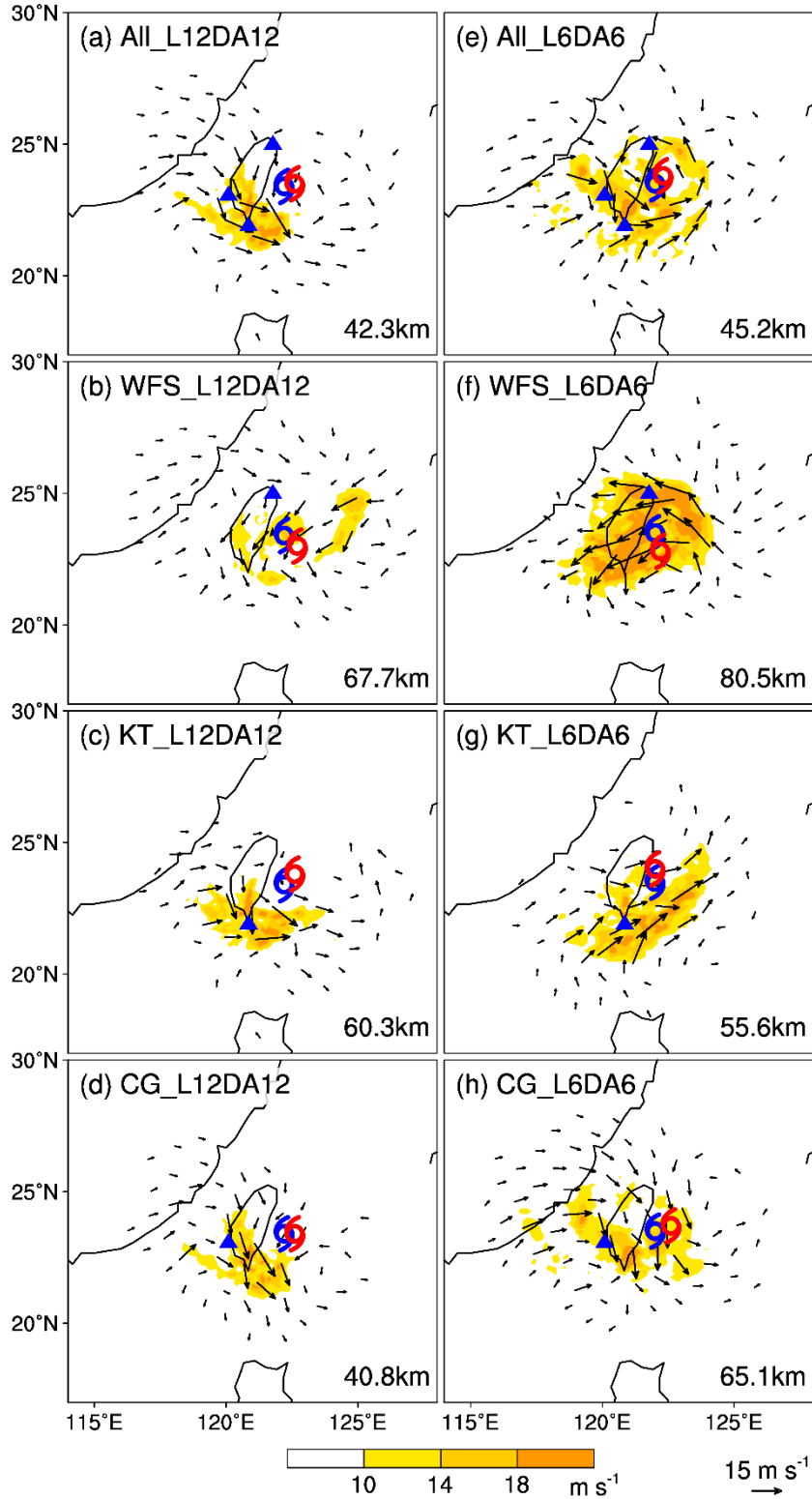


图 4.18 (a) All\_L12DA12, (b) WFS\_L12DA12, (c) KT\_L12DA12 和 (d) CG\_L12DA12 的首次同化中 700hPa 风场增量大小 (填色; 单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) 和大于  $3\text{m s}^{-1}$  的风场增量矢量 (参考矢量在图右下角)。图中蓝色三角表示被同化雷达的位置, 蓝色和红色台风标志分别代表首次同化前和同化后的台风中心位置, 二者之间的距离标注在每张小图的右下角。(e-h) 与 (a-d) 相同, 但为\*\_L6DA6 的结果。

### 4.4.3 降水预报

得益于路径预报的提高, 单雷达同化试验对 Morakot 登陆台湾后的 24 小时累积降水预报更加准确, 但比 All\_L12DA12 的预报技巧低。与 NoDA 相比, 同化每部雷达的径向风观测均能使预报的 800mm 以上强降水范围向北扩展。其中, WFS\_L12DA12 向北扩展最多, 且降水分布与观测和 All\_L12DA12 很接近 (图 4.8g, j, m)。相应地, WFS\_L12DA12 对降水阈值为 600, 800, 1000mm 的平均 TS 评分最高 (图 4.17b), 比 NoDA 提高了近 1.8 倍。而 CG\_L12DA12 预报的强降水范围最小, 导致其预报技巧最低 (图 4.9)。

同化不同雷达的观测对降水预报造成的差别在很大程度上依赖于对水汽输送位置和强度预报的差异。与 4.3.3 节类似, 对每个单雷达同化试验和 NoDA 之间的台湾岛上游纬向水汽输送差异场的分析表明, WFS\_L12DA12 的纬向水汽输送演变特征与 All\_L12DA12 相似, 也在 Morakot 登陆台湾后的大部分时间内保持 23°N 以北的水汽输送增量比 23°N 以南的增量, 这有利于预报的台湾岛南部的强降水向北扩展至 23°N 与 24°N 之间 (图 4.11b)。而 KT\_L12DA12 预报的 23°N 以南持续较强的纬向水汽输送, 以及 CG\_L12DA12 预报的 23°N 以北先增强后减弱的纬向水汽输送, 均导致台湾岛南部的强降水落区偏差较大, 从而使预报技巧偏低 (图 4.11c, d)。

### 4.4.4 中尺度结构预报

同化单雷达的径向风观测也可以提高从台湾海峡延伸至台湾岛西南部的准静止强对流带的预报。以单雷达同化试验中对 Morakot 路径和降水预报最好的 WFS\_L12DA12 为例, 其可以较准确地预报出准静止强对流带的位置和形态 (图 4.14i-1)。与 All\_L12DA12 类似, WFS\_L12DA12 对准静止强对流带预报的提高也与其对低层风场辐合线的预报准确度的提高有密切关系 (图 4.15e-h)。比如, WFS\_L12DA12 预报的 8 月 8 日 08 时 850hPa 风场在 23.5°N 附近的台湾海峡上有东西向辐合区域, 与此时预报的强对流带位置和形状十分吻合。

## 4.5 同化窗对同化效果的影响

除了 4.3 节和 4.4 节中讨论的关于被同化雷达的个数对 Morakot 路径和降水预报的影响、同化哪部雷达对预报的贡献最大等问题, 本节将要研究的从何时开

始同化雷达观测以及同化需要持续多长时间才能得到最佳预报、雷达资料敏感性的影响是否依赖于同化窗等也是亟待回答的问题。下面将针对 4.2.2 节中介绍的第二、三组同化试验分析同化窗对 Morakot 路径和降水预报的影响。

#### 4.5.1 同化窗对多雷达同化效果的影响

缩短同化窗长度会使风场误差在台风接近登陆的过程中快速增长,导致台风路径和降水预报变差。与 All\_L12DA12 的风场误差在 Morakot 登陆台湾前的 6 小时内因循环同化而先维持后降低的情况不同, All\_L12DA6 预报的风场误差在台风登陆前的 6 小时内增长了 64% (图 4.7b)。8 月 7 日 18 时, All\_L12DA6 预报的风场误差高达 All\_L12DA12 的分析风场误差的 2.4 倍。由于 Morakot 登陆前的风场误差增长未能被有效地抑制,导致 All\_L12DA6 预报的台风路径严重偏离观测路径,甚至并未登陆台湾 (图 4.8e)。对比 All\_L12DA6 和 All\_L12DA12 在 8 月 7 日 18 时到 8 日 18 时的预报可以发现,前者的 24 小时平均路径预报误差比后者增大了 1.4 倍,而前者预报的 24 小时累积降水在 600, 800, 1000mm 的平均 TS 评分比前者降低了 42% (图 4.17)。综上所述,延长同化窗至台风登陆时刻有利于提高台风的路径和降水预报。

同化台风登陆前数小时内的雷达观测的重要性也在 All\_L6DA6 中得以证实。虽然 All\_L6DA6 由于同化开始时刻比 All\_L12DA6 晚 6 个小时而使背景风场误差更大,但其风场误差随着循环同化次数的增加而逐渐减小,这恰与 All\_L12DA6 在同时段内的风场误差变化趋势相反 (图 4.7b, c)。8 月 7 日 18 时, All\_L6DA6 的分析风场误差比 All\_L12DA6 预报的风场误差减小 59%,几乎与 All\_L12DA12 相同。相应地, All\_L6DA6 的台风路径和降水预报也比 All\_L12DA6 更加准确 (图 4.8f)。All\_L6DA6 在 8 月 7 日 18 时-8 月 8 日 18 时的平均台风路径预报误差分别比 All\_L12DA6 和 NoDA 减小 58% 和 43%,而其预报的 24 小时累积降水的平均 TS 评分分别比 All\_L12DA6 和 NoDA 增大 41% 和 1.5 倍,略差于 All\_L12DA12 的预报表现 (图 4.17)。

#### 4.5.2 同化窗对单雷达同化效果的影响

与多雷达同化试验类似,缩短同化窗长度一般会使单雷达同化试验的风场误差在接近台风登陆的过程中快速增长或保持较大的值,导致台风路径和降水预报

变差。比如, WFS\_L12DA6 和 CG\_L12DA6 的风场误差在确定性预报的前 6 小时内分别增长了 63% 和 23% (图 4.7b), 且二者在 8 月 7 日 18 时的风场误差远大于各自的 L12DA12 试验此时的分析风场误差, 导致它们预报的 8 月 7 日 18 时-8 月 8 日 18 时的平均台风路径误差比各自的 L12DA12 试验大接近一倍 (图 4.17a)。相应地, WFS\_L12DA6 和 CG\_L12DA6 预报的同时段 24 小时累积降水的平均 TS 评分也减小 (图 4.17b), 其中 CG\_L12DA6 因未登陆台湾而完全失去降水预报技巧 (图 4.8n)。而虽然 KT\_L12DA6 的风场误差在确定性预报的前 6 小时内基本维持与 NoDA 相当的较大的值, 但其在这 6 小时内预报的台风位置比 KT\_L12DA12 分析的台风位置更接近观测 (图 4.8k), 导致 KT\_L12DA6 接下来预报的平均台风路径误差比 KT\_L12DA12 稍小。然而, KT\_L12DA6 的降水预报技巧比 KT\_L12DA12 减小 31%, 这表明台风降水除了与台风路径有关, 还与台风的中尺度结构有密切关系。

台风登陆前数小时内的雷达观测对单雷达同化的效果一般有重要贡献。虽然单雷达 L6DA6 试验的首次同化并未减小风场误差, 但循环同化次数的增加仍然可以使风场误差逐渐降低至与各自的 L12DA12 试验相当 (图 4.7c)。KT\_L6DA6 和 CG\_L6DA6 的台风路径和降水预报技巧均明显高于各自的 L12DA6 试验, 甚至高于各自的 L12DA12 试验 (图 4.17)。而单独同化 WFS 雷达观测的预报表现却与单独同化 KT 或 CG 雷达不同, 即 WFS\_L6DA6 的预报总体比 WFS\_L12DA12 和 WFS\_L12DA6 差 (图 4.17)。对比发现, WFS\_L6DA6 的首次同化分析风场误差比背景风场误差增大了 17%, 增幅远高于 KT\_L6DA6 和 CG\_L6DA6。同时, WFS\_L6DA6 的台风分析路径也明显比 KT\_L6DA6 和 CG\_L6DA6 更加偏离观测 (图 4.8i, l, o)。

单雷达的同化效果有较高的资料敏感性, 这很可能与一部雷达对台风内核的覆盖度高低以及同化窗内台风的分析路径与观测路径的偏离程度有密切关系。对比分析发现, 晚 6 个小时开始同化台风内核覆盖度较高的 WFS 雷达观测会使台风中心附近及观测台风移动方向的前方出现更强的风场增量 (图 4.18f), 这是由于此时 WFS 雷达的径向风观测恰好捕捉到的是台风中心附近较强的切向风 (图 3.6e), 从而导致 WFS\_L6DA6 首次同化后的风场误差和台风中心相对于同化前的位移量比 WFS\_L12DA12 大, 且同化窗内的台风分析路径始终与观测路径保



持更大的偏离量 (图 4.8i)。而 KT 和 CG 雷达的台风内核覆盖度较低, 改变同化开始时间一般不会显著影响风场增量的强度, 但会根据不同时刻的观测台风外围环流的分布来调整风场增量的分布及台风中心的位移矢量 (图 4.18g, h)。其中, KT\_L6DA6 首次同化后的台风中心移动方向比 KT\_L12DA12 更靠近观测台风移动方向, 从而避免出现 KT\_L12DA12 中同化窗内的台风分析路径严重偏离观测路径的情况, 有利于提高台风路径预报。另外, 更早地开始同化台风内核覆盖度较低的单雷达观测容易引起风场误差饱和而使预报初始场的风场误差更大, 导致即使首次同化后的台风中心位移较小且同化窗内的台风分析路径比较接近观测路径, 仍然无法准确预报台风路径, 这种情况在 CG 雷达的同化效果中有所体现。

在台风接近登陆的过程中, 更晚开始同化台风内核覆盖度较高的单雷达观测不利于提高台风预报准确度, 这个结论在更多的敏感性试验中得到了证实。与 WFS\_L6DA6 类似, 由于 HL 雷达的台风内核覆盖度较高且在 8 月 7 日 12 时的径向风观测恰好捕捉到台风中心附近较强的切向风 (图 3.6b), 因而 HL\_L6DA6 的首次同化风场增量在台风中心附近及观测台风移动方向的前方很强, 导致同化后的台风中心相对于同化前的位移矢量几乎垂直于观测台风移动方向 (图 4.19e), 且同化窗内的台风分析路径始终严重偏离观测路径 (图 4.8c), 从而使预报技巧变低 (图 4.17)。另外, 为了检验 WFS\_L6DA6 和 HL\_L6DA6 的首次同化中较强的风场增量是否真实, 本节对这两部雷达的 L6DA6 试验分别补充了三个减小影响半径的敏感性试验。结果表明, 当最外重区域的影响半径从目前的 1215km 减小到 810km 时, WFS 和 HL 雷达的首次同化风场增量强度和分布几乎不变 (图 4.19b, f); 而继续减小最外重区域的影响半径至 405km 时, 虽然较强的风场增量范围有所减小, 但其分布区域及台风中心的位移趋势仍然不变 (图 4.19c, g)。这两组敏感性试验的台风路径预报均比 1215km 影响半径的试验差, 且降水预报也未有一致性的提高 (图 4.20)。当最外重区域的影响半径减小到目前的 1/10 时, WFS 和 HL 雷达的首次同化中较强的风场增量消失 (图 4.19d, h), 但二者也基本丧失了台风路径和降水预报技巧 (图 4.20)。综上分析, 在台风即将登陆时同化对台风内核覆盖度较高的单雷达观测的确会产生不合理的较强的风场增量, 从而导致预报技巧降低。

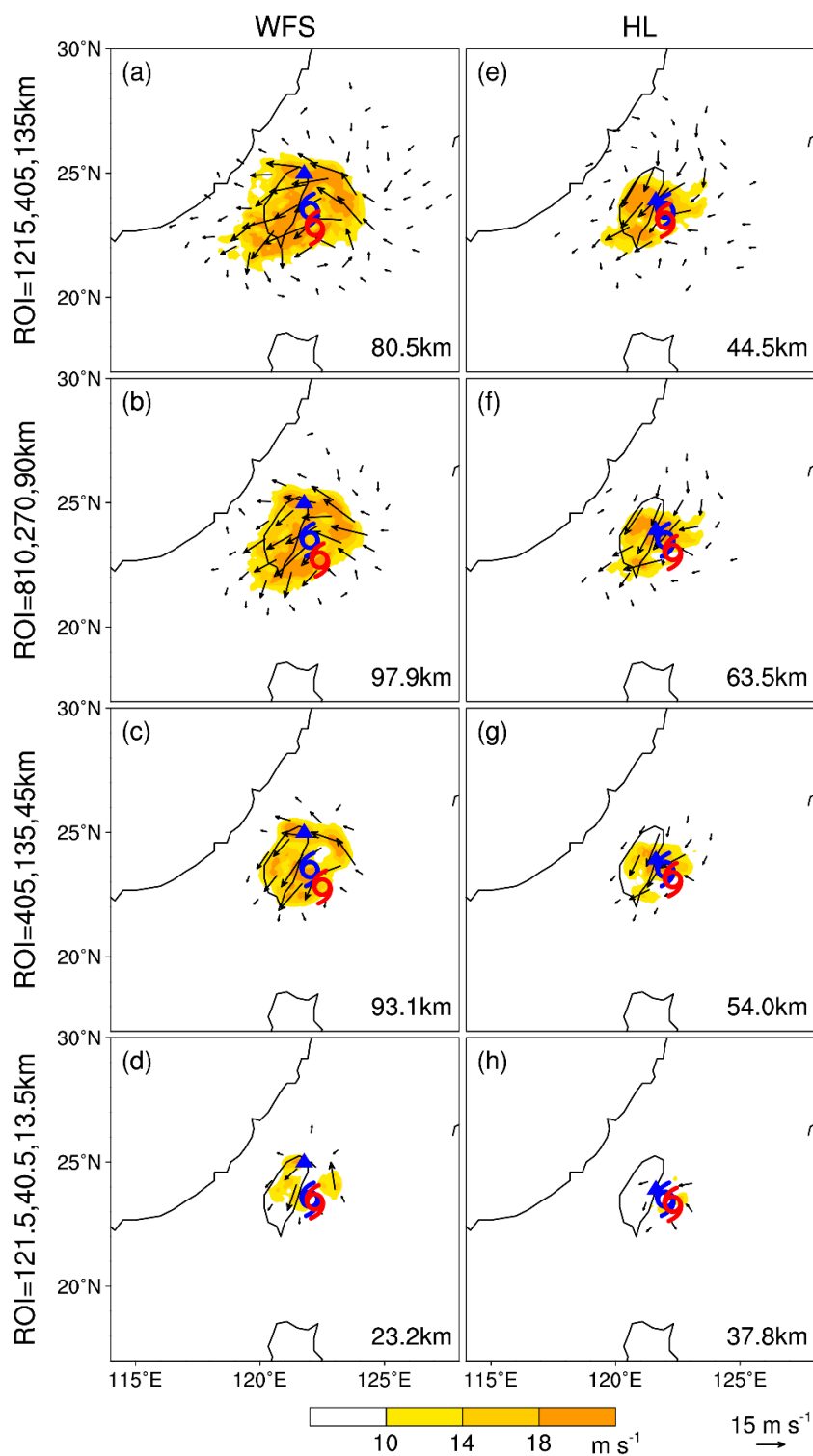


图 4.19 使用不同影响半径的 (a-d) WFS\_L6DA6 和 (e-h) HL\_L6DA6 的首次同化中 700hPa 风场增量大小 (填色; 单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) 和大于  $3 \text{ m s}^{-1}$  的风场增量矢量 (参考矢量在图右下角)。试验的最外重区域的影响半径从上到下依次为 1215, 810, 405 和 121.5km。图中蓝色三角表示被同化雷达的位置, 蓝色和红色台风标志分别代表首次同化前和同化后的台风中心位置, 二者之间的距离标注在每张小图的右下角。

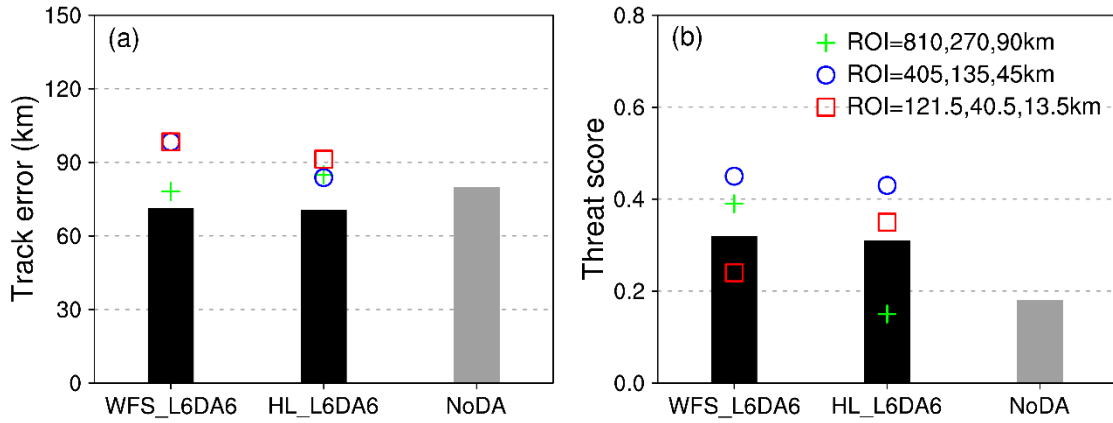


图 4.20 NoDA、使用不同影响半径的 WFS\_L6DA6 和 HL\_L6DA6 预报的 Morakot (2009) 登陆台湾后的 (a) 24 小时平均路径误差 (单位: km) 和 (b) 24 小时累积降水在 600, 800, 1000mm 的平均 TS 评分, 时间为 2009 年 8 月 7 日 18 时到 8 月 8 日 18 时, 图例在 (b) 中显示。

#### 4.6 本章小结

本章利用 WRF-EnKF 同化系统考察了台风 Morakot (2009) 登陆台湾后的路径和降水预报对沿海雷达径向风的敏感性, 得到以下主要结论:

(1) 循环同化台风登陆前 12 小时内的多部雷达的径向风观测可以使初始场的台风整体环流误差比 NoDA 减小约 56%, 从而使台风登陆后的 24 小时平均路径预报误差比 NoDA 减小约 44%, 且登陆后 24 小时累积强降水预报技巧比 NoDA 提高近 2.1 倍。其中, 同化台风登陆前 6 小时内的观测非常重要, 其效果与同化台风登陆前 12 小时内的观测类似, 但明显好于只同化台风登陆前 6-12 小时的观测。

(2) 当台风中心与沿海雷达相距较远时, 同化台风内核覆盖度最高的一部雷达的观测对预报的提高贡献最大, 且很接近多雷达同化的效果。但是, 应该避免在台风即将登陆时开始同化台风内核覆盖度较高的单部雷达的观测, 否则容易在台风中心附近及观测的台风移动方向的前方产生不合理的强风场增量, 使台风中心向远离所同化雷达的方向偏移, 并可能使同化后的台风中心相对于同化前的位移矢量几乎垂直于观测的台风移动方向, 而进一步的同化一般难以对这种较大的初始偏差加以迅速纠正, 从而台风分析路径可能会始终严重偏离观测路径, 导致台风路径和降水预报变差。

(3) 循环同化沿海雷达的径向风观测可以在很大程度上改善 Morakot 登陆后在台湾岛南部上游地区的低层风场辐合线和准静止强对流带的预报, 从而使水汽输送的位置和强度更加准确, 有利于台风降水预报的提高。

## 第五章 Morakot (2009) 登陆大陆后的预报对雷达径向风同化的资料敏感性

本章将继续利用 WRF-EnKF 系统研究同化台湾沿海的雷达径向风观测对台风 Morakot (2009) 二次登陆我国大陆后路径和降水预报的影响, 并通过多雷达和单雷达同化以及不同的单雷达同化之间的对比分析, 考察沿海雷达的资料敏感性的影响, 旨在为揭示海峡两岸气象资料共享对提高我国登陆台风预报的可能贡献提供科学参考。

### 5.1 不同化试验

在考察同化雷达径向风的影响之前, 先进行不同化任何观测的模拟试验。不同化试验 (NoDA) 以 2009 年 8 月 8 日 00 时的 GFS 分析场为初始场, 以 8 月 8 日 00 时到 8 月 10 日 12 时的逐 3 小时 GFS 预报场为边界场, 利用 WRF 模式的 3.6.1 版本对 Morakot 从离开台湾岛进入台湾海峡到登陆福建再向北运动的整个过程进行 60 小时模拟, 其中包含本章着重考察的台风登陆后 24 小时的预报时段 (图 5.1a)。模拟采用双向三重嵌套区域 (图 5.2), 由外到内的水平分辨率依次为 40.5, 13.5 和 4.5km。最外重区域 (D1) 包含  $150 \times 120$  个格点, 覆盖了我国和西北太平洋的大部分地区; 两个内重嵌套区域分别包含  $187 \times 199$  (D2) 和  $226 \times 391$  (D3) 个格点, 且最内重区域覆盖了台湾沿海所有雷达的最大径向风探测范围 (230km 半径) 和 Morakot 登陆我国东南沿海地区的路径。每个模拟区域均采用 35 个垂直层 ( $n$  值见 4.1 节), 模式最顶层为 10hPa。试验在 D1 和 D2 中使用了 Grell-Devenyi 集合积云参数化方案 (Grell 和 Devenyi, 2002), 而其他物理参数化方案均与第四章的不同化试验相同。

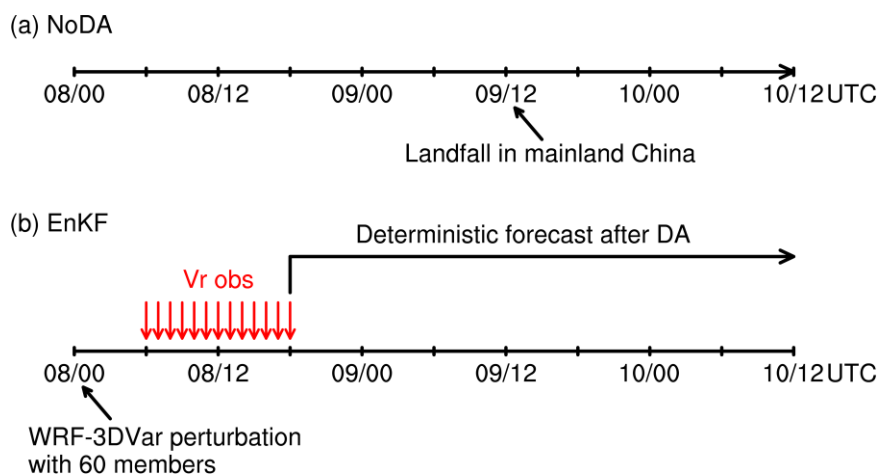


图 5.1 (a) NoDA 和 (b) EnKF 循环同化试验的流程图。

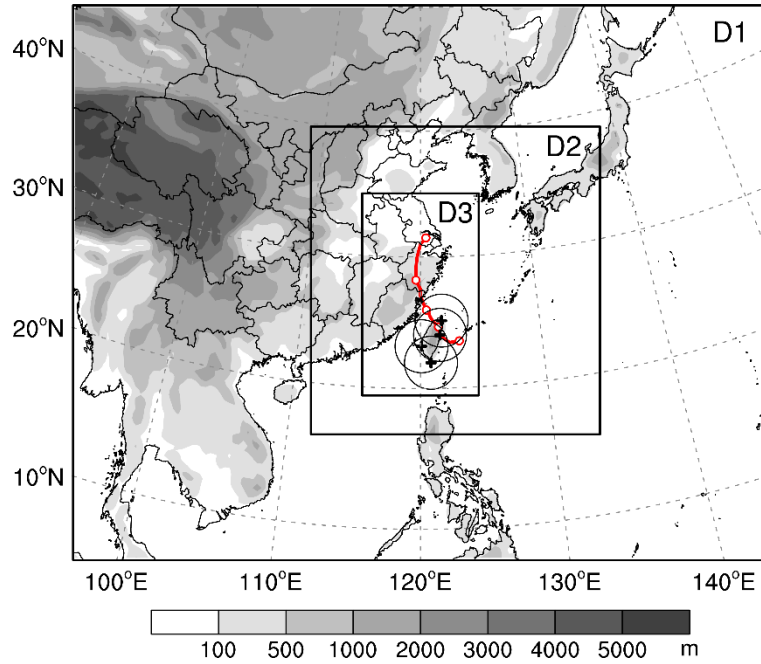


图 5.2 三重嵌套的模拟区域设置。图中红线表示 Morakot 的最佳路径（时间为 2009 年 8 月 7 日 00 时到 8 月 11 日 00 时），其中所有 00 时的台风位置均用白色圆点标出；黑色十字和圆圈分别表示台湾沿海的四部雷达位置和每部雷达的最大径向风探测范围（230km 半径）；灰色阴影表示地形高度（单位：m）。

在 NoDA 中，Morakot 的路径和降水预报误差很大（图 5.3）。考虑到我国东南沿海的地形以山地丘陵为主（大部分地区海拔高度在 500m 以下；图 5.2），本章采用 850hPa 台风环流中心（综合考虑风速低值中心和逆时针风向）作为模拟的台风中心位置，以代替第四章中考虑了台湾岛复杂多山地形的台风中心定位方法。NoDA 模拟的台风在台湾海峡上的路径比观测路径偏南，导致其登陆地点也比观测偏南；登陆后，模拟的台风先向西再向西北方向移动，逐渐偏离观测路径。NoDA 模拟的台风在福建省内移动了约 20 个小时后进入江西东北部，与 8 月 10 日 12 时位于浙江西北部的台风观测位置相距 300km 以上（图 5.4a）。受较差路径预报的影响，NoDA 对 Morakot 登陆我国大陆后的 24 小时累积降水预报有严重低估，尤其是未预报出福建、浙江和江苏等地的 25mm 以上强降水；同时，它还高估了江西的降水范围和强度。为了定量地考察试验的降水预报能力，利用 512 个地面自动观测站的雨量观测（详见 2.2 节）分别在中雨、大雨、暴雨和大暴雨等级上（即降水阈值  $\tau$  取为 10, 25, 50 和 100mm）计算 TS 评分。结果表明，NoDA 的降水预报能力随着降水强度的增大而下降，其对暴雨的 TS 评分仅为 0.16，而对大暴雨则完全没有预报能力（图 5.4b）。

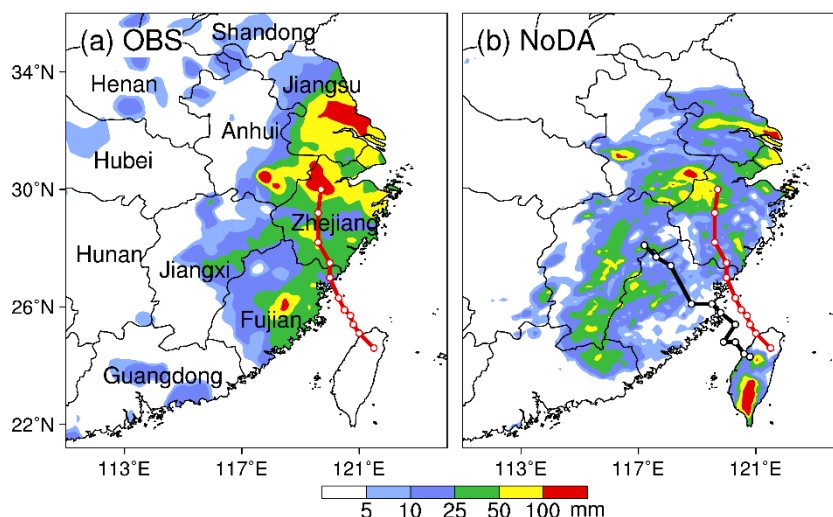


图 5.3 (a) 观测和 (b) NoDA 预报的 Morakot 登陆福建后 24 小时的累积降水 (填色; 单位: mm) 分布。图中红线和黑线分别表示最佳路径和 NoDA 预报的台风路径 (时间为 2009 年 8 月 8 日 00 时到 8 月 10 日 12 时, 间隔为 6 小时)。

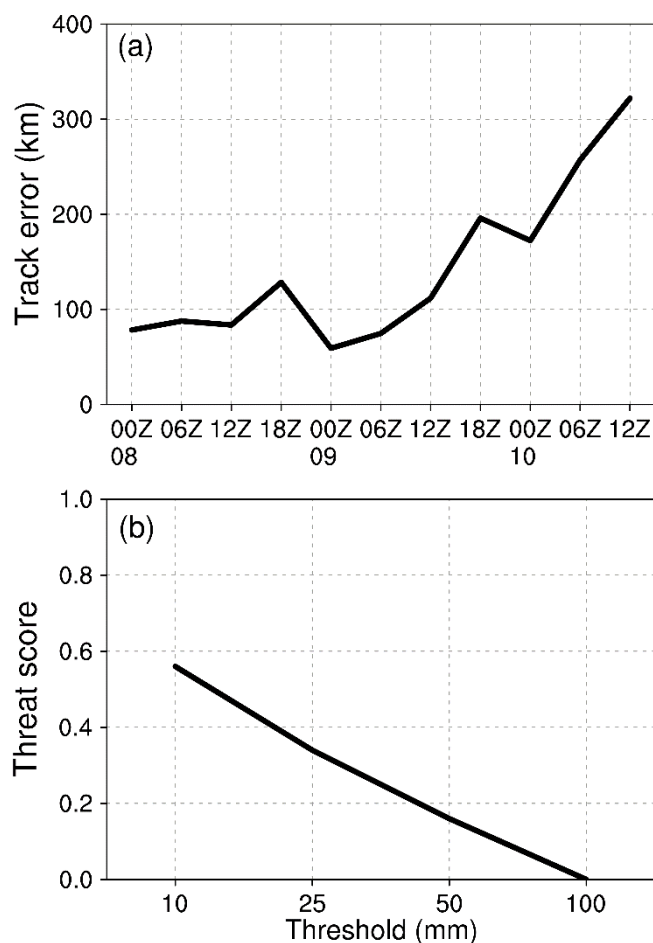


图 5.4 (a) NoDA 的逐 6 小时路径预报误差 (单位: km; 时间为 2009 年 8 月 8 日 00 时到 8 月 10 日 12 时), (b) NoDA 预报的台风登陆福建后 24 小时累积降水的 TS 评分。

## 5.2 同化试验设计

与第四章的试验流程类似, 在保持与 NoDA 的模拟区域、物理参数化方案等相同的情况下, 先利用 WRF 模式的 3DVar 系统对 2009 年 8 月 8 日 00 时的初始场进行随机扰动, 产生 60 个集合成员, 并使对模式预报变量的扰动在模拟区域三维空间内的平均集合发散度满足: 水平风的  $u$  和  $v$  分量约为  $2\text{m s}^{-1}$ , 位温约为  $1\text{K}$ , 扰动气压约为  $100\text{Pa}$ , 水汽混合比约为  $0.5\text{g kg}^{-1}$ 。然后, 将初始扰动集合进行 6 小时的预积分, 以得到较真实的、流依赖的背景误差协方差结构; 再从 8 月 8 日 06 时 (Morakot 刚离开台湾岛的时刻) 到 18 时逐小时地循环同化台湾四部雷达和每部雷达的径向风超级观测; 最后, 用 8 月 8 日 18 时 EnKF 分析场的集合平均来初始化之后的 42 小时确定性预报 (图 5.1b)。在本章中, 分别以 ExpAll, ExpWFS, ExpHL, ExpCG 和 ExpKT 表示同化多部雷达的试验以及单独同化 WFS, HL, CG 和 KT 雷达的试验; 其中, ExpAll 是控制试验。考虑到台湾雷达对 Morakot 环流结构的观测能力随着台风逐渐远离台湾岛而下降, 本章不针对同化窗做敏感性试验。为了节约 EnKF 顺序同化观测的时间成本, 本章在每部雷达提供的径向风超级观测(产生方法见 2.5 节)中随机选择一半进行同化。在同化窗内, 四部雷达的超级观测总数保持在 4000 个左右 (图 5.5); 其中, WFS 雷达的超级观测最多, 平均为 1381 个; 而 KT 和 CG 雷达的超级观测数量分别在 8 月 8 日 15 时之前和之后仅次于 WFS 雷达。另外, WFS 雷达的台风内核覆盖度在 Morakot 离开台湾后的 12 小时内一直保持在 15% 以上 (计算方法见 4.2.3 节), 而其他三部雷达在这段时间内几乎不能观测到 Morakot 的内核结构(图 5.6)。

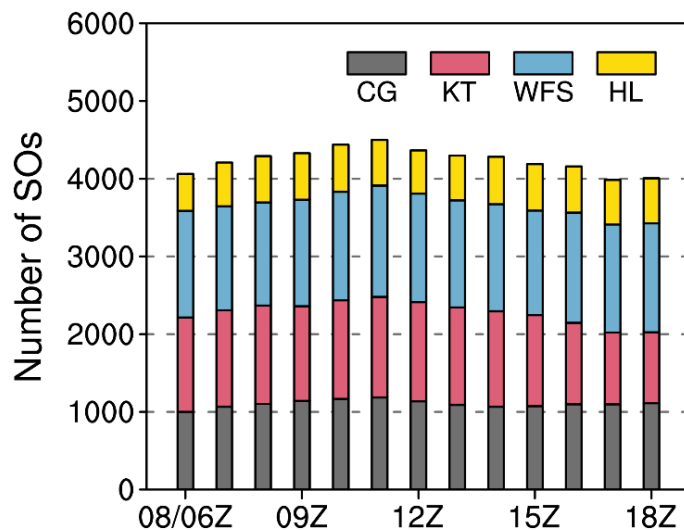


图 5.5 同化窗 (2009 年 8 月 8 日 06 时到 18 时) 内各雷达的径向风超级观测数量。

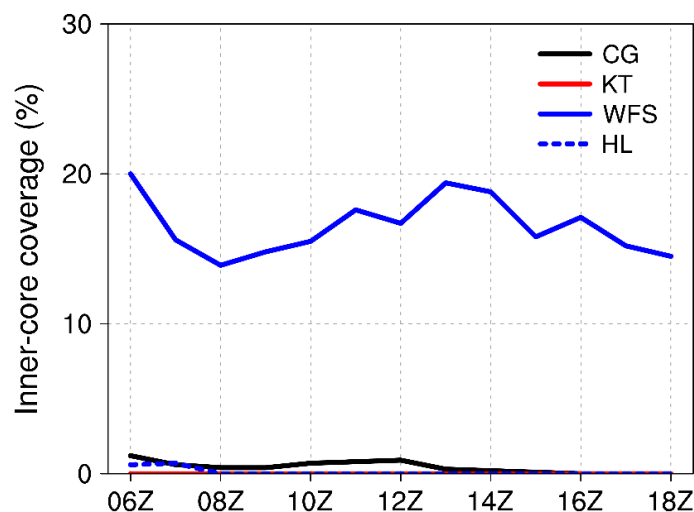


图 5.6 同化窗（2009 年 8 月 8 日 06 时到 18 时）内各雷达的径向风超级观测对 Morakot 的内核覆盖度（%）。

### 5.3 控制试验的同化效果

循环同化台湾四部沿海雷达的径向风观测可以显著提高初始场的台风模拟。8 月 8 日 18 时, ExpAll 的台风中心位置误差和最低海平面气压误差分别比 NoDA 减小 30% 和 34%; 且 ExpAll 对从台湾海峡延伸至台湾岛西南部的东西向强对流带的位置、形态和强度的模拟比 NoDA 更接近观测 (图 5.7a-c)。同时, ExpAll 还能修正 NoDA 对福建沿海对流的高估和对台湾岛以东海面上对流的低估, 从而使台风整体结构的模拟更加准确。另外, 同化台湾四部雷达的观测可以明显降低初始的台风内核区的中尺度环流场误差。以 8 月 8 日 18 时的 WFS 雷达  $0.5^\circ$  仰角径向风分布为例, NoDA 只能粗略地反映台风的逆时针环流, 但对风向、风速的模拟存在很大误差 (图 5.8a, b); 而 ExpAll 的分析场能对大部分精细结构的误差进行修正, 比如对台湾岛北部以东海面上的风向以及台湾岛以北海面上的风速 (尤其是超过  $21\text{m s}^{-1}$  的径向风极值) 的模拟更接近观测 (图 5.8c)。



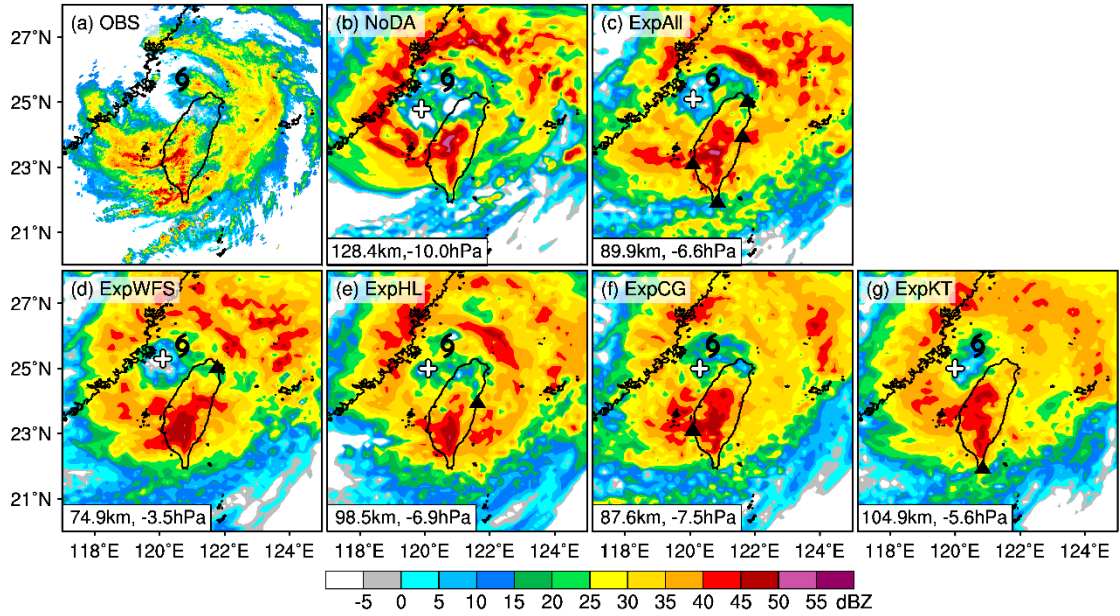


图 5.7 (a) 观测和 (b) NoDA, (c) ExpAll, (d) ExpWFS, (e) ExpHL, (f) ExpCG, (g) ExpKT 模拟的雷达组合反射率 (单位: dBZ; 时间为 2009 年 8 月 8 日 18 时)。图中黑色台风标志和白色十字分别表示观测和模拟的台风位置, 黑色三角表示各试验中被同化的雷达位置, 各试验的台风中心位置误差和最低海平面气压误差 (负值表示偏强) 分别标在对应小图的左下角。

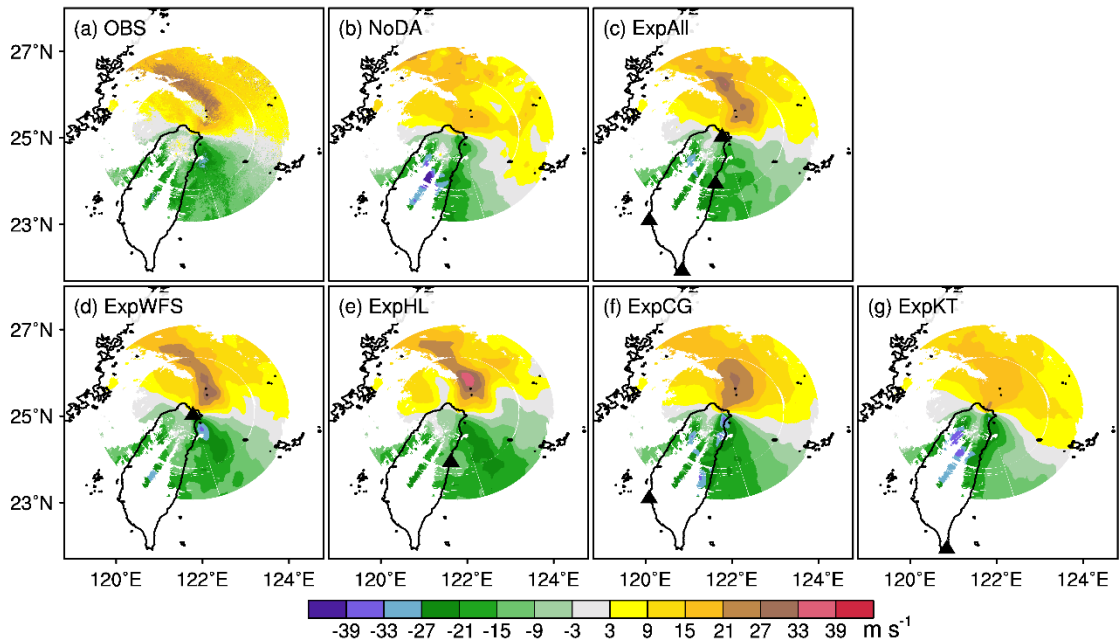


图 5.8 (a) 观测和 (b) NoDA, (c) ExpAll, (d) ExpWFS, (e) ExpHL, (f) ExpCG, (g) ExpKT 模拟的 WFS 雷达 0.5° 仰角径向风 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) 分布, 时间为 2009 年 8 月 8 日 18 时。图中黑色三角表示各试验中被同化的雷达位置。

除了初始场中台风位置、强度和中尺度结构的改善, ExpAll 的确定性台风路径预报也比 NoDA 有明显提高。ExpAll 预报的台风登陆时刻与观测一致, 且比 NoDA 的台风登陆位置误差减小 35% (图 5.9a, b)。而受初始台风位置偏差的

影响，虽然 ExpAll 预报的台风在台湾海峡上的移速、移向更接近观测，但其登陆地点仍比观测偏南。登陆后，ExpAll 预报的台风先向西北偏北方向移动，而后逐渐转向北移动，几乎与观测路径平行，且平均移速与观测非常吻合，从而使其登陆后的路径预报误差始终保持台风登陆时的位置误差而几乎不增长，且 24 小时平均路径预报误差比 NoDA 减小约 64%。然而，ExpAll 对台风强度预报的改善只维持了数小时，其最低海平面气压的预报误差在登陆后比 NoDA 略大(图 5.9c, d)，这可能是由于模式误差（包括物理参数化方案和分辨率等）导致的。

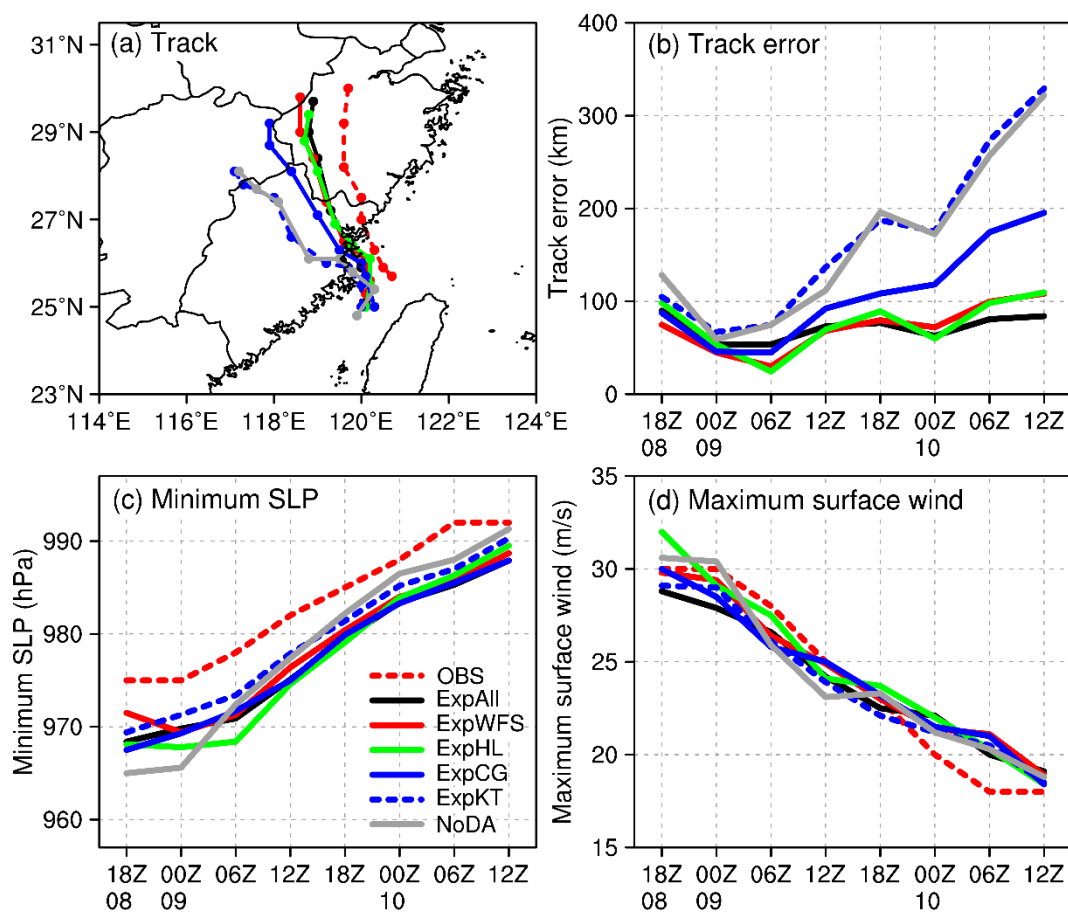


图 5.9 所有试验预报的 (a) 台风路径, (b) 路径误差 (单位: km), (c) 最低海平面气压 (单位: hPa) 和 (d) 最大地面风速 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ ), 时间为 2009 年 8 月 8 日 18 时到 8 月 10 日 12 时。图中还包含了 Morakot 的路径和强度最佳估计, 图例在 (c) 中。

ExpAll 中台风路径预报的提高与初始大尺度环境场、尤其是引导气流的改善有密切关系。引导气流的大小和方向对未来一段时间内的台风移速、移向有重要的指示作用,但其计算方法并不统一(Wu 和 Emanuel, 1995; Jian 和 Wu, 2008; Zhu 等, 2016)。借鉴 Chien 和 Kuo (2011) 的研究方法, 分别将距离台风中心 200km 到 500km 圆环范围内的纬向风和经向风在 500hPa 和 200hPa 之间进行以

气压为权重的加权平均, 由此可以去掉台风本身的大部分对称环流特征而保留背景环境风场的信息, 从而得到引导气流。8月8日18时, ExpAll 模拟的副热带高压和台风西北侧高压系统的位置和强度均比 NoDA 更接近 ERA-Interim 再分析资料 (图 5.10; 比如 5860m 等值线的范围), 从而使 ExpAll 的初始引导气流相比于 NoDA 有很大改善, 其与 ERA-Interim 此时的引导气流几乎相同。

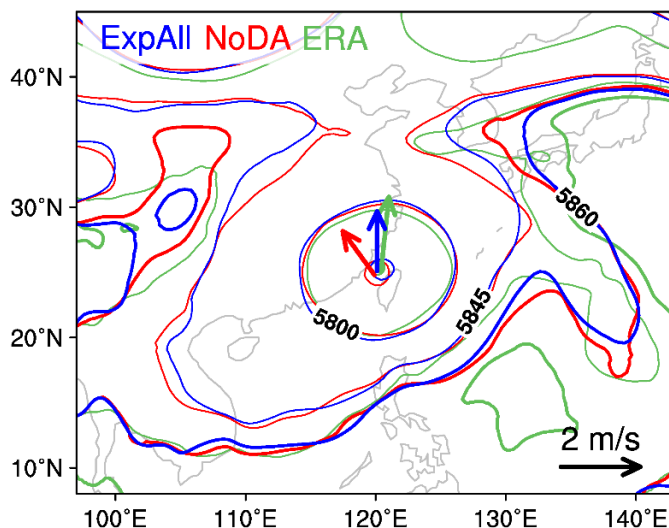


图 5.10 ExpAll (蓝线)、NoDA (红线) 和 ERA-Interim 再分析资料 (绿线) 的 500hPa 位势高度场 (单位: m) 及引导气流的对比, 时间为 2009 年 8 月 8 日 18 时。图中位势高度等值线只取 5660, 5800, 5845 和 5860m, 引导气流的参考矢量标在图的右下角。

除了路径预报的提高, ExpAll 对 Morakot 登陆我国大陆后的 24 小时累积降水预报也更加准确。ExpAll 能较准确地预报出浙江北部、安徽东南部和江苏南部的暴雨范围, 明显改善了 NoDA 对这些地区降水的严重低估 (图 5.11a-c)。同时, ExpAll 预报的中雨范围比 NoDA 略微缩小而更加接近观测。在中雨、大雨和暴雨等级上, ExpAll 的 TS 评分均高于 NoDA, 且对暴雨的预报技巧提高最多, 比 NoDA 提高近两倍 (图 5.12)。然而, ExpAll 在局部地区仍存在降水强度预报误差, 比如对福建东部和江苏中部的强降水有低估, 而对江西和福建交界处的弱降水有高估。另外, ExpAll 预报的大暴雨落区也有很大误差, 导致其在 100mm 阈值的 TS 评分仅为 0.03。

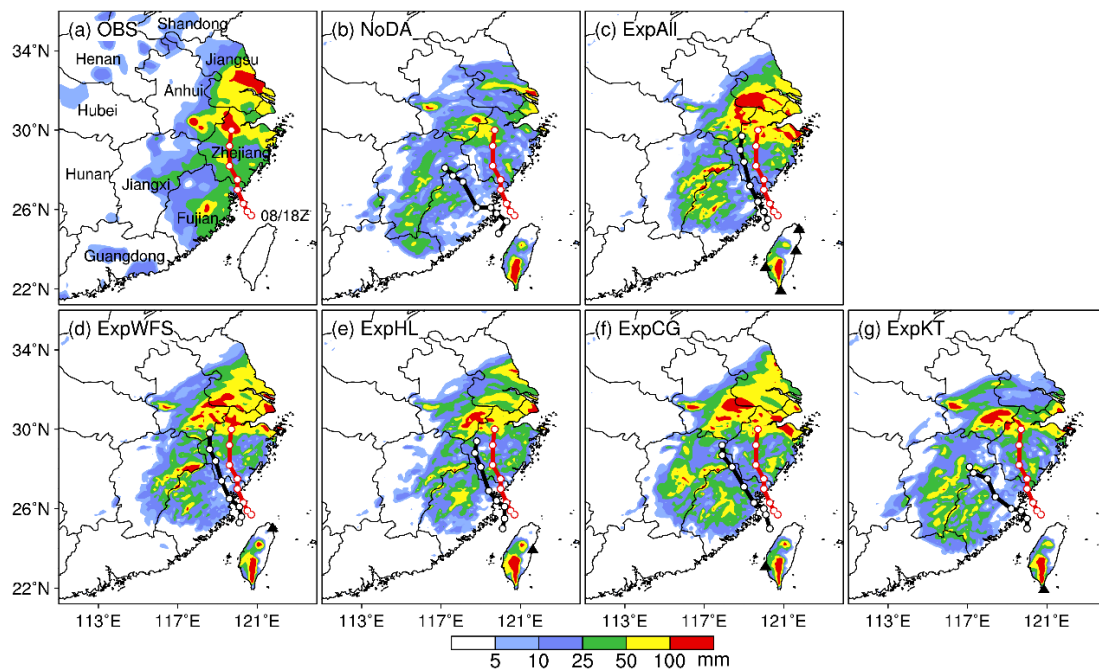


图 5.11 (a) 观测和 (b) NoDA, (c) ExpAll, (d) ExpWFS, (e) ExpHL, (f) ExpCG, (g) ExpKT 预报的 Morakot (2009) 登陆福建后 24 小时的累积降水 (单位: mm) 分布。图中红线和黑线分别表示最佳路径和各试验预报的台风路径 (时间为 2009 年 8 月 8 日 18 时到 8 月 10 日 12 时, 间隔为 6 小时), 黑色三角表示各试验中被同化的雷达位置。

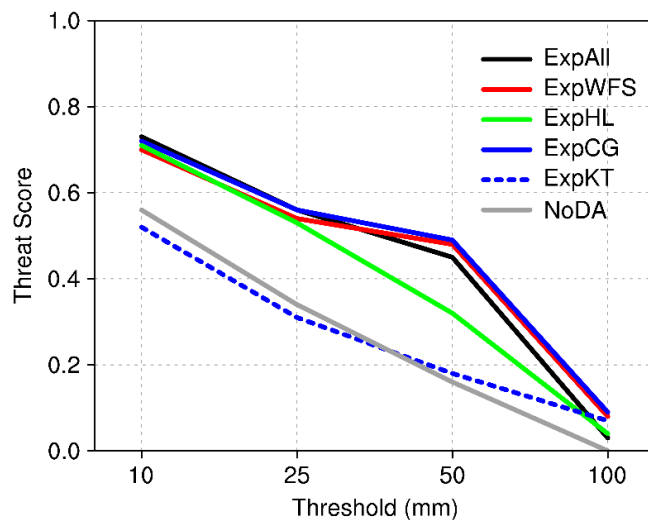


图 5.12 所有试验预报的 Morakot (2009) 登陆福建后 24 小时的累积降水 TS 评分。

#### 5.4 同化效果对雷达资料的敏感性

循环同化每部台湾雷达的径向风观测均可以在不同程度上提高初始场的台风模拟。8 月 8 日 18 时, 四个单雷达同化试验的台风中心位置误差和最低海平面气压误差均比 NoDA 小 (图 5.7d-g)。其中, ExpWFS 的初始台风位置和强度误差最小, 比 NoDA 分别减小 42% 和 65%; 而 ExpCG、ExpHL 和 ExpKT 的初

始台风位置的准确度依次降低,但初始强度误差相差不大,这可能与不同雷达对台风内核覆盖度的高低及距离台风中心的远近有关。需要注意的是,ExpWFS的初始台风位置和强度误差甚至比ExpAll小,这表明在同化了台风内核覆盖度最高的一部雷达观测的基础上再同化台风内核覆盖度较低甚至几乎不能观测到台风内核的更多部雷达的观测,只能得到有限的改善。另外,同化每部台湾雷达的观测均能提高初始场的台风整体对流结构的模拟,但不同位置的雷达观测对台风精细化中尺度对流模拟的贡献不同。

为了进一步考察初始的台风内核区中尺度环流场对雷达资料的敏感性,还对比分析了各试验对8月8日18时的WFS雷达 $0.5^\circ$ 仰角径向风分布的模拟情况。结果表明,ExpWFS的分析场通过局地背景场更新可以明显减小NoDA中的风向、风速误差,比如其能较准确地模拟出分别位于台湾岛以北和以东海面上的强风区(径向风绝对值 $\geq 21\text{m s}^{-1}$ ;图5.8d)。而同化距离台风中心较远的HL和CG雷达的观测会使分析场的准确度下降(图5.8e, f)。其中,同化几乎不能观测到台风内核的HL雷达的观测会使台湾岛以北海面上的径向风极大值有明显高估。然而,同化距离台风中心最远的KT雷达的观测后,分析场的台风内核区中尺度环流结构与NoDA相似,仍存在很大误差(图5.8g),这是由于背景误差协方差的准确度随着与观测距离的增加而下降。

除了初始场中台风位置、强度和中尺度结构的改善,ExpWFS、ExpHL和ExpCG的确定性台风路径预报比NoDA有不同程度的提高。其中,ExpWFS和ExpHL预报的台风路径与观测最接近,即先在观测登陆地点稍偏南处登陆,而后向西北偏北方向移动,且与ExpAll的路径几乎重合(图5.9a);但在8月10日00时之后,受移速、移向的影响,ExpWFS和ExpHL的路径预报误差比ExpAll略微增大(图5.9b)。相比之下,ExpCG对路径预报的提高不如ExpWFS和ExpHL明显,其预报的台风登陆地点更偏南,登陆后向西北方向移动并经过江西和福建、浙江的交界处而未进入浙江,逐渐偏离观测中台风登陆后不久即进入浙江中南部的路径。8月10日12时,虽然ExpCG的台风位置误差比NoDA减小39%,但仍为ExpWFS和ExpHL的近两倍。然而,ExpKT预报的台风路径与NoDA几乎重合,登陆时的台风位置误差甚至大于NoDA,而后其路径预报误差逐渐增大至超过300km,与NoDA的路径误差演变趋势相同。另外,与ExpAll类似,四个

单雷达同化试验对台风强度预报的改善只维持了数小时,且各试验之间的微小差别也证明模式误差在台风强度预报中占主导地位(图 5.9c, d)。

在路径预报得到改善的单雷达同化试验中,台风登陆后的 24 小时累积降水预报也有不同程度的提高。其中, ExpWFS 和 ExpCG 对降水强度和落区预报的提高类似且最明显,其预报的浙江北部、江苏中南部及安徽东南部的暴雨范围与观测比较接近(图 5.11d, f),且对暴雨的 TS 评分比 NoDA 提高了两倍,甚至略高于 ExpAll 的暴雨预报技巧(图 5.12)。但是,由于对福建沿海和浙江南部的大雨有低估,使这两个试验对中到大雨预报的提高均不如暴雨明显。而虽然 ExpHL 与 ExpWFS 有相似的路径,但二者对台风登陆后的降水预报却有很大差异,比如 ExpHL 对江苏中南部的降水强度有严重低估,且预报的浙江北部的暴雨范围比观测偏小(图 5.11e),导致其对暴雨的 TS 评分约为 ExpWFS 的 67%,仅比 NoDA 提高了一倍。然而,与 NoDA 类似,受严重偏离观测的路径影响,ExpKT 的降水预报存在很大误差,比如其未预报出江苏中南部的暴雨,并低估了浙江北部的降水强度(图 5.11g),导致其在各雨量等级上几乎没有预报技巧。

## 5.5 台风预报对雷达资料的敏感性的原因分析

### 5.5.1 路径预报

与控制试验 ExpAll 类似,单雷达同化试验 ExpWFS 和 ExpHL 中台风路径预报的提高也得益于同化雷达径向风对初始大尺度环境场及引导气流的改善。为了考察同化不同位置的雷达观测的影响,将所有单雷达同化试验的初始(8月8日 18时)500hPa 位势高度场及引导气流与 ExpAll 和 NoDA 进行对比分析。结果表明,不同试验之间的关键差别在于对台风西北侧高压脊的模拟差异(图 5.13;以 5860m 等值线为代表)。ExpWFS 模拟的台风西北侧高压脊的位置和强度均与 ExpAll 基本相同,从而使二者的初始引导气流也几乎重合,其相对于 NoDA 明显地顺时针旋转而指向北(图 5.13a)。其他三个单雷达同化试验的台风西北侧高压系统均比 ExpAll 偏强(比如 5860m 等值线的范围偏大),导致其引导气流虽然相对于 NoDA 顺时针旋转但不如 ExpAll 和 ExpWFS 的旋转角度大(图 5.13b-d)。考虑到所有试验的台风初始位置均比观测偏南,指向北的引导气流有利于台风登陆前的预报位置更接近观测。ExpHL、ExpCG 和 ExpKT 在 100°E, 30°N 附近的 5860m 等值线的准确度依次降低,而其路径预报误差对应地依次增大。

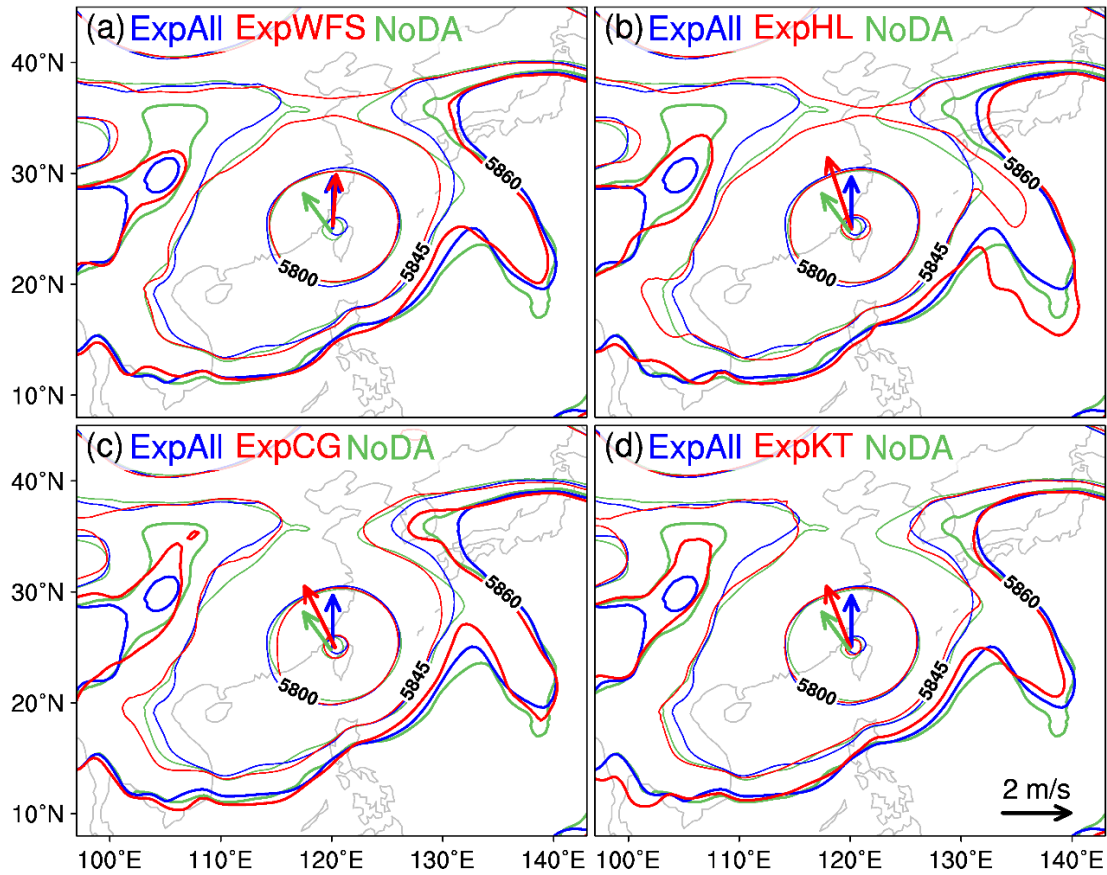


图 5.13 ExpAll (蓝线)、NoDA (绿线) 和 (a) ExpWFS, (b) ExpHL, (c) ExpCG, (d) ExpKT 的 500hPa 位势高度场 (单位: m) 及引导气流的对比, 时间为 2009 年 8 月 8 日 18 时。图中位势高度等值线只取 5660, 5800, 5845 和 5860m, 引导气流的参考矢量标在 (d) 的右下角。

在所有的试验中, 台风登陆后的移动方向基本与引导气流一致, 而登陆前和登陆过程中有时会出现台风的移动方向与引导气流之间有偏差 (图 5.14), 这可能是由于登陆前的引导气流较弱, 以及登陆过程中下垫面的复杂影响。台风登陆前, 各同化试验中引导气流的大小差别不大, 但引导气流的方向有较大差别 (图 5.15)。其中, ExpAll 和 ExpWFS 的引导气流在台风登陆前一直保持相对于 NoDA 偏北的程度最大, 因而二者预报的台风登陆地点更偏北且更接近观测; ExpHL 和 ExpCG 的引导气流在台风登陆前均快速地顺时针向北偏转, 从而使其预报的台风登陆地点也比 NoDA 偏北, 但 ExpCG 因初始偏差较大而提高略小; 而 ExpKT 的引导气流方向在台风登陆前一直未有明显变化, 且与 NoDA 相差最小, 导致二者预报的台风登陆地点很接近且最偏南。台风登陆后, 所有试验的引导气流均先向西北方向逆时针偏转, 再从 8 月 10 日 00 时开始逐渐向北顺时针偏转。其中, ExpAll、ExpWFS 和 ExpHL 的引导气流方向在 8 月 10 日 00 时之后几乎相同,

且比其他两个单雷达同化试验及 NoDA 的引导气流偏南而更接近 ERA-Interim 再分析资料，因而其预报的台风以向北移动为主，基本与观测路径平行。

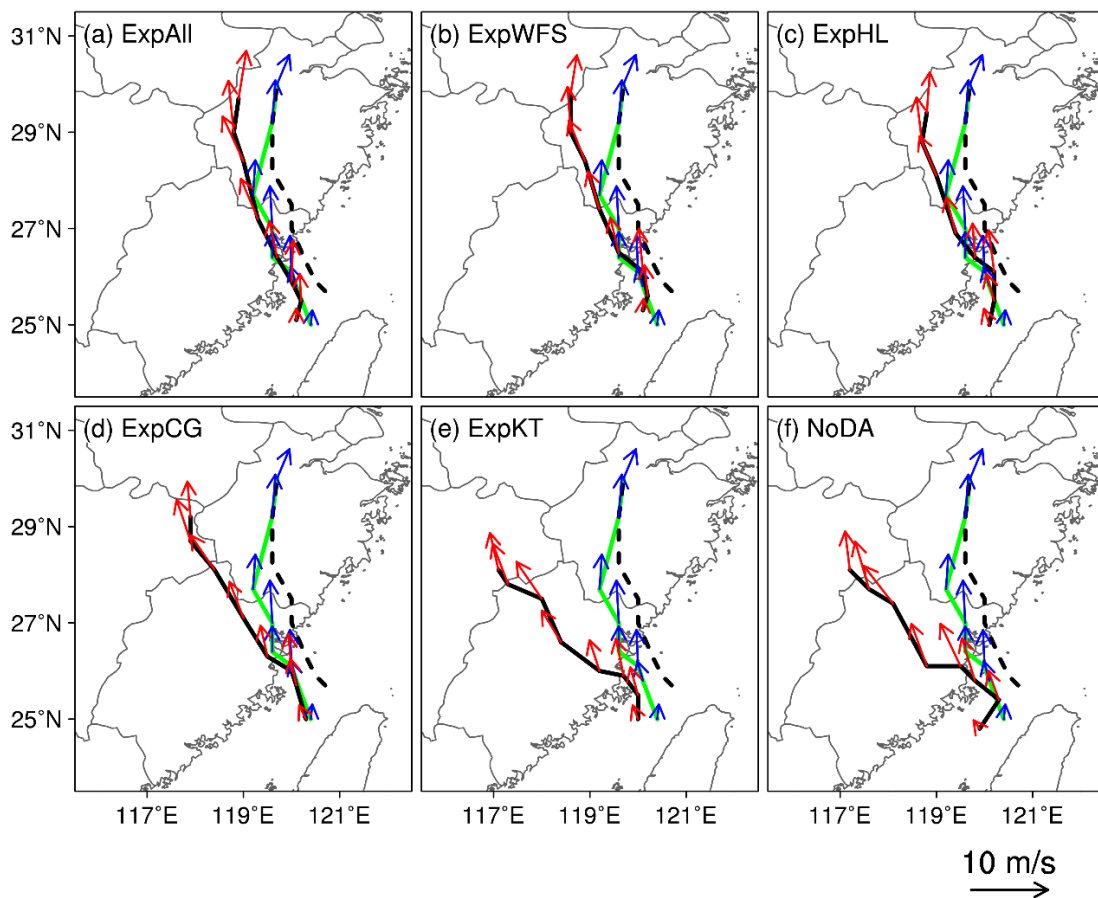


图 5.14 (a) ExpAll, (b) ExpWFS, (c) ExpHL, (d) ExpCG, (e) ExpKT 和 (f) NoDA 预报的引导气流（红色箭头），时间为 2009 年 8 月 8 日 18 时到 8 月 10 日 12 时。图中黑色实线和虚线分别表示各试验预报的台风路径和最佳路径，绿线和蓝色箭头表示由 ERA-Interim 得到的台风路径和引导气流，引导气流的参考矢量标在图的右下角。

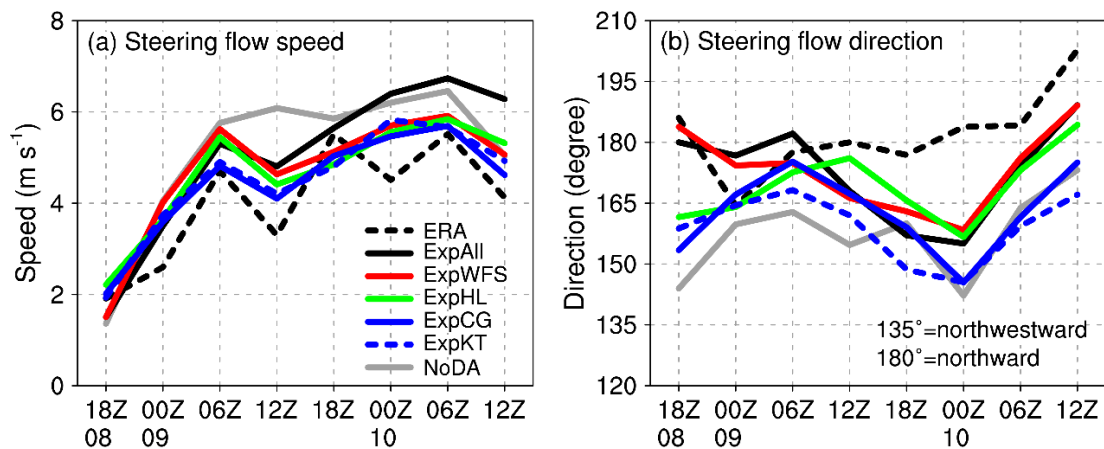


图 5.15 所有试验和 ERA-Interim 的引导气流 (a) 大小 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) 和 (b) 方向 (单位:  $^{\circ}$ ) 的时间演变。



### 5.5.2 降水预报

控制试验 ExpAll 中 Morakot 登陆我国大陆后的 24 小时累积降水预报的提高不仅得益于路径预报的提高,还得益于径向风的循环同化对初始场的改善。虽然同化的观测基本位于台风中心周围,但降水预报改善最明显的区域却是在距离台风中心较远处(图 5.11a-c)。为了考察其中的影响机制,对循环同化中风场和水汽场的更新演变特征进行分析。8 月 8 日 06 时(同化开始时刻),分析场和集合平均背景场的 850hPa 风场和 700hPa 水汽场的差异主要集中在台风中心周围(图 5.16a);而相比于 NoDA,分析场中受影响的低层风场和水汽场也主要集中在台风中心周围(图 5.16b)。然而,随着循环同化次数的增多,分析场与 NoDA 之间的差异范围逐渐扩大。8 月 8 日 18 时(同化结束时刻),分析场中受显著影响的低层风场和水汽场的范围已扩大至南海东北部、台湾岛以东 500km 海域以及我国东南部多个省份,远比首次同化的影响范围广(图 5.16c)。

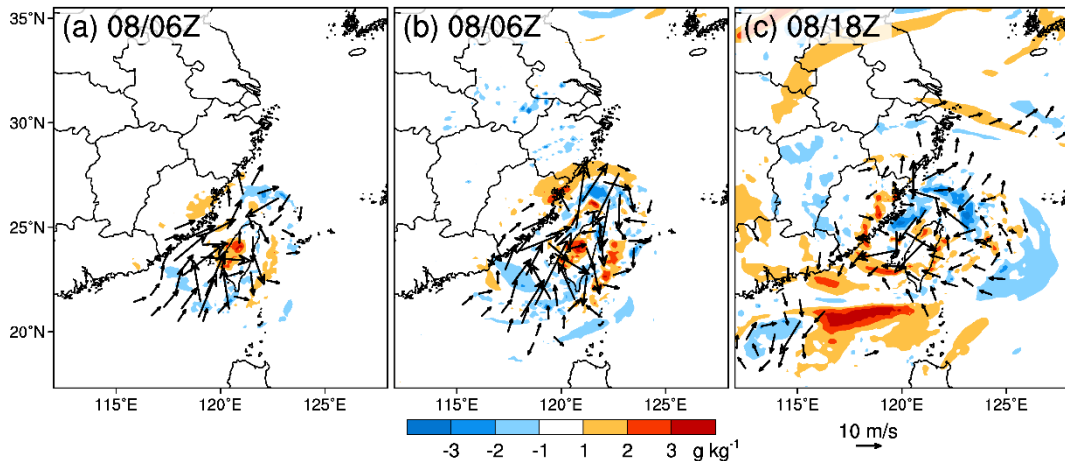


图 5.16 ExpAll 的分析场与 (a) 集合平均背景场和 (b) NoDA 的 700hPa 水汽混合比差异(单位:  $\text{g kg}^{-1}$ )及 850hPa 水平风场差异(只画出大于  $5\text{ m s}^{-1}$  的差异,参考矢量标在图的右下角),时间为 2009 年 8 月 8 日 06 时。(c) 与 (b) 相同,但时间为 8 月 8 日 18 时。

基于改善的初始场,ExpAll 对 Morakot 在我国东南沿海的降水预报的提高逐渐显现。在确定性预报的前 6 小时内,ExpAll 和 NoDA 对台风在台湾海峡上的路径预报比较接近,因而二者预报的降水强度和分布也比较相似(图 5.17a-c)。台风登陆后,ExpAll 预报的台风移速和移向在前 6 小时内与观测十分接近,有利于其较准确地预报出距离台风中心较远的浙江北部的暴雨;而 NoDA 预报的台风向西移动,6 小时内路径误差几乎翻倍,导致其对浙江北部和福建沿海的降水严重低估(图 5.17d-f)。8 月 10 日 00 时以后,随着 NoDA 预报的台风路径逐

渐偏离观测而使路径误差超过 200km 并继续增大，其开始完全丧失降水预报能力；而 ExpAll 预报的台风移速和移向仍与观测十分接近，其登陆后的路径预报误差一直维持在 80km 左右，这有利于 ExpAll 继续保持较高的降水预报技巧，比如，虽然 ExpAll 预报的降水强度误差随着预报时间的增长而明显增大，但仍可以预报出距离台风中心较远的江苏中南部的强降水（图 5.17g-i）。

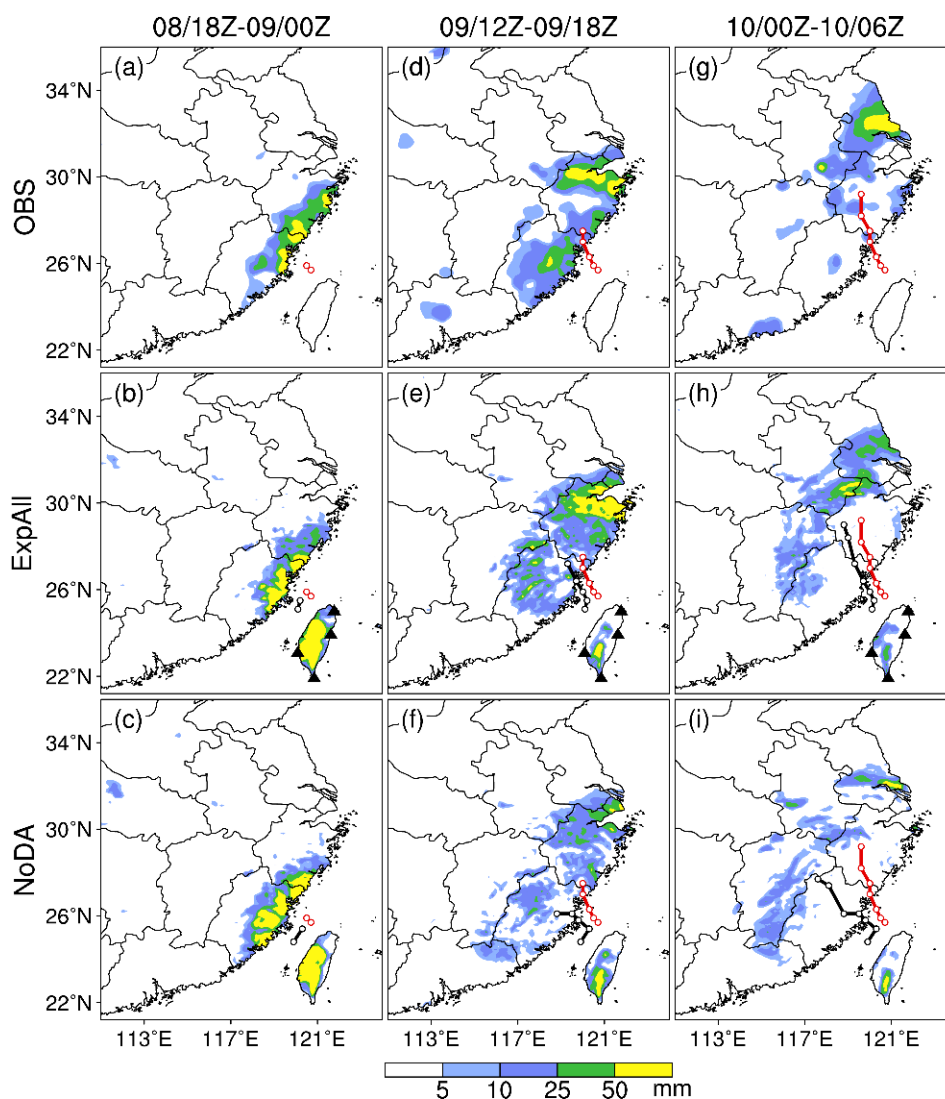


图 5.17 (a, d, g) 观测和 (b, e, h) ExpAll 及 (c, f, i) NoDA 预报的 6 小时累积降水（单位：mm）分布，时间从左到右依次为 2009 年 8 月 8 日 18 时到 9 日 00 时、9 日 12 时到 18 时、10 日 00 时到 06 时。图中红线和黑线分别表示从 8 日 18 时到 9 日 00 时、18 时及 10 日 06 时的最佳路径和试验预报的台风路径，黑色三角表示 ExpAll 中被同化的雷达位置。

为了进一步考察 ExpAll 对台风远距离降水预报提高的原因，还对其与 NoDA 的水汽输送差异进行了分析。与上述三个降水时段对应，分别对 ExpAll 和 NoDA 计算 6 小时平均的从地面垂直积分到 500hPa 的水汽通量场。结果表明，二者的

差异随着路径预报差异的增大而逐渐扩大 (图 5.18); 同时, 水汽通量差异场的散度与二者预报的降水强度和落区差异密切相关。在确定性预报的前 6 小时内, ExpAll 相对于 NoDA 的水汽通量差异场在福建沿海呈现辐散特征 (图 5.18a), 因而 ExpAll 在福建沿海的降水强度略微偏弱且更接近观测 (图 5.17a-c)。台风登陆后, ExpAll 相对于 NoDA 的水汽通量差异场在观测的台风远距离降水区呈现很强的辐合 (图 5.18b, c), 这表明降水预报的提高在很大程度上得益于台风结构预报的改善, 并可能与初始台风结构的准确度密切相关 (图 5.8a-c)。

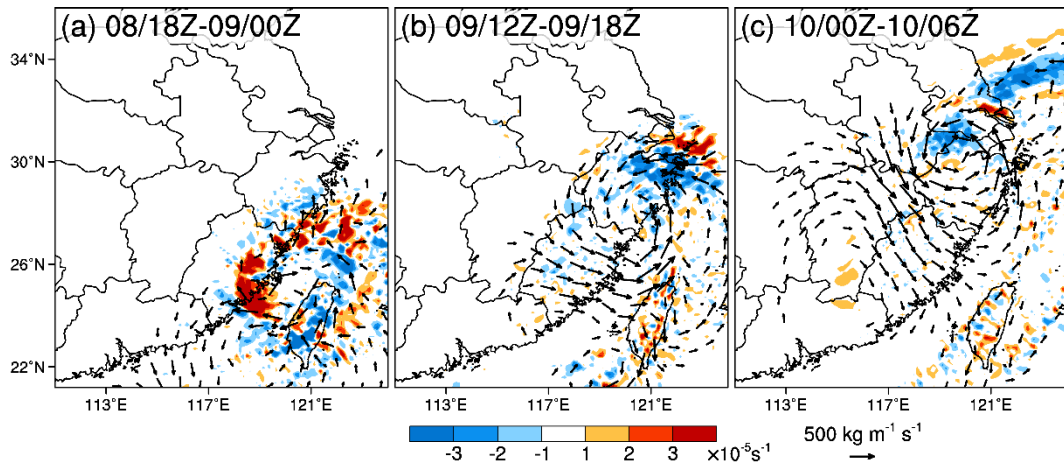


图 5.18 ExpAll 相对于 NoDA 的 6 小时平均的从地面垂直积分到 500hPa 的水汽通量差异场 (只画出大于  $1.5 \times 10^2 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  的差异, 参考矢量标在图的右下角) 及其散度 (单位:  $\text{s}^{-1}$ ), 起始时间从左到右依次为 2009 年 8 月 8 日 18 时、9 日 12 时和 10 日 00 时。

当同化的径向风观测对台风内核的覆盖度不同时, 也会对台风降水预报产生不同的影响。比如, 综合考虑台风的路径和降水预报时, ExpWFS 的表现是所有单雷达同化试验中最好的, 而 WFS 雷达对 Morakot 的内核覆盖度远高于其他三部雷达可能是其中一个重要原因。然而, 虽然 ExpHL 和 ExpWFS 的路径预报十分相似, 但前者预报的台风登陆后 24 小时累积降水的强度和分布却明显比后者差 (图 5.11a, d, e), 这可能是由于 HL 雷达几乎不能观测到台风内核区而导致初始台风结构误差较大 (图 5.8a, d, e)。为了进一步考察 ExpHL 和 ExpWFS 降水预报差异的原因, 对二者的中低层水汽输送差异场的演变特征进行了分析。台风登陆后, ExpHL 和 ExpWFS 的水汽通量差异并未像 ExpAll 和 NoDA 的差异那样范围逐渐扩大, 而是跟随台风的移动而移动, 这主要取决于两个试验预报的台风路径是否有较大差别 (图 5.19)。特别是台风登陆后的 18 小时内, ExpHL 相对于 ExpWFS 的水汽通量差异场在观测的暴雨区 (如浙江北部、江苏中南部等地) 呈

现较强的辐散，从而使 ExpHL 预报的降水偏弱。8 月 10 日 06 时以后，二者的水汽通量差异场在安徽东南部出现辐合辐散的偶极子分布，表明 ExpHL 预报的降水比 ExpWFS 更靠近台风中心而与观测不符。另外，ExpCG 的路径预报误差明显比 ExpAll、ExpWFS 和 ExpHL 偏大，但其降水预报技巧更高，这是由于同化 CG 雷达的观测虽然并未明显改善初始大尺度环境场和引导气流，却能预报出观测的强降水区的低层强风场辐合（图 5.20a-c）。由于同样的原因（图 5.20d），导致虽然 ExpCG 和 ExpKT 预报的台风路径都有很大误差，但 ExpCG 的降水预报明显优于 ExpKT。

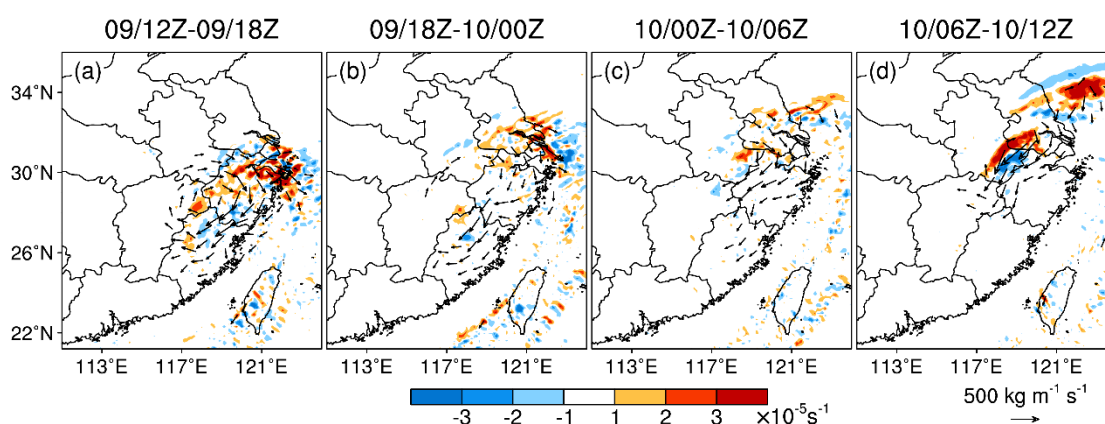


图 5.19 ExpHL 相对于 ExpWFS 的 6 小时平均的从地面垂直积分到 500hPa 的水汽通量差异场（只画出大于  $1.5 \times 10^2 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  的差异，参考矢量标在图的右下角）及其散度（单位： $\text{s}^{-1}$ ），起始时间从左到右依次为 2009 年 8 月 9 日 12 时、18 时、10 日 00 时和 06 时。

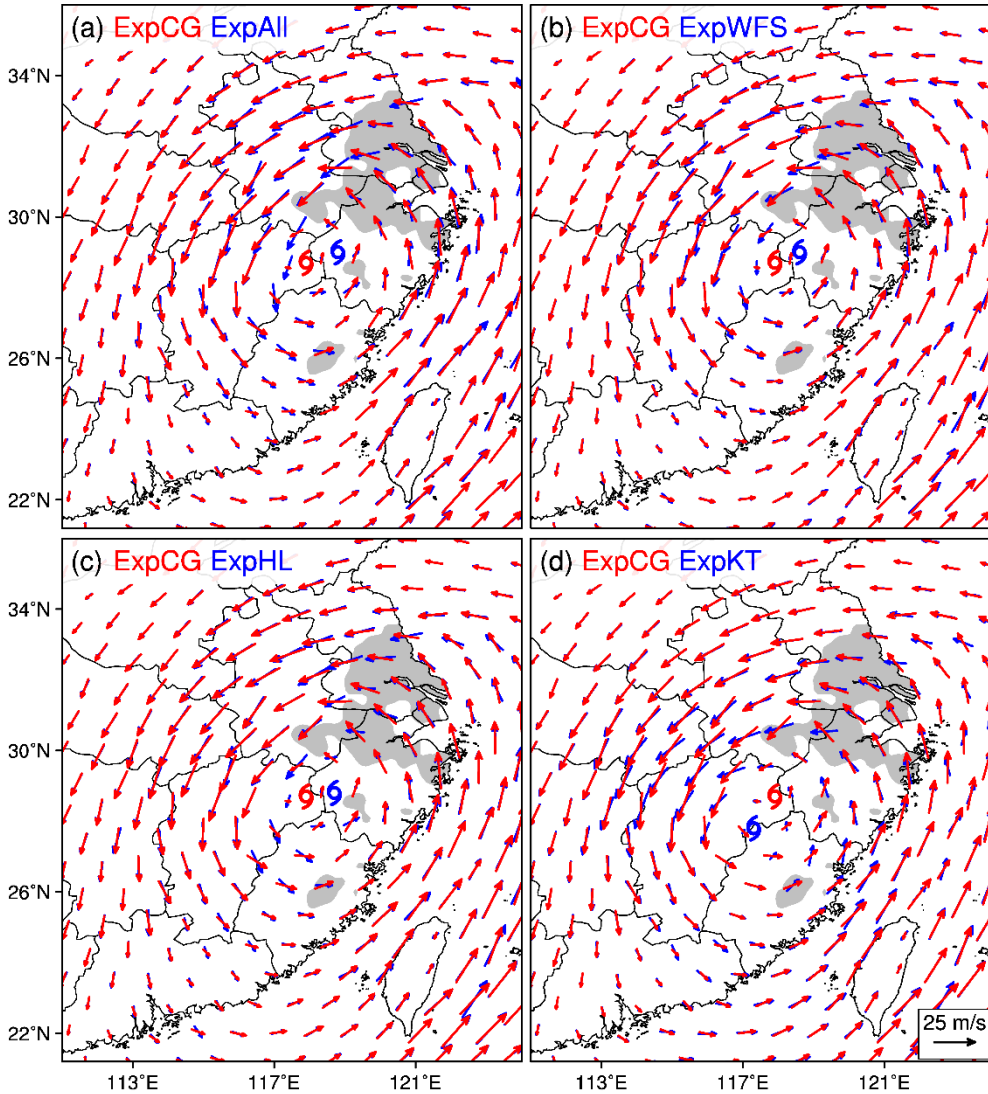


图 5.20 ExpCG 与 (a) ExpAll, (b) ExpWFS, (c) ExpHL, (d) ExpKT 的 850hPa 风场对比, 时间为 2009 年 8 月 10 日 06 时。图中灰色阴影表示观测的 Morakot 登陆福建后 24 小时累积降水超过 50mm 的区域, 台风标志为各试验模拟的台风中心位置, 参考矢量标在 (d) 的右下角。

## 5.6 本章小结

本章利用 WRF-EnKF 系统考察了同化台湾沿海多部雷达和单部雷达的径向风观测对台风 Morakot (2009) 登陆我国大陆后的路径和降水预报的影响, 得到以下主要结论:

(1) 循环同化台湾多部雷达的径向风观测可以使台风的初始位置和强度误差分别比 NoDA 减小 30% 和 34%, 并能明显改善初始场中台风内核区的中尺度环流场和台风外围的强对流带, 以及初始大尺度环境场和引导气流, 从而使台风登陆大陆后 24 小时平均路径预报误差比 NoDA 减小约 64%, 登陆后的暴雨预报

技巧比 NoDA 提高近两倍。

(2) 同化对 Morakot 内核覆盖度最高的一部台湾雷达的观测能明显改善对初始引导气流起关键作用的台风西北侧高压脊的模拟, 并明显改善台风初始结构。因此, 综合考虑台风登陆后的路径和降水时, 同化上述雷达的观测对预报的提高贡献最大, 且与多雷达同化的效果相当。

(3) 同化台风中心周围的径向风观测对台风登陆后的远距离降水预报的提高尤为明显, 这主要得益于同化的影响范围随着循环同化次数的增多而扩大, 以及路径预报、台风结构和水汽辐合条件的改善。

## 第六章 总结

本文首先基于 NCEP-FNL 全球再分析资料和台湾四部沿海地基多普勒雷达观测资料,对 2009 年 8 月先后登陆台湾和我国大陆东南沿海并造成严重灾害的台风 Morakot 的天气背景和结构演变特征进行了分析。然后,利用 WRF-EnKF 同化系统分别考察了 Morakot 登陆台湾和大陆后的路径和降水预报对台湾沿海雷达径向风观测的敏感性(包括被同化雷达的个数、雷达对台风内核的覆盖度、同化开始时刻相对于台风登陆时刻的提前量、同化窗的长度等),旨在为寻找合理的沿海雷达资料同化策略来提高我国登陆台风的预报提供科学参考。

观测分析表明, Morakot 登陆台湾后,有一条东西向的准静止强对流带从台湾海峡延伸至台湾岛西南部,而嵌在其中的对流单体在海面上不断生成、发展、向下游传播,且在中央山脉的地形抬升作用下增强,从而有利于这条强对流带下游的台湾岛南部发生强降水。

循环同化 Morakot 登陆台湾前 12 小时内的多部雷达的径向风观测可以使初始场的台风整体环流误差比 NoDA 减小约 56%,从而使台风登陆台湾后的 24 小时平均路径预报误差比 NoDA 减小约 44%。同时,循环同化沿海雷达的径向风观测可以改善低层风场辐合线和准静止强对流带的预报,并使水汽输送的位置和强度更加准确,因而台风登陆后 24 小时累积强降水预报技巧比 NoDA 提高了近 2.1 倍。另外,同化台风登陆前 6 小时内的观测尤其重要,其效果与同化台风登陆前 12 小时内的观测类似,但明显好于只同化台风登陆前 6–12 小时的观测。当台风中心与沿海雷达相距较远时,同化台风内核覆盖度最高的一部雷达的观测对 Morakot 登陆台湾后的路径和降水预报的提高贡献最大,且很接近多雷达同化的效果。但是,应该避免在台风即将登陆时开始同化台风内核覆盖度较高的单部雷达的观测,否则容易在台风中心附近及观测的台风移动方向的前方产生不合理的强风场增量,使台风中心向远离所同化雷达的方向偏移,并可能使同化后的台风中心相对于同化前的位移矢量几乎垂直于观测的台风移动方向,而进一步的同化一般难以对这种较大的初始偏差加以迅速纠正,从而台风分析路径可能会始终严重偏离观测路径,导致台风路径和降水预报变差。

当 Morakot 进入台湾海峡后,循环同化台湾多部雷达的径向风观测可以使台风的初始位置和强度误差分别比 NoDA 减小 30%和 34%,并能改善初始场中台

风内核区的中尺度环流场和台风外围的强对流带,以及初始大尺度环境场和引导气流,从而使台风登陆大陆后的 24 小时平均路径预报误差比 NoDA 减小约 64%,登陆后的暴雨预报技巧比 NoDA 提高近两倍。类似于 Morakot 登陆台湾前的研究结果,同化台风内核覆盖度最高的一部台湾雷达的观测对台风路径和降水预报的提高贡献最大,且与多雷达同化的效果相当。这些同化能明显改善对初始引导气流起关键作用的台风西北侧高压脊的模拟,并明显改善台风初始结构。而同化台风内核覆盖度较低的单部台湾雷达的观测可能会由于对台风环境场关键因子的把握不足而导致较大的路径预报误差。此外,同化台风中心周围的径向风观测对 Morakot 登陆大陆后的远距离降水预报的提高尤为明显,这主要得益于同化的影响范围随着循环同化次数的增多而扩大,以及路径预报、台风结构和水汽辐合条件的改善。

需要指出的是,本文的结论是针对台风 Morakot (2009) 得到的,具有一定的局限性,因此需要对更多的同时影响台湾和大陆的台风个例(比如降水强度比 Morakot 弱的登陆台风)进行研究来考察其普适性。



## 参考文献

- Aberson, S. D., 2011: The impact of dropwindsonde data from the THORPEX Pacific area regional campaign and the NOAA hurricane field program on tropical cyclone forecasts in the global forecast system. *Monthly Weather Review*, 139, 2689–2703.
- Anderson, J. L., 2001: An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Monthly Weather Review*, 129, 2884–2903.
- Bender, M. A., T. R. Knutson, R. E. Tuleya, J. J. Sirutis, G. A. Vecchi, S. T. Garner, and I. M. Held, 2010: Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes. *Science*, 327, 454–458.
- Berger, H., R. Langland, C. S. Velden, C. A. Reynolds, and P. M. Pauley, 2011: Impact of enhanced satellite-derived atmospheric motion vector observations on numerical tropical cyclone track forecasts in the western North Pacific during TPARC/TCS-08. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 2309–2318.
- Cangialosi, J. P., and J. L. Franklin, 2011: 2010 National Hurricane Center forecast verification report. NOAA, 77 pp.
- Chan, J. C. L., and W. M. Gray, 1982: Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships. *Monthly Weather Review*, 110, 1354–1374.
- Chen, L., Y. Li, and Z. Cheng, 2010: An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27, 967–976.
- Chen, B., M. Mu, and X. Qin, 2013: The impact of assimilating dropwindsonde data deployed at different sites on typhoon track forecasts. *Monthly Weather Review*, 141, 2669–2682.
- Chen, X., L. Wu, and J. Zhang, 2011: Increasing duration of tropical cyclones over China. *Geophysical Research Letters*, 38, L02708, doi: 10.1029/2010GL046137.
- Cheung, K. K. W., L.-R. Huang, and C.-S. Lee, 2008: Characteristics of rainfall during tropical cyclone periods in Taiwan. *Natural Hazards and Earth System*

- Sciences*, 8, 1463–1474.
- Chien, F.-C., and H.-C. Kuo, 2011: On the extreme rainfall of Typhoon Morakot (2009). *Journal of Geophysical Research*, 116, D05104.
- Chou, K.-H., and C.-C. Wu, 2008: Typhoon initialization in a mesoscale model—Combination of the bogus vortex and the dropwindsonde data in DOTSTAR. *Monthly Weather Review*, 136, 865–879.
- Dong, J., and M. Xue, 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). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139, 467–487.
- Du, N., M. Xue, K. Zhao, and J. Min, 2012: Impact of assimilating airborne Doppler radar velocity data using the ARPS 3DVAR on the analysis and prediction of Hurricane Ike (2008). *Journal of Geophysical Research*, 117, D18113.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 46, 3077–3107.
- Elsberry, R. L., and P. A. Harr, 2008: Tropical cyclone structure (TCS08) field experiment science basis, observational platforms, and strategy. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 44, 209–231.
- Emanuel, K., 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436, 686–688.
- Evensen, G., 1994: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research*, 99, 10143–10162.
- Evensen, G., 2003: The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dynamics*, 53, 343–367.
- Fang, X., Y.-H. Kuo, and A. Wang, 2011: The impacts of Taiwan topography on the predictability of Typhoon Morakot’s record-breaking rainfall: A high-resolution ensemble simulation. *Weather and Forecasting*, 26, 613–633.
- Gao, S., Z. Meng, F. Zhang, and L. F. Bosart, 2009: Observational analysis of heavy

- rainfall mechanisms associated with severe tropical storm Bilis (2006) after its landfall. *Monthly Weather Review*, 137, 1881–1897.
- Gaspari, G., and S. E. Cohn, 1999: Construction of correlation functions in two and three dimensions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125, 723–757.
- Goerss, J. S., 2009: Impact of satellite observations on the tropical cyclone track forecasts of the navy operational global atmospheric prediction system. *Monthly Weather Review*, 137, 41–50.
- Grell, G. A., and D. Devenyi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29, 38-1–38-4.
- Hamill, T. M., J. S. Whitaker, M. Fiorino, and S. G. Benjamin, 2011: Global ensemble prediction of 2009's tropical cyclones initialized with an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 139, 668–688.
- Holland, G. J., 1984: Tropical cyclone motion: A comparison of theory and observation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41, 68–75.
- Hong, S. Y., J. Dudhia, and S.-H. Chen, 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 132, 103–120.
- Houtekamer, P. L., and H. L. Mitchell, 1998: Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Monthly Weather Review*, 126, 796–811.
- Houtekamer, P. L., and H. L. Mitchell, 2005: Ensemble Kalman filtering. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 3269–3289.
- Houtekamer, P. L., H. L. Mitchell, and X. Deng, 2009: Model error representation in an operational ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 137, 2126–2143.
- Jian, G.-J., and C.-C. Wu, 2008: A numerical study of the track deflection of Supertyphoon Haitang (2005) prior to its landfall in Taiwan. *Monthly Weather Review*, 136, 598–615.
- Jung, Y., M. Xue, and G. Zhang, 2010: Simultaneous estimation of microphysical

- parameters and the atmospheric state using simulated polarimetric radar data and an ensemble Kalman filter in the presence of an observation operator error. *Monthly Weather Review*, 138, 539–562.
- Kosiba, K. A., and J. Wurman, 2014: Finescale dual-Doppler analysis of hurricane boundary layer structures in Hurricane Frances (2004) at landfall. *Monthly Weather Review*, 142, 1874–1891.
- Li, X., J. Ming, Y. Wang, K. Zhao, and M. Xue, 2013: Assimilation of T-TREC-retrieved wind data with WRF 3DVAR for the short-term forecasting of typhoon Meranti (2010) near landfall. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 10361–10375.
- Li, Z., Z. Pu, J. Sun, and W.-C. Lee, 2014: Impacts of 4DVAR assimilation of airborne Doppler radar observations on numerical simulations of the genesis of Typhoon Nuri (2008). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53, 2325–2343.
- Lin, Y.-L., S. Chiao, T.-A. Wang, M. L. Kaplan, and R. P. Weglarz, 2001: Some common ingredients for heavy orographic rainfall. *Weather and Forecasting*, 16, 633–660.
- Liu, Z., C. S. Schwartz, C. Snyder, and S.-Y. Ha, 2012: Impact of assimilating AMSU-A radiances on forecasts of 2008 Atlantic tropical cyclones initialized with a limited-area ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 140, 4017–4034.
- Lorenc, A. C., 2003: The potential of the ensemble Kalman filter for NWP—a comparison with 4D-Var. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129, 3183–3203.
- Marks, F. D., 2003: State of the science: Radar view of tropical cyclones. *Meteorological Monographs*, 30, 33–33.
- Meng, Z., and F. Zhang, 2007: Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part II: Imperfect model experiments. *Monthly Weather Review*, 135, 1403–1423.
- Meng, Z., and F. Zhang, 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, 522–540.
- Meng, Z., and F. Zhang, 2011: Limited-area ensemble-based data assimilation. *Monthly Weather Review*, 139, 2025–2045.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, 102, 16663–16682.
- Nettleton, L., S. Daud, R. Neitzel, C. Burghart, W.-C. Lee, and P. Hildebrand, 1993: SOLO: a program to peruse and edit radar data. *Preprints, 26th Conf. on Radar Meteorology*, Norman, OK, Amer. Meteor. Soc., 338–339.
- Noh, Y., W.-G. Cheon, S.-Y. Hong, and S. Raasch, 2003: Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data. *Boundary-Layer Meteorology*, 107, 401–427.
- Park, D.-S. R., C.-H. Ho, J.-H. Kim, and H.-S. Kim, 2013: Spatially inhomogeneous trends of tropical cyclone intensity over the western North Pacific for 1977–2010. *Journal of Climate*, 26, 5088–5101.
- Peduzzi, P., B. Chatenoux, H. Dao, A. De Bono, C. Herold, J. Kossin, F. Mouton, and O. Nordbeck, 2012: Global trends in tropical cyclone risk. *Nature Climate Change*, 2, 289–294.
- Pu, Z., X. Li, and J. Sun, 2009: Impact of airborne Doppler radar data assimilation on the numerical simulation of intensity changes of Hurricane Dennis near a landfall. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66, 3351–3365.
- Rappaport, E. N., 2000: Loss of life in the United States associated with recent Atlantic tropical cyclones. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81, 2065–2073.
- Rappaport, E. N., J. L. Franklin, L. A. Avila, S. R. Baig, J. L. B. Ii, E. S. Blake, C. A. Burr, J.-G. Jiing, C. A. Juckins, R. D. Knabb, C. W. Landsea, M. Mainelli, M. Mayfield, C. J. Mcadie, R. J. Pasch, C. Sisko, S. R. Stewart, and A. N. Tribble, 2009: Advances and challenges at the National Hurricane Center. *Weather and*

- Forecasting*, 24, 395–419.
- Reasor, P. D., M. T. Montgomery, F. D. Marks, and J. F. Gamache, 2000: Low-wavenumber structure and evolution of the hurricane inner core observed by airborne dual-Doppler radar. *Monthly Weather Review*, 128, 1653–1680.
- Roy, S. S., V. Lakshmanan, S. K. R. Bhowmik, and S. B. Thampi, 2010: Doppler weather radar based nowcasting of cyclone Ogni. *Journal of Earth System Science*, 119, 183–199.
- Schwartz, C. S., Z. Liu, Y. Chen, and X.-Y. Huang, 2012: Impact of assimilating microwave radiances with a limited-area ensemble data assimilation system on forecasts of Typhoon Morakot. *Weather and Forecasting*, 27, 424–437.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Technical Note TN-475+STR, 113 pp.
- Snyder, C., and F. Zhang, 2003: Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 131, 1663–1677.
- Talagrand, O., 1997: Assimilation of observations, an introduction. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Special Issue 75, 1B, 191–209.
- Torn, R. D., and G. J. Hakim, 2009: Ensemble data assimilation applied to RAINEX: Observations of Hurricane Katrina (2005). *Monthly Weather Review*, 137, 2817–2829.
- Wang, C.-C., H.-C. Kuo, Y.-H. Chen, H.-L. Huang, C.-H. Chung, and K. Tsuboki, 2012: Effects of asymmetric latent heating on typhoon movement crossing Taiwan: the case of Morakot (2009) with extreme rainfall. *J. Atmos. Sci.*, 69, 3172–3196.
- Wang, M., M. Xue, K. Zhao, and J. Dong, 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, 1892–1907.
- Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry, and H.-R. Chang, 2005: Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 309, 1844–1846.

- Weissmann, M., F. Harnisch, C.-C. Wu, P.-H. Lin, Y. Ohta, K. Yamashita, Y.-H. Kim, E.-H. Jeon, T. Nakazawa, and S. Aberson, 2011: The influence of assimilating dropsonde data on typhoon track and midlatitude forecasts. *Monthly Weather Review*, 139, 908–920.
- Weng, Y., and F. Zhang, 2012: Assimilating airborne Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter for convection-permitting hurricane initialization and prediction: Katrina (2005). *Monthly Weather Review*, 140, 841–859.
- Weng, Y., M. Zhang, and F. Zhang, 2011: Advanced data assimilation for cloud-resolving hurricane initialization and prediction. *Computing in Science and Engineering*, 13, 40–49.
- Whitaker, J. S., and T. M. Hamill, 2002: Ensemble data assimilation without perturbed observations. *Monthly Weather Review*, 130, 1913–1924.
- Whitaker, J. S., T. M. Hamill, X. Wei, Y. Song, and Z. Toth, 2008: Ensemble data assimilation with the NCEP global forecast system. *Monthly Weather Review*, 136, 463–482.
- Wu, C.-C., and K. A. Emanuel, 1995: Potential vorticity diagnostics of hurricane movement. Part I: A case study of Hurricane Bob (1991). *Monthly Weather Review*, 123, 69–92.
- Wu, L., and B. Wang, 2004: Assessing impacts of global warming on tropical cyclone tracks. *Journal of Climate*, 17, 1686–1698.
- Wu, L., B. Wang, and S. Geng, 2005: Growing typhoon influence on east Asia. *Geophysical Research Letters*, 32, L18703, doi: 10.1029/2005GL022937.
- Wu, T.-C., H. Liu, S. J. Majumdar, C. S. Velden, and J. L. Anderson, 2014: Influence of assimilating satellite-derived atmospheric motion vector observations on numerical analyses and forecasts of tropical cyclone track and intensity. *Monthly Weather Review*, 142, 49–71.
- Xiao, Q., X. Zhang, C. Davis, J. Tuttle, G. Holland, and P. J. Fitzpatrick, 2009: Experiments of hurricane initialization with airborne Doppler radar data for the advanced research hurricane WRF (AHW) model. *Monthly Weather Review*, 137, 2758–2777.

- Yu, C.-K., and L.-W. Cheng, 2008: Radar observations of intense orographic precipitation associated with Typhoon Xangsane (2000). *Monthly Weather Review*, 136, 497–521.
- Yu, C.-K., and L.-W. Cheng, 2013: Distribution and mechanisms of orographic precipitation associated with Typhoon Morakot (2009). *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70, 2894–2915.
- Yu, C.-K., and L.-W. Cheng, 2014: Dual-Doppler-derived profiles of the southwesterly flow associated with southwest and ordinary typhoons off the southwestern coast of Taiwan. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71, 3202–3222.
- Zhang, F., 2011: The future of hurricane prediction. *Computing in Science and Engineering*, 13, 9–12.
- Zhang, F., and C. Snyder, 2007: Ensemble-based data assimilation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 565–568.
- Zhang, F., C. Snyder, and J. Sun, 2004: Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 132, 1238–1253.
- Zhang, F., and Y. Weng, 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, 25–33.
- Zhang, F., Y. Weng, J. F. Gamache, and F. D. Marks, 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, L15810, doi: 10.1029/2011GL048469.
- Zhang, F., Y. Weng, J. A. Sippel, Z. Meng, and C. H. Bishop, 2009: Cloud-resolving hurricane initialization and prediction through assimilation of Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 137, 2105–2125.
- Zhang, L., Z. Pu, W.-C. Lee, and Q. Zhao, 2012: The influence of airborne Doppler



- radar data quality on numerical simulations of a tropical cyclone. *Weather and Forecasting*, 27, 231–239.
- Zhang, Q., L. Wu, and Q. Liu, 2009: Tropical cyclone damages in China 1983–2006. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90, 489–495.
- Zhao, K., X. Li, M. Xue, B. J.-D. Jou, and W.-C. Lee, 2012a: 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*, 117, D06108, doi: 10.1029/2011JD017109.
- Zhao, K., and M. Xue, 2009: Assimilation of coastal Doppler radar data with the ARPS 3DVAR and cloud analysis for the prediction of Hurricane Ike (2008). *Geophysical Research Letters*, 36, L12803, doi: 10.1029/2009GL038658.
- Zhao, K., M. Xue, and W.-C. Lee, 2012b: Assimilating 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, 1055–1071.
- Zhao, Q., and Y. Jin, 2008: High-resolution radar data assimilation for Hurricane Isabel (2003) at landfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89, 1355–1372.
- Zhu, L., Q. Wan, X. Shen, Z. Meng, F. Zhang, Y. Weng, J. Sippel, Y. Gao, Y. Zhang, and J. Yue, 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, 21–43.

## 致谢

值此论文完成之际，回想这些年的博士生涯，心里感慨万千，在此向所有关心、鼓励和帮助过我的人献上最真挚的感谢！

特别感谢我的导师孟智勇老师。感谢孟老师多年来对我在科研上的培养和生活中的帮助！孟老师认真严谨的科研态度和缜密的逻辑思维一直是我学习的榜样。孟老师不仅通过组会和每周讨论为我的科研工作指明方向并提出宝贵建议，还给我提供了大量的交流机会，让我参加了许多国内外的学术会议和暑期学校，开阔了我的科研思路并锻炼了我的表达能力。工作之余，孟老师还经常与我们一起打球、出游，让我们在好好学习的同时也拥有了健康的身体。在此向孟老师致以最诚挚的谢意！

感谢我的父母和爱人。在漫漫求学路上，每当我遇到挫折时，父母都会对我耐心开导，不断鼓励，甚至不远千里来到我的身边，帮助我一次又一次地从低谷中走出。感谢我的丈夫夏炎对我在科研上的帮助和生活上的鼓励，你的支持是我前进的动力，你的陪伴让我的攻博之路变得越来越充实、快乐。

还要感谢那些一起渡过博士求学生涯以及给予我鼓励和帮助的兄弟姐妹们，你们的关心和支持让我在北大渡过了难忘而快乐的时光，希望你们在今后的生活中一切顺利。感谢李成才老师、朱晋玄和金亦帅为本文的完成提供良好便利的工作环境。感谢台湾大学的游政谷老师和郑凌文提供台湾雷达的观测数据和技术支持。感谢北京大学大气与海洋科学系对我的培养。

