

# 不同同化方案在台风“白鹿”强降水预报中的应用\*

梁钧怡<sup>1,2,3</sup>, 王东海<sup>1,2</sup>, 张宇<sup>4</sup>, 姚乐宝<sup>1,5</sup>

1. 中山大学大气科学学院 / 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 广东 珠海 519082
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082
3. 佛山市气象局, 广东 佛山 528000
4. 广东海洋大学南海海洋气象研究院, 广东 湛江 524088
5. 内蒙古自治区气象台, 内蒙古 呼和浩特 010051

**摘要:** 基于 WRF 模式和 GSI 同化系统, 构建了一套同化预报系统, 研究常见的两种同化方法 3DVar(three-dimensional variational)和 3DEnVar(three-dimensional ensemble-variational)的应用, 开展不同的嵌套区域采用不同的同化方法对模式预报效果的影响研究。基于本系统, 分别设计三组试验, 评估不同的同化方案对 2019 年 8 月第 11 号台风“白鹿”在华南地区造成强降水的模式预报和分析同化效果。个例试验结果表明: 在双层嵌套模式中, 两层均采用 3DVar 同化方法的试验对“白鹿”登陆前后所带来的小雨、中雨量级降水落区的模拟存在优势; 而两层均采用 3DEnVar 同化方法的试验则对强降水落区和强度预报把握度更好, 特别是对暴雨、大暴雨等强降水事件中心位置的模拟与实况更接近, 且降水评分最优。此外, 3DEnVar 同化方法所构建的背景误差协方差具有明显的流依赖特性, 并且对形成强降水的相关气象要素场包括垂直风场、温度场和湿度场的预报中均有较好的表现。

**关键词:** 三维变分同化; 三维集合变分混合同化; WRF-GSI 预报系统; 台风降水; 台风“白鹿”

**中图分类号:** P445 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2022)04-0104-15

## The application of different data assimilation systems in Typhoon “Bailu” rainstorm forecast

LIANG Junyi<sup>1,2,3</sup>, WANG Donghai<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu<sup>4</sup>, YAO Lebao<sup>1,5</sup>

1. School of Atmospheric Sciences / Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
3. Meteorological Bureau of Foshan, Foshan 528000, China
4. South China Sea Institute of Marine Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China
5. Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Centre, Hohhot 010051, China

**Abstract:** The WRF model and the GSI assimilation system were used to build an assimilation prediction system regarding problems of data application and forecasting effect between the 3DVar data assimilation and the 3DEnVar(Hybrid) data assimilation. Based on this system, three tests of comparative experiments were designed to perform simulation analysis and assessment of these two data assimilation systems.

\* 收稿日期: 2021-03-12

录用日期: 2021-07-26

网络首发日期: 2021-11-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1510400); 国家自然科学基金(41861164027, 41775097); 广东省科技计划(2017B020244002)

作者简介: 梁钧怡(1996年生), 女; 研究方向: 中小尺度天气学; E-mail: liangjy76@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 王东海(1965年生), 男; 研究方向: 中小尺度天气动力学; E-mail: wangdh7@mail.sysu.edu.cn

lation methods on a case of heavy rain process caused by Typhoon "Bailu" in August 2019. The results show that: 1) In the scheme of using 3DVar assimilation with two nested domains, there is an advantage in simulating the approximate distribution of rainfall; and it can capture the location of the light rain and moderate rain. 2) Using 3DEnVar (Hybrid) assimilation with two nested domains can effectively improve the accuracy of the center position of typhoon rainstorms and the forecasted positions are closer to the actual situation. 3) The 3DEnVar(Hybrid) assimilation has obvious flow dependence on the background field; meanwhile, the simulations of related tactics such as wind vector, temperature, and humidity that form heavy rainfall are more accurate.

**Key words:** 3DEnVar(Hybrid) data assimilation; 3DVar data assimilation; WRF-GSI system; typhoon rainfall; Typhoon Bailu

随着数值天气预报理论和应用技术的蓬勃发展, 推进现代天气预报能力的大步前进, 在预警预报和气象服务中发挥着重要的作用<sup>[1]</sup>。我国数值天气预报研究和业务应用一直受到高度重视, 在理论、方法和数值模式研究方面存在广泛的国际影响, 随着灾害性重大天气预警预报水平的不断提高, 不断实现从传统简单的预警预报迈向更准确及时、更精细、多时空尺度转变<sup>[2]</sup>。而对于台风、飕线、暖区暴雨等中尺度天气过程的数值模拟和预报仍然面临着巨大的挑战。如何充分地、有效地利用多种观测资料 and 不同同化方法, 获取更准确的模式初始场, 更有效地提高预报效果, 已成为提高中尺度数值预报水平的关键问题。

与此同时, 随着气象卫星观测技术的快速发展, 越来越多样化的气象卫星观测资料将更有效地应用到数值模式中, 对调整模式初始场和改善模式预报效果蕴含着巨大的潜力, 这对资料同化技术的发展十分重要<sup>[3]</sup>。资料同化技术可以更好地融合背景场与观测资料, 有利于获得更精确的模式初始场, 是目前数值预报研究中的一个非常关键的技术之一<sup>[4]</sup>。而目前的数值天气预报模式与不同的同化系统相结合, 比如 APRS 同化系统的 ADAS 云分析模块就重点考虑冰向水凝物对反射率贡献<sup>[5]</sup>, WRFDA 同化模块则包括了从数据预处理到后处理预报检验的整个过程<sup>[6-7]</sup>以及使用的 GSI 格点分析系统, 可以同化常规和非常规观测两大类资料<sup>[8]</sup>。众多研究已表明基于 3DVar 同化方法的卫星微波观测资料同化, 对提高暴雨、台风等灾害性天气的预报水平有明显的正贡献<sup>[9]</sup>。已有的研究中, 多使用 3DVar 同化方法来同化雷达反射率和径向风观测资料, 并应用于业务预报系统以改进中小尺度气象要素场, 进一步提高短临预报效果<sup>[10-11]</sup>。但是 3DVar 同化方法本身存在明显的局限

性, 其背景误差协方差是静态的, 而实际的大气环境中背景误差协方差则是随大气状态动态演变的<sup>[12]</sup>。而集合预报可以给出预报不确定性的分布, 减小了初始条件不确定性与模式不确定性对数值预报结果的影响<sup>[13]</sup>。然而单纯的集合同化也存在不足之处, 同化效果依赖于集合成员的质量, 所构造的集合能否使得集合方差体现实际误差协方差的分布是同化效果的关键。因此, 针对变分同化和集合同化的各自优缺点, 将二者有机结合起来, 3DEnVar 同化方法有效地引入了具有“流依赖”属性背景误差协方差的同时也继承了 3DVar 框架的优势<sup>[14]</sup>, Hamil 等<sup>[15]</sup>将 EnKF 和 3DVar 同化方法相结合, 将背景误差协方差构建为 3DVar 的静态背景误差协方差与集合预报估计的动态背景误差协方差的线性组合。随着方法的逐步成熟, 针对变分同化和集合同化的各自优缺点在不断完善。Wang 等<sup>[16]</sup>和 Li 等<sup>[17]</sup>的研究表明采用 3DEnVar 同化方法获取的分析场优于仅应用 3DVar 同化方法的结果, 在资料稀缺区域和对流层上层优化效果明显。然而, 目前混合同化研究正在不断深入, 在多个个例模拟研究中证明了混合同化方法仍存在不确定性, 优缺点并存。针对台风预报, En3DVar 同化模拟雷达资料能有助于初始化台风, 为下一步真实多普勒雷达观测资料在台风的初始化和集合预报的研究工作提供了技术支撑<sup>[18-20]</sup>。黄江平等<sup>[21]</sup>和 Xu 等<sup>[22]</sup>采用 GTS 观测资料和 NOAA 卫星资料对台风个例进行分析同化, 结果表明混合同化方法在台风路径和强度模拟方面均有明显改进。目前 3DVar 和混合同化方法仍然是资料同化领域的热点和主要研究方向, 对改善预报效果都需要进行深入的探讨<sup>[23]</sup>。

本文将简要介绍基于 WRF 模式和 GSI 同化所搭建的同化预报系统, 分别采用 3DVar 和 3DEnVar

两种同化方法,对台风“白鹿”个例进行模拟,拟设计三组敏感性试验,并检验在台风型强降水预报中的分析同化效果,针对特定时刻的降水情况进行分析并且选用TS评分等常规方法进行对比,以及探讨同化对温、湿、风场的改进情况。以更好地评估不同同化方法对该天气系统的模拟效果之间的异同,为优化台风等强天气系统的预报系统提供一定的参考经验。

## 1 同化系统和试验设计

### 1.1 同化预报系统

本文使用的同化预报系统由WRF模式4.0版本和GSI同化系统3.5版本搭建,形成一套涵盖资料处理、同化系统、预报系统和后处理系统的多模块预报系统。研究模拟区域设置如图1所示。同化试验采用双层嵌套设置,水平格点分辨率为第一层区域(d01区域)为12 km,第二层嵌套区域(d02区域)为4 km,其中d01区域包含了我国大部分华南地区,d02则包含了本次系统的主要影响地区。d01区域水平格点数为95×121,d02区域水平格点数为115×157,采用地形追随垂直坐标,垂直层数为50层,模式顶高取50 hPa。

另外,本文三组试验均使用了相同的模式设

置,其中,WRF模式的固定积分步长为30 s,参数化方案包括:Thompson微物理过程方案,Grell-Freitas积云参数化方案,RRTMG长波辐射方案,RRTMG短波辐射方案,YSU边界层方案,Revised MM5 Monin-Obukhov近地面层方案和Noah陆面过程方案。这组参数设置的根据是以华南地区以及广东沿海热带气旋降水为主。

基于上述模式设置,针对3DVar和3DEnVar(Hybrid)同化方法,共设计了三组敏感性试验验证同化效果(见表1)。

根据预报系统和试验设计,完整的试验流程见图2,在2019年8月25日00时(UTC,下同)起报,预报时长为36 h。本文采用了循环同化方式,在2019年08月25日00时刻进行模式的冷启动,06~12时(逐6 h)进行循环同化(循环同化间隔6 h),其中12时进行循环同化后向后预报24 h。

表1 同化试验名称及设计方案

Table 1 The data assimilation tests and their schemes setting

试验名称	d01区域	d02区域
3DVar_3DVar	3DVar	3DVar
Hybrid_3DVar	3DEnVar	3DVar
Hybrid_Hybrid	3DEnVar	3DEnVar

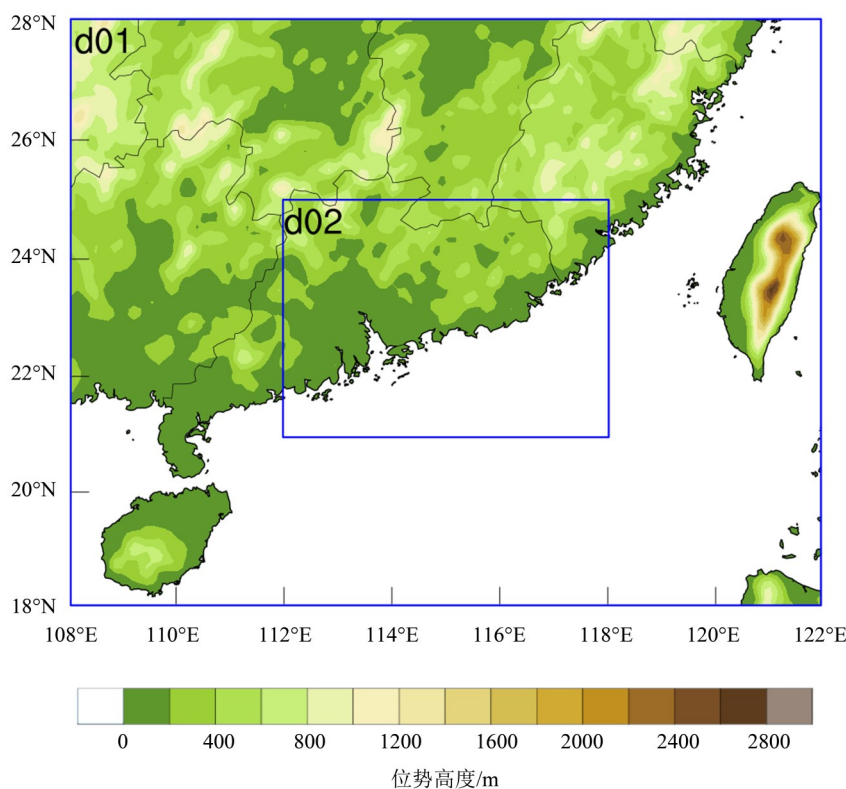


图1 分为外层d01和嵌套内层d02两区域的模式区域设置

Fig. 1 Simulation region setting of WRF model with outer domain d01 and inner domain d02

本文采用的3DEnVar(Hybrid)同化方法中所选用的20个集合成员, 是利用GEFS(global ensemble forecast system)全球集合预报系统格点集合预报资料采用动力降尺度后结合多物理参数化方案

从25日00时向后预报12 h生成的, 其目的在于给循环同化的过程中进行为3DEnVar(Hybrid)同化提供集合预报成员, 具体的多物理参数化方案组合见表2。

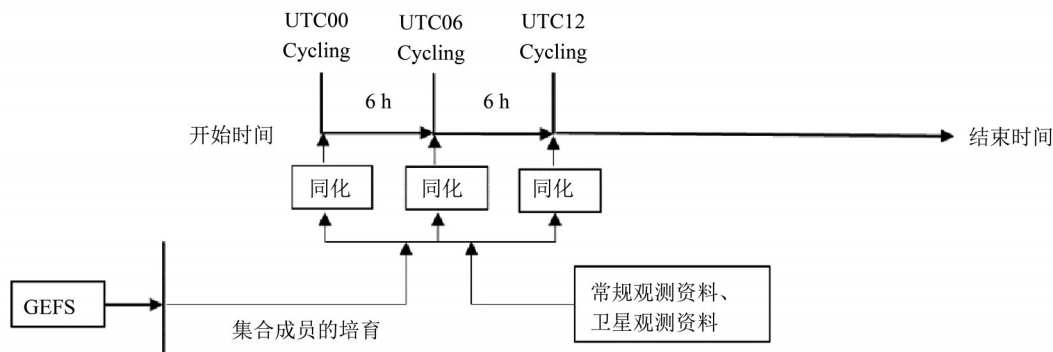


图2 试验流程图

Fig. 2 Flow chart of experiments

表2 20个集合成员的物理参数化方案

Table 2 Physical parameterization scheme designs of 20 ensemble members

集合成员	微物理过程	积云参数化	长波辐射	短波辐射	边界层	近地面层	陆面过程
1	WDM6	KF	RRTMG	RRTMG	YSU	MM5-MO	Noah
2	Thompson	BMJ	GFDL	GFDL	MYJ	MOJ	Noah
3	Morrison	GF	CAM	CAM	MYNN	MYNN	Noah
4	WDM6	BMJ	RRTMG	RRTMG	YSU	MM5-MO	Noah
5	Thompson	GF	GFDL	GFDL	MYJ	MOJ	Noah
6	Morrison	KF	CAM	CAM	MYNN	MYNN	Noah
7	WDM6	GF	RRTMG	RRTMG	YSU	MM5-MO	Noah
8	Thompson	KF	GFDL	GFDL	MYJ	MOJ	Noah
9	Morrison	BMJ	CAM	CAM	MYNN	MYNN	Noah
10	WDM6	KF	CAM	CAM	YSU	MM5-MO	Noah
11	Thompson	BMJ	RRTMG	RRTMG	MYJ	MOJ	Noah
12	Morrison	GF	GFDL	GFDL	MYNN	MYNN	Noah
13	WDM6	BMJ	CAM	CAM	YSU	MM5-MO	Noah
14	Thompson	GF	RRTMG	RRTMG	MYJ	MOJ	Noah
15	Morrison	KF	GFDL	GFDL	MYNN	MYNN	Noah
16	WDM6	GF	CAM	CAM	YSU	MM5-MO	Noah
17	Thompson	KF	RRTMG	RRTMG	MYJ	MOJ	Noah
18	Morrison	BMJ	GFDL	GFDL	MYNN	MYNN	Noah
19	WDM6	GF	CAM	CAM	YSU	MM5-MO	Noah
20	Morrison	KF	RRTMG	RRTMG	MYJ	MOJ	Noah

### 1.2 数据资料

在模式预报过程中使用GFS(global forecast system)全球模式预报数据场作为背景场提供初始和边界条件、在同化过程中利用常规观测资料、

卫星观测资料作为同化资料改进初始场。试验使用的观测和卫星资料, 包括全球常规观测资料(PrepBUFR数据)、高分辨率红外探测数据(HIRS4和HIRS3数据)、先进的微波探测器A型数

据(AMSU-A数据)。

而对模拟结果的评估检验所使用的地面气象观测资料来源于国家气象信息中心的逐小时数据集,时段为2019年8月25~26日,由国家站及区域站组成。为了弥补常规实况观测资料的不足,本文采用中国自动站与CMORPH降水产品融合的逐时降水量网格数据集。中国自动站与CMORPH降水产品融合的逐时降水量网格数据集(1.0版)的空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。同时,利用ERA5再分析数据集进行相关气象要素的对比以分析降水原因,其分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,时空分辨率为60 min。

## 2 结果与分析

### 2.1 个例介绍

本文所研究个例为2019年第11号台风“白鹿”(强热带风暴级),台风中心于8月25日8时在福建省东山县沿海登陆,登陆时中心附近最大风力10级(风速约25 m/s),中心最低气压为988 hPa。受台风“白鹿”影响,降水覆盖广泛,中央气象台发布台风蓝色预警,福建和广东的部分地区及珠江口沿海地区达到暴雨。台风登陆后,华南地区受强尾流的影响,多地出现大到暴雨天气过程,其中广东东部地区大暴雨(降雨量超过25 mm/h),北部和南部沿海出现局地特大暴雨(超过50 mm/h)。台风“白鹿”生成时间不长,强度不大,但由于结构松散,强大的外围云系覆盖广;低层存在的强度较大的东南急流将南海的充沛水汽不断向广东地区输送造成强大的尾流,同时登陆地区附近的地区存在冷中心,结合了地形抬升和海陆热力差异的各类因素,对本次广东地区的降水条

件都非常有利。“白鹿”对广东地区的降水具有正贡献,同时一般的模式预报对降水落区和强度的预报效果存在不足,因此针对该个例开展资料同化的应用研究,更好地评估不同同化方法的优劣,是进一步改进模式预报和提高预报效果的重要方面。

### 2.2 同化增量分析

在台风“白鹿”的预报过程中,为了更好地对不同的同化方案的效果展开分析,首先对风场、温度、湿度等气象要素场的同化增量进行对比,分析三组同化方案对气象要素场的调整效果。在2019年08月25日00时刻第一次冷启动同化时,三组试验的背景场一致,当d01和d02区域采用相同的同化方法时,三组试验的分析增量大小和分布高度相似,分析增量的最大值所在垂直层也相同(图略)。第二循环同化后,使用3DEnVar(Hybrid)同化方式的4个变量的流依赖特征比冷启动时更加明显,其流依赖性与实际天气形势吻合(图略)。而在25日12时进行第3次热启动循环同化时,给出了扰动位温、U风分量、V风分量和水汽混合比最大增量值和对应的垂直层(见表3),从表3中三次循环同化的分析增量可以看出,采用3DEnVar(Hybrid)同化方法的试验,其分析增量具有明显的流依赖特征。此外,虽然试验Hybrid\_3DVar和试验Hybrid\_Hybrid在d01区域均采用3DEnVar(Hybrid)同化方式,但两个试验在d02区域采用的同化方法不同,会由于两个区域的相互反馈作用,导致两个试验在d01区域产生的分析增量不完全一致,且这种现象随着循环同化次数的增加愈发明显。

表3 第三次启动同化后扰动位温、U风分量、V风分量和水汽混合比最大增量值以及其所在的垂直层  
Table 3 The maximum increment of perturbation potential temperature, U-wind component, V-wind component and water vapor mixing ratio in the third assimilation and their vertical layer

重要因素	模式区域	3DVar_3DVar 试验		Hybrid_3DVar 试验		Hybrid_Hybrid 试验	
		最大值	垂直层	最大值	垂直层	最大值	垂直层
扰动位温/K	d01	1.37	35	7.09	44	2.11	44
	d02	0.98	47	5.58	47	2.55	44
U风分量/(m·s <sup>-1</sup> )	d01	9.87	8	9.60	32	9.88	34
	d02	8.67	9	7.18	9	10.09	34
V风分量/(m·s <sup>-1</sup> )	d01	12.67	34	7.05	10	7.50	10
	d02	7.67	34	5.68	12	8.86	9
水汽混合比/(g·kg <sup>-1</sup> )	d01	3.73	5	2.36	0	3.49	6
	d02	3.64	5	1.81	5	2.63	5

### 2.3 降水预报结果分析

**2.3.1 模拟结果和降水实况的逐小时比** 本研究选取台风“白鹿”登陆过程中降水在广东省的主要影响地区, 从2019年8月25日00时(UTC, 下同)起, 主要降水过程发生在广东省大部分地区, 集中在珠三角地区以及广东北部和东部。对广东陆地区域降水平均得到整个预报过程(36 h)的平均降水随时间的变化情况(图3), 并清楚给出强降水发生的时刻, 以及逐小时的区域平均降水量的变化趋势。由图可以看出预报过程中, 第6~10 h的逐小时平均降水量迅速增加, 第10 h整个区域的每小时平均降水量超过6 mm, 之后雨量呈波动型减弱。同时有3个时刻发生强降水过程, 分别是第10 h(25日10时)每小时降水量超过6 mm, 第13 h(25日13时)和第15 h(25日15时)每小时降水量在5 mm以上, 其中15 h是台风“白鹿”强尾流带来的一次较大的强降水。第1~4 h三组试验均存在预报偏强的现象, 第5~11 h试验预报大致情况与实况相一致, 呈现一个降水量大幅上升的趋势, 第12~15 h试验3DVar\_3DVar预报的平均降水量更加接近实况数据, 第17~30 h试验Hybrid\_Hybrid的预报变化趋势与实况更符合, 但三组试验均与实况开始存在波动性的差异, 其中主要的原因可能是模式预报在不断进行时间积分的过程中同化效

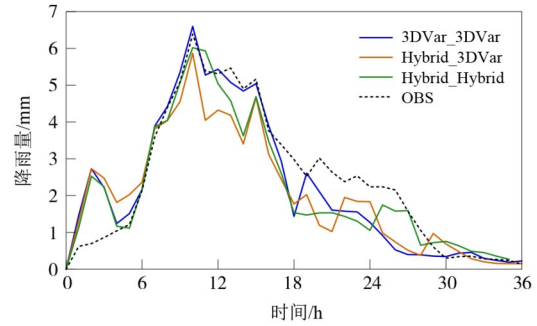


图3 广东地区的逐时平均降水演变图

Fig. 3 Hourly evolution of average precipitation in Guangdong

果会弱化, 以及模式本身会随积分时长变长导致预报效果逐渐变差。为此, 接下来将对这三个时刻的强降水预报效果进行更加深入的分析。

在“白鹿”登陆后, 25日10时中国融合数据集与三组试验方案预报结果的逐小时降水量进行对比(图4)。起报后的第10 h的逐小时累积降水中, 试验3DVar\_3DVar对台风降水的位置模拟效果更有优势, 对降水区域的预报更接近实际情况, 整个台风外围降水圈基本能够给出较好预报, 但对整个雨带的模拟效果与实况对比较为分散, 且对广东内陆小雨到中雨位置的预报欠佳。另外, 在试验Hybrid\_Hybrid中, 雨带降水的模拟比较集中, 但对于广东北部降水大值区的模拟强度偏小。

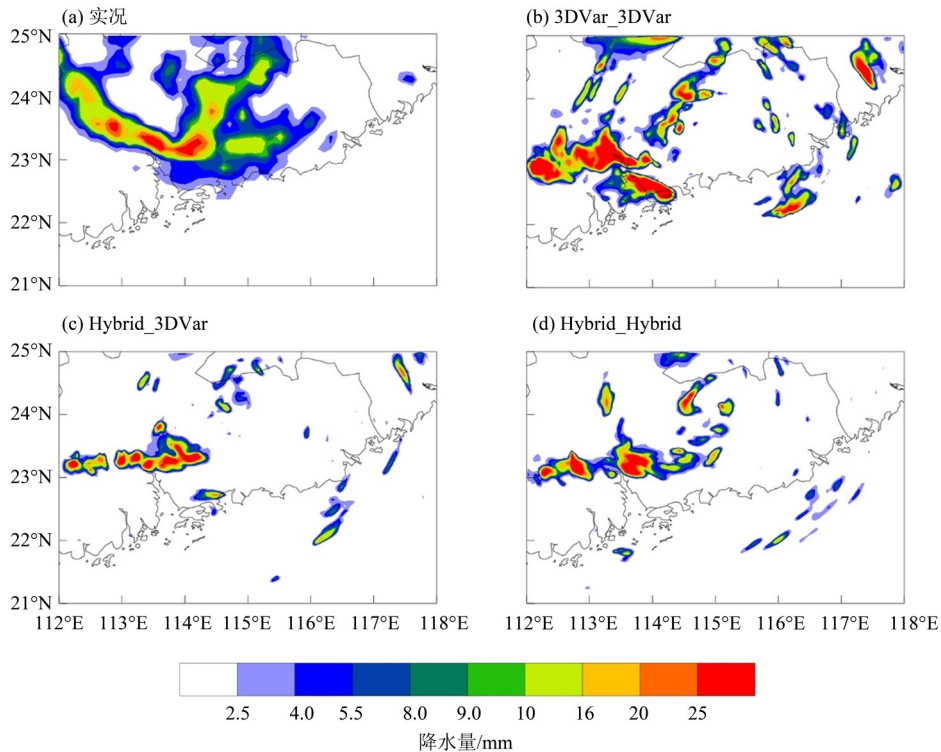


图4 2019年8月25日10时d02区域实况和三组同化试验的逐时降水量(mm)

Fig. 4 The actual and three tests hourly precipitation(mm) in d02 at 10:00 UTC 25th August, 2019

在 25 日 13 时的逐小时降水量的预报情况中(图 5),可以看出,试验 3DVar\_3DVar 对降水范围的模拟比较贴合实际,大部分降水落区都能较好地呈现,表明它能够较好地预报出本次过程的降水落区分布。而试验 Hybrid\_Hybrid 在该时刻模拟

的降水区域位于广东东北部,其降水大值区域的位置和强度模拟比较准确。试验 Hybrid\_Hybrid 和试验 Hybrid\_3DVar 均运用了 3DEnVar(Hybrid)同化,该同化方法会在模拟过程中对一些降水量不大的位置的预报并不明显。

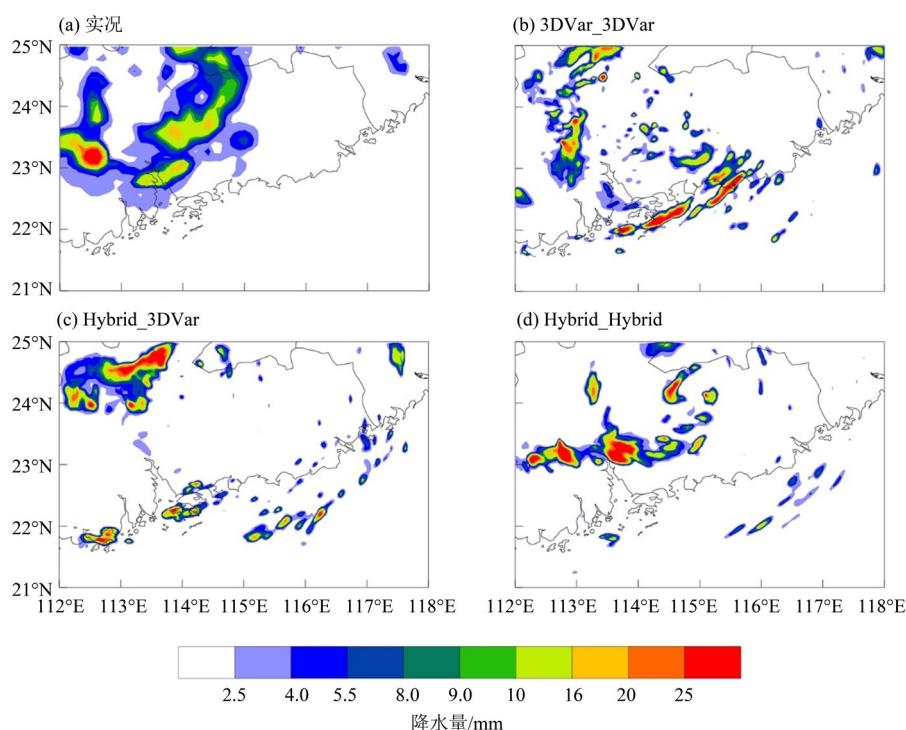


图 5 2019 年 8 月 25 日 13 时 d02 区域实况和三组同化试验的逐时降水量 (mm)

Fig. 5 The actual and three tests hourly precipitation(mm) in d02 at 13:00 UTC 25th, August 2019

“白鹿”不断移动,整个外围环流控制着广东上空。在 25 日 15 时的降水预报中能够发现,在“白鹿”登陆后,其外围雨圈会出现一次较大的降水过程,因此着重分析该时刻模式对广东东北部的降水落区的预报情况。从图 6 可以看出,试验 3DVar\_3DVar 能够较好地模拟出北部的降水圈,并且很好地模拟出部分小雨到中雨的位置,但会出现降水强度模拟过强且范围过小的情况。而试验 Hybrid\_Hybrid 和试验 Hybrid\_3DVar 同样选用了 Hybrid 同化,因此对降水大值区的位置模拟得更好,特别是两层区域均使用 3DEnVar(Hybrid)同化的方案,对最大降水区域的强度和位置的预报更加精确,说明了 Hybrid 同化对改善模式模拟最大降水位置会有所帮助。

**2.3.2 模式预报结果和自动站的降水实况的 6 h 和 12 h 累计降水对比** 在整个登陆过程中,尽管“白鹿”在广东和福建交界登陆但仍给广东地区带来的降水充沛,特别是广东东北部和大湾区范围。图 7 为三组试验在 25 日 12~18 时的 6 h 累积降水预

报结果与实况数据的对比,可以看出 6 h 累积降水中心主要集中在广东中北部和汕尾一带海岸线上,雨量大约在 25.0 mm 以上,局部区域达 50.0 mm 以上。试验 3DVar\_3DVar 对广东东北部的强降水中心落区偏北,试验 Hybrid\_Hybrid 能大致呈现强降水中心的落区,预报强度偏强,而试验 Hybrid\_3DVar 中预报的降水区域比较分散,但对降水强度的预报与实况对比较为符合。另外,三组试验都能大致预报出沿汕尾一带海岸线的降水分布,而试验 3DVar\_3DVar 预报的降水区域与中国融合数据的分布情况更为相似,但强度与实况数据对比偏强,试验 Hybrid\_Hybrid 对该处的降水强度预报效果更优。

另外,在对比 12 h 累积降水结果中,发现其大部分降水量在 30.0 mm 以上,局部区域达 100.0 mm 以上(图 8)。对于试验 3DVar\_3DVar,降水中心的位置与实况数据对比偏西北方,而试验 Hybrid\_3DVar 和试验 Hybrid\_Hybrid 预报的最大降水中心位置与实况位置对比较准确,且试验 Hy-

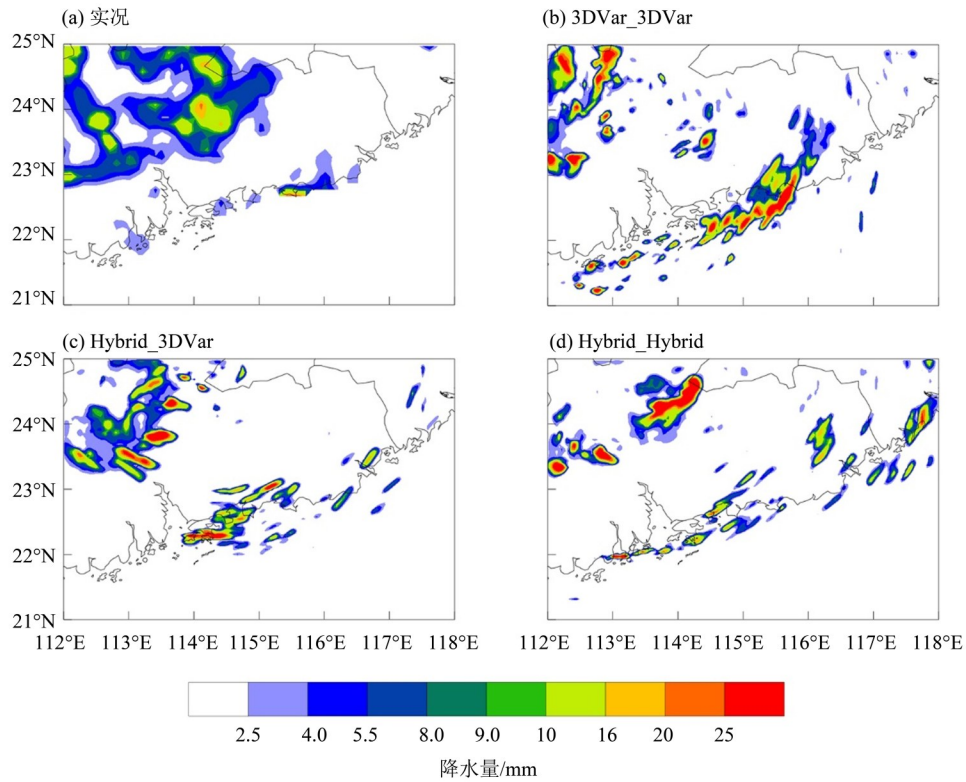


图 6 2019年8月25日15时d02区域实况和三组同化试验的逐时降水量(mm)

Fig. 6 The actual and three tests hourly precipitation(mm) in d02 at 15:00 UTC 25th August,2019

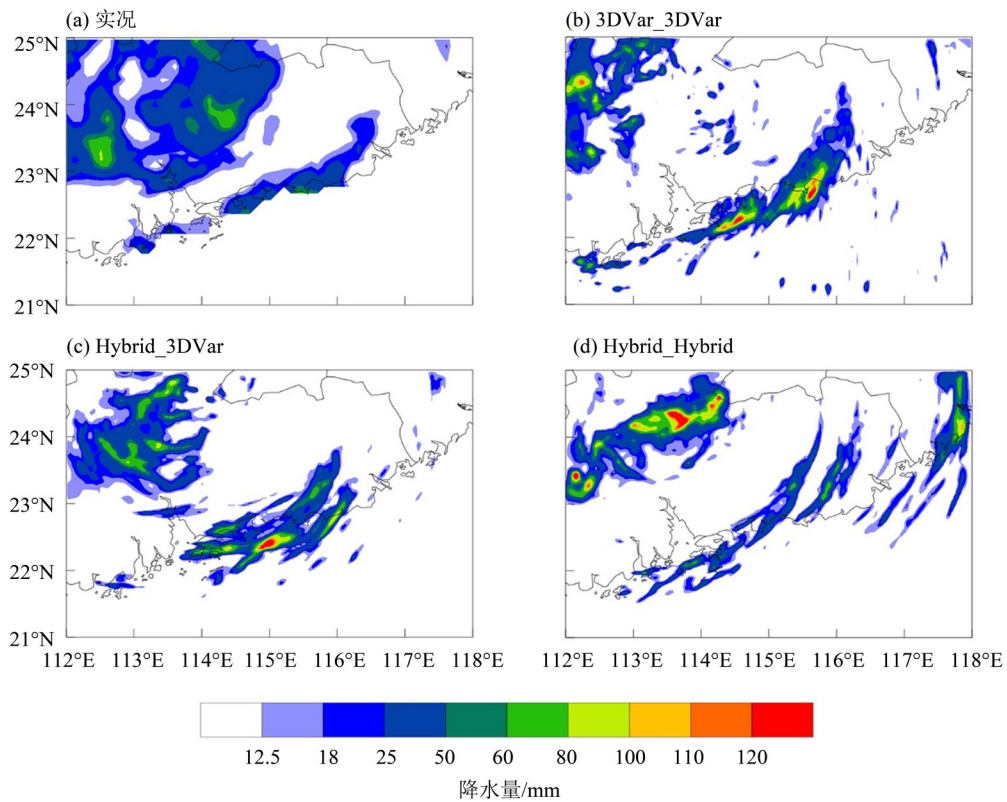


图 7 2019年8月25日13~18时d02区域实况和三组同化试验的6h累积降水量(mm)

Fig. 7 The actual and three tests 6-h accumulated precipitation(mm) in d02 from 13:00 UTC to 18:00 UTC 25th August,2019

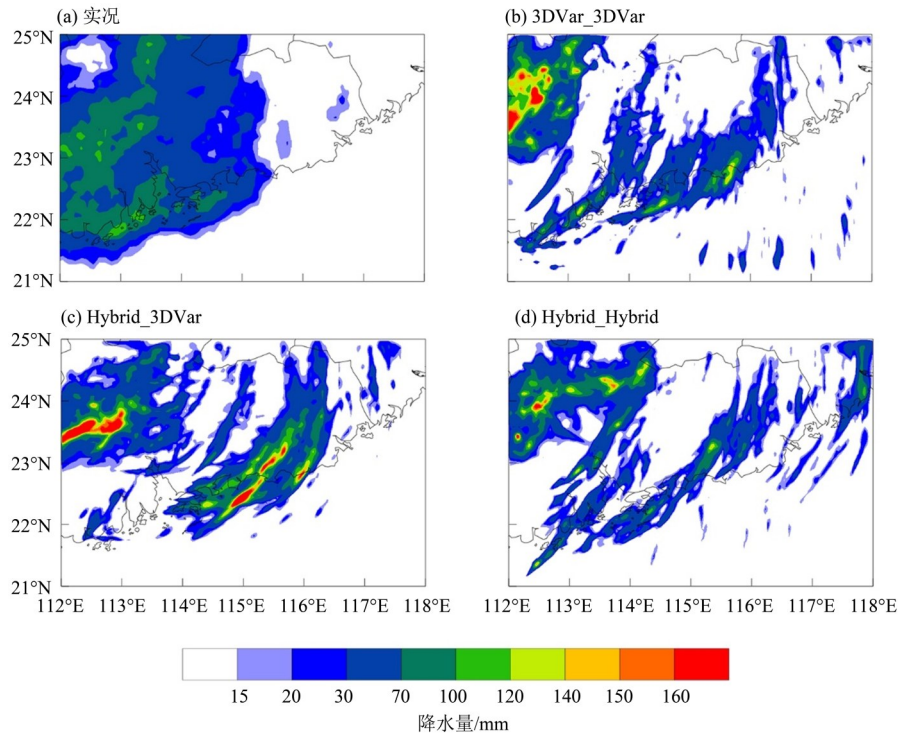


图 8 2019年8月25日13时~26日00时d02区域实况和三组同化试验的12 h累积降水量(mm)  
Fig. 8 The actual and three tests 12-h accumulated precipitation(mm) in d02  
from 13: 00 UTC 25th to 00:00 UTC 26th August, 2019

brid\_Hybrid对位于广东中北部地区的强降水带的位置预报更优。针对降水强度而言, 试验 Hybrid\_Hybrid的模拟效果更好, 其他同化方案均出现模拟过强的现象, 因此该试验方案对于预报最大降水中心的强度有一定参考意义。三组试验在预报强降水中心的量级时存在预报过强的情况, 这也反映出预报系统在预报过程中的不足之处。同时, 再次说明不同的同化方案会对模式预报降水大致分布和强度时带来不同程度的影响, 因此后续可能需要开展多个典型个例的研究, 进一步研究不同同化方案的优劣。

**2.3.3 预报评分** 对模拟台风“白鹿”带来的降水过程的TS评分总体情况如图9。由图9可以看出, 在第二层嵌套区域(d02)的TS评分结果中, 发现三组试验在对6、12和24 h累积降水预报结果评分大致相似, 这也可能是由于d02区域的自动站点数据不足, 区域中包含的中国地面站点资料密度偏小, 导致三者之间差异不大。但是总体而言, 对于6和12 h的累积降水模拟与实况对比, 试验 Hybrid\_Hybrid的TS评分稍占优势, 而试验 3DVar\_3DVar对24 h的累积降水评分较高, 达到0.53。就此进一步对第一层区域(d01)和第二层嵌套区域(d02)做准确率、虚报率、误报率、偏差评分以及优势评分。图10中第1列为d01区域三组试验的模拟结果

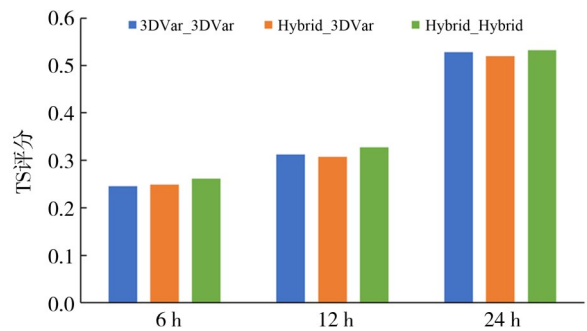


图 9 2019年8月25日12时启动模拟后d02区域的6、12和24 h的TS评分

Fig. 9 The 6,12 and 24 h accumulated precipitation TS scores in d02 after starting forecast at 12 00 UTC 25th August, 2019

与实况降水的5个指标, 模式预报6和12 h累积降水的结果中, 试验 Hybrid\_Hybrid的准确率最高, 分别占49.58%和51.75%, 同时虚报率和误报率最低, 偏差评分较大, 达3.19和2.56, 在优势评分上也稍占优势。而模式预报24 h累积降水结果中, 试验 3DVar\_3DVar的准确率较高分别占58.95%, 同时虚报率和误报率相对较低, 偏差评分中试验 3DVar\_3DVar和试验 Hybrid\_Hybrid都达到1.73, 但优势评分中试验 3DVar\_3DVar较高, 达到0.76。另外, d02区域的结果为图10中第2列, 预报6 h

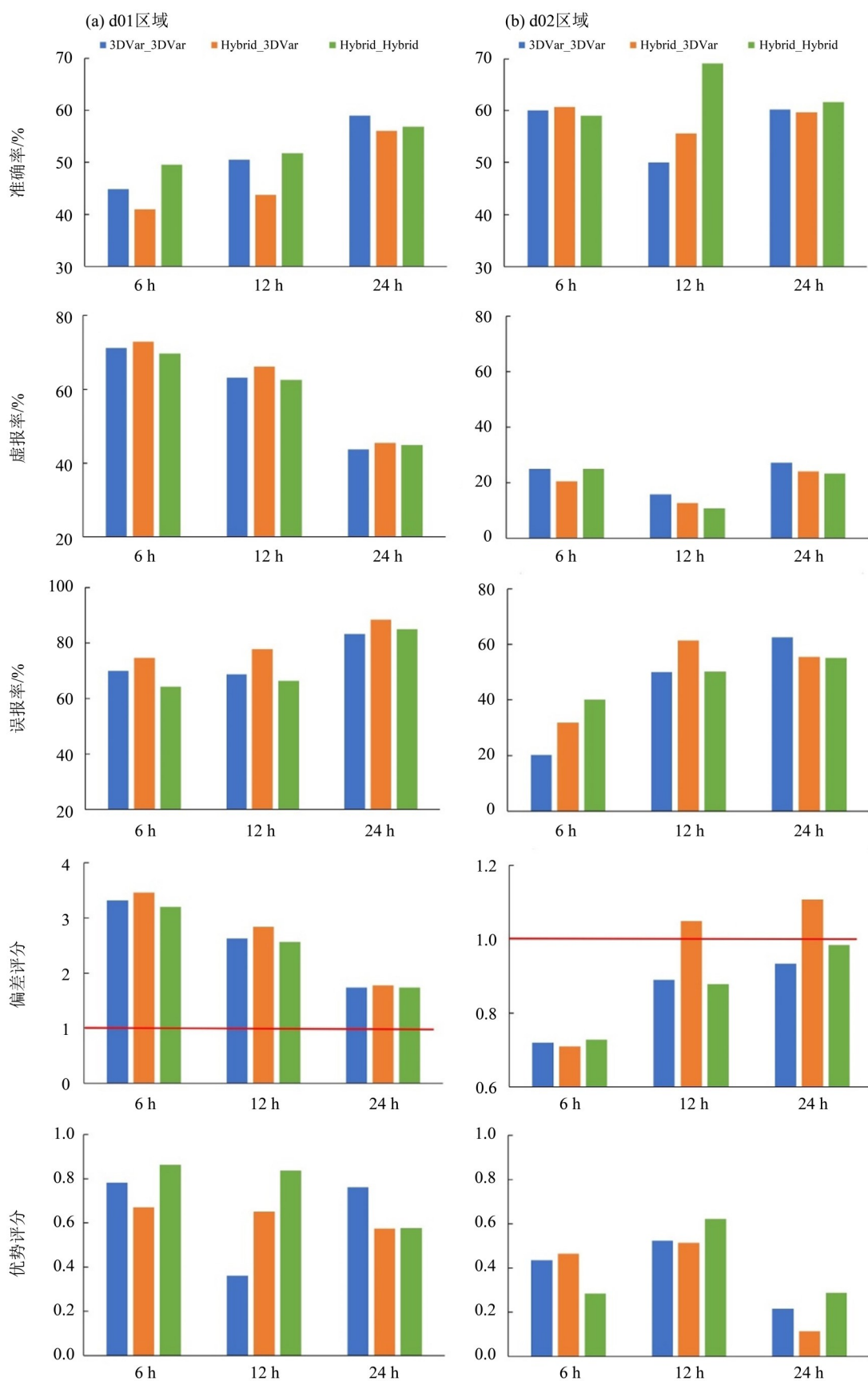


图 10 2019 年 8 月 25 日 12 时启动模拟后 d01 和 d02 区域的 6、12 和 24 h 预报指标

Fig. 10 The 6, 12, and 24 h accumulated precipitation factors in d01 and d02 after starting forecast at 12:00 UTC 25th August, 2019

累积降水的效果时, 试验 3DVar\_3DVar 和试验 Hybrid\_3DVar 的预报准确率较高, 分别占 60% 和 60.7%, 两者偏差评分相同, 优势评分中试验 Hybrid\_3DVar 的评分稍高。而预报 12 h 和 24 h 累积降水结果对比, 试验 Hybrid\_Hybrid 的准确率较高, 占 69.1%, 但误报率较大说明对降水分布预报存在不足, 同时优势评分高, 说明该试验方案对 d02 区域的降水预报中优势仍然存在。基于以上分析, 三组试验在 d02 区域预报降水大致情况均在评分中表现得差异并不大, 但仍然能分析出试验 Hybrid\_3DVar 针对 6 h 的评分稍高, 且试验 Hybrid\_Hybrid 在模式预报区域中对 12 h 和 24 h 的降水效果更准确, 说明本系统对台风带来的强降水预报中, 这两组试验有各自的优势, 需要进一步对台风个例研究得到更加明确的证明。

**2.3.4 气象要素预报分析** 除此之外, 各组试验降水预报效果的好坏一定程度上与动力要素和热力要素相关。图 11 给出了三组试验沿 113.5°E 的垂

直速度经向剖面图, 第 1 列为试验 3DVar\_3DVar, 第 2 列为试验 Hybrid\_3DVar, 第 3 列为试验 Hybrid\_Hybrid, 其中第 10 h(图 11a, b, c)、13 h(11d, e, f)以及 15 h(图 11g, h, i)的。在第 10 h 的 23°N 上空处, 试验 3DVar\_3DVar(图 11a)在近海珠江口上空附近存在一个大于 0.4 m/s 的强上升气流, 此处强对流出现的位置刚好与图 6 融合数据实况降水分布图中的降水大值中心位置相吻合, 这可能是试验 3DVar\_3DVar 对该时刻降水的预报效果更好的原因, 因为其能够更好的模拟出对流运动的发生位置和强度。第 13 和 15 h 两次强降水发生的时刻, 降水集中在广东的北部, 山地的抬升的作用使得强大的台风气流上升形式垂直对流, 而试验 Hybrid\_Hybrid(图 11f, i)可以更好的描绘出在广东北部的强对流发生, 其对流运动的大值区位置与最大降水区位置大致相同, 也能说明其对广东北部的两次强降水过程的预报比其他两组试验的效果更优。

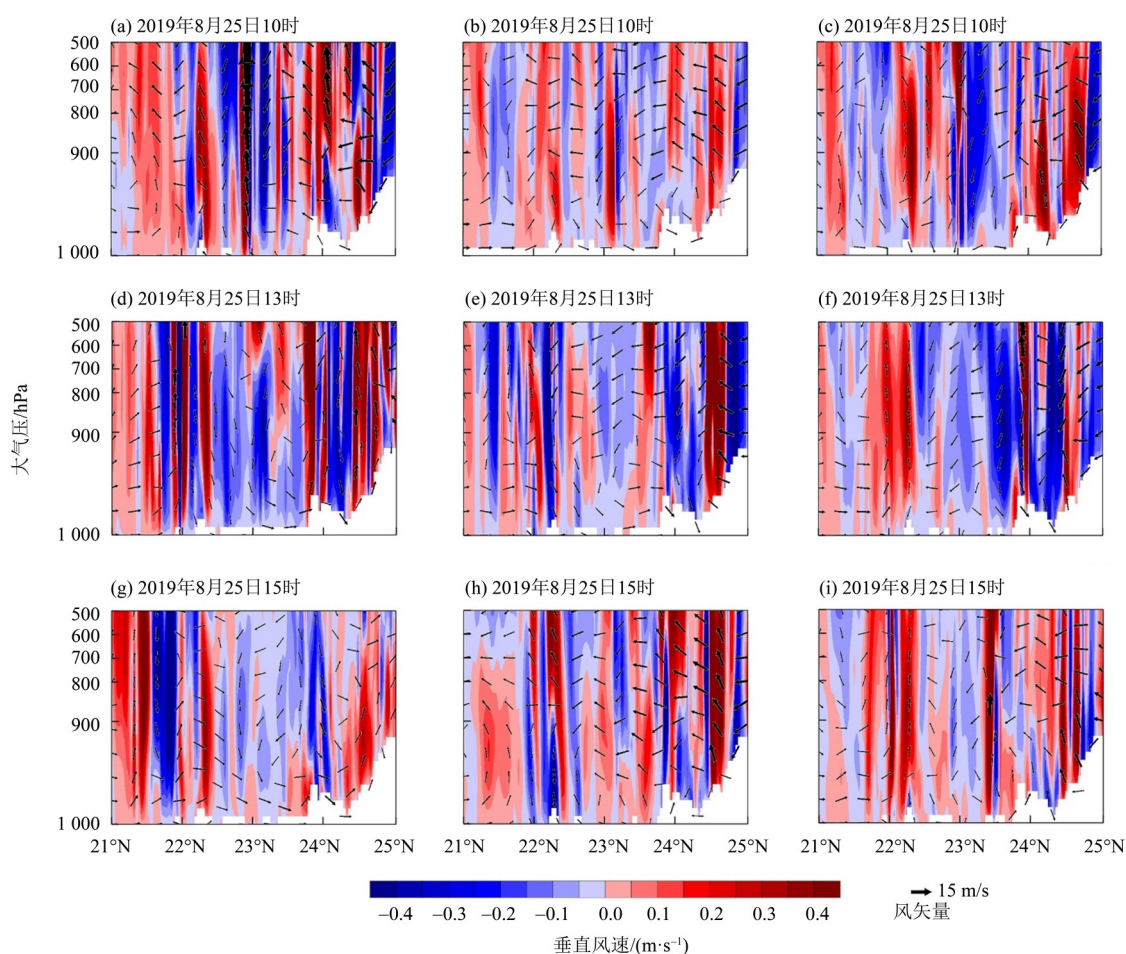


图 11 2019 年 8 月 25 日 10, 13 和 15 时 d02 区域三组同化试验垂直风场沿 113.5°E 的垂直剖面(m/s)  
Fig. 11 Vertical profile of vertical velocity (color shading) and wind field flow vectors (black vector) along 113.5°E in d02 for three tests at 10:00, 13:00 and 15:00 UTC 25th August, 2019

台风“白鹿”外围大风速带为广东地区输送大量的水汽,使得降水连续性增强。在第13 h(25日13时)的ERA5再分析数据中,发现广东处于台风外围强盛的西南气流内,形成了一条的水汽输送带不断向近岸靠近(图12);广东北部山区的水汽混合比处于一个极大值区,形成的湿区为强降水提供了充分的条件,这可能是广东北部的降水大值区的原因。三组试验均模拟出沿海地区的水汽通量输送大值区,比湿达到20.6 g/kg;其中试

验3DVar\_3DVar中,近海区域的水汽含量更大,且整个广东内陆上空的水汽大值区较其他两组试验范围更广水汽浓度更大,比湿超过18.8 g/kg。两层嵌套区域均采用3DEnVar同化(Hybrid\_Hybrid)的试验,珠江口地区的水汽混合比与ERA5的分布更为准确,并且整个风场更为顺畅强度更大,辐合条件较好,广东中北部有风速的辐合,这可能会对强降水中心的预报带来一些帮助。

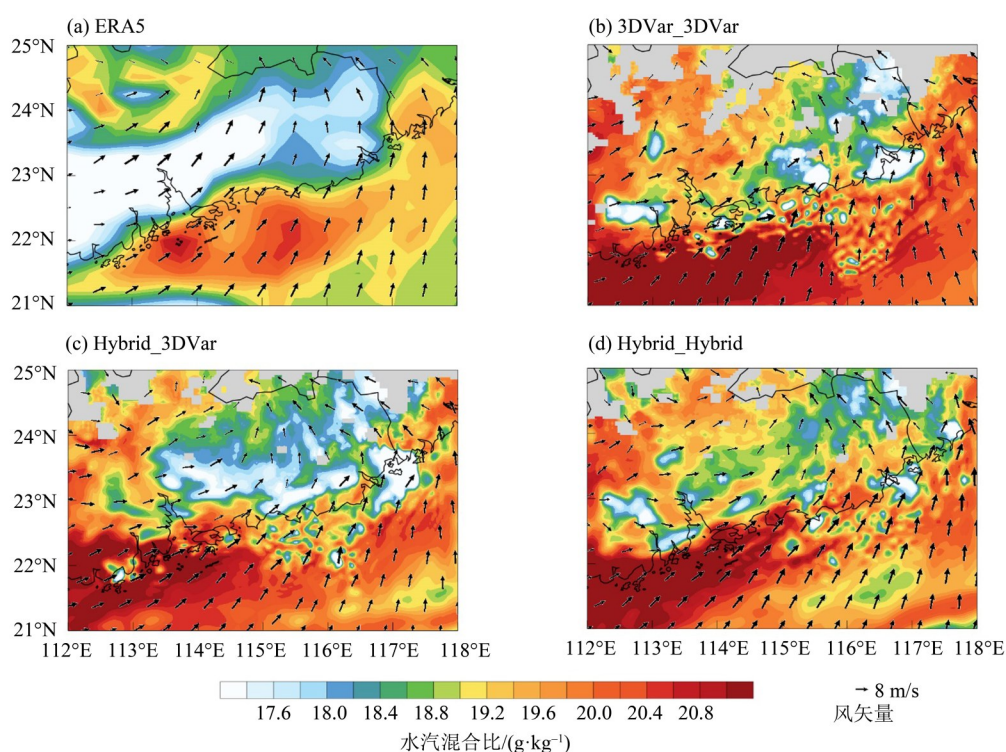


图12 2019年8月25日13时d02区域ERA5和三组同化试验950 hPa的水汽混合比(g/kg)

Fig. 12 Water vapor mixing ratio(color shading, g/kg)and horizontal wind(black vector, m/s)

at 925 hPa in d02 for three tests at 13: 00 UTC 25th August, 2019

前人研究发现不同的同化试验对湿度场的修正不同,会导致预报降水落区和强度出现差异<sup>[24]</sup>。图13同样是第13 h(25日13时),沿113.5°E的相对湿度垂直剖面图,由图可知,ERA5再分析数据中整层湿度超过60%,三组试验整体预报的湿度场过强,但如果两层区域均采用相同同化方法的试验能更好地描述出21°~23°N范围900 hPa以下的湿度大值区。在900 hPa以上的湿度大值区,三组试验的数值能反映出一个相对较厚的湿层。

另外,近地面的热力场中,三组试验的10 m风场和2 m温度场分布都是以西南偏南气流主导,广东近海中有暖区中心(图14a),而试验3DVar\_3DVar在广东中部和北部的近地面温度场偏弱(图

14b),而采用了3DEnVar(Hybrid)同化的两组试验(图14c,d)对风场风速的模拟强度更吻合ERA5数据,并且暖区中心的位置和范围都更准确,可能由于低层风的辐合以及近地面2 m温度场中广东中部到北部存在偏强的冷中心,两者共同作用促使强降水中心的降水量加强。

总体而言,不同的同化试验在预报气象要素场时会出现差异,当两层区域均使用3DEnVar(Hybrid)的同化方法(试验Hybrid\_Hybrid)时,对降水相关的气象要素场的预报效果更好,更加有利于对强降水落区的预报,其中包括动力、热力以及水汽含量等方面,这为系统不断的完善和改进提供良好的借鉴意义。

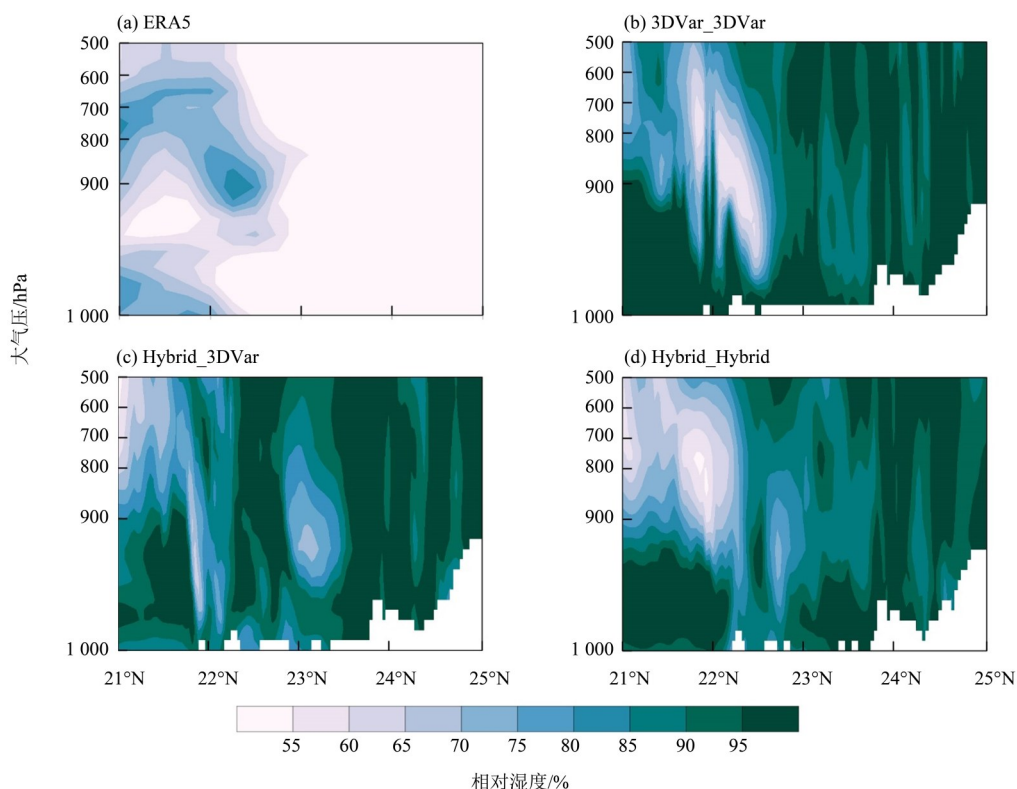
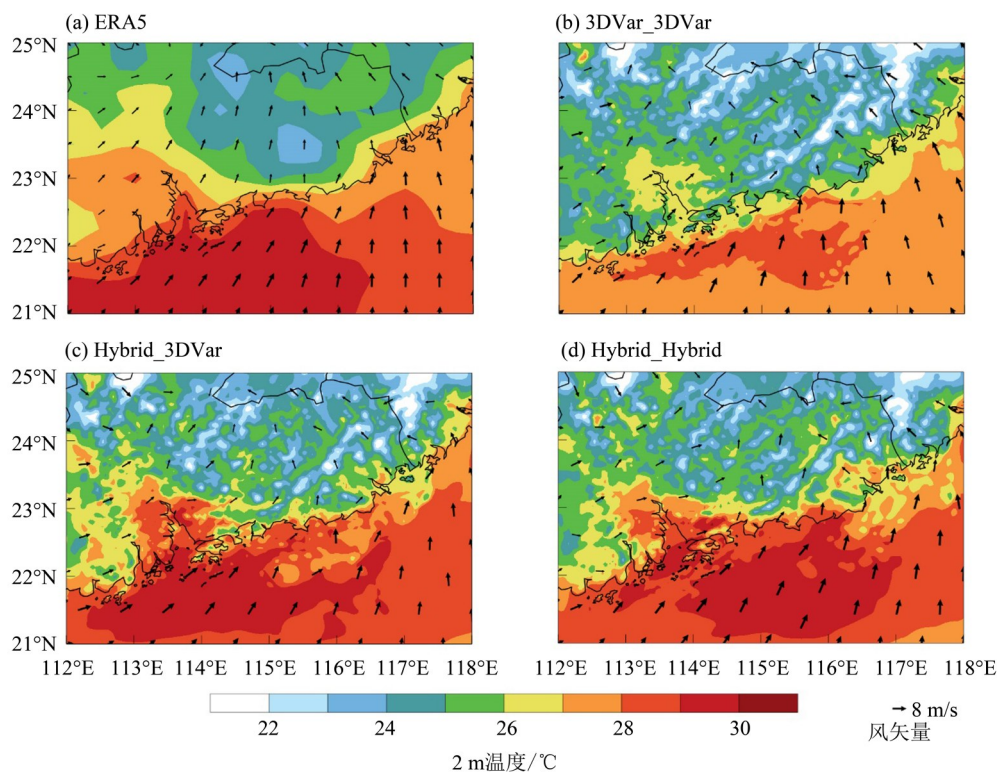


图 13 2019年8月25日13时d02区域ERA5和三组同化试验相对湿度沿113.5°E的垂直剖面(%)  
 Fig. 13 Relative humidity(%) along 113.5°E in d02 for three tests at 13:00 UTC 25th August, 2019



图中黑色矢量代表10 m风场，填色区代表2 m温度场。

图 14 2019年8月25日13时d02区域ERA5和三组同化试验的10 m风场 (m/s) 和2 m温度场 (°C)  
 Fig. 14 10 m horizontal wind (black vector, m/s) and 2 m temperature (color shading, °C)  
 in d02 for three tests at 13: 00 UTC 25th August, 2019

### 3 结 论

基于 WRF 模式和 GSI 同化系统,本文采用 3DVar 同化和 3DEnVar(Hybrid)同化两种方法,设计了关于这两种同化方案的敏感性试验。通过搭建的同化预报系统,针对台风“白鹿”引起的强降水过程进行模拟,对模拟结果进行对比分析,得到如下结论:

1) 本系统能较好地模拟台风“白鹿”所引起的强降水过程的范围和强度,说明同化能有效改善预报效果。针对逐小时的降水预报情况,试验中两层区域均选用 3DVar 方法有利于本系统预报降水范围的分布情况,与实况降水分布接近,能够抓住小雨到中雨的量级的降水落区,更有效地描绘出降水的范围以及整体降水强度;而试验中两层区域均选用 3DEnVar(Hybrid)方法有利于预报强降水大值中心的位置,表现出对暴雨和大暴雨等一系列极端暴雨事件有良好预报能力,但预报强度存在偏强的情况。

2) 对于整个台风降水过程而言,不同同化方案在本次个例模拟的结果中绝对优势并不明显。在 6、12 和 24 h 累积降水的评分表现中,三组试验

的评分效果差异不大,两层区域均选用 3DEnVar(Hybrid)方法的试验在 12 和 24 h 的累积降水评分中表现相对较好。

3) 不同的同化试验在预报气象要素场时会出现差异,因此会对降水落区以及强度的预报带来影响。当两层区域均使用 3DEnVar(Hybrid)的同化方法时,对相关的动力(风场)和热力(温度场)以及水汽含量等方面的预报效果更好,更加有利于对强降水落区以及强度的预报,这为系统不断的完善和改进提供良好的借鉴意义。

本文从所选个例的模拟结果说明,不同区域采用不同的同化方案对预报效果的改进存在不同的优势,由于本文研究是关于不同的同化方法对台风“白鹿”的降水预报效果的差异,从而进一步讨论针对不同同化方法在预报台风强降水过程中的应用。下一步将从同化更多的观测资料如多普勒雷达观测资料,以及增加集合成员数等多方面入手,结合不同的降水类型探讨不同的同化方案针对模式预报的适应性问题。进而能够更有针对性地提高同化预报效果,通过不断优化和改进,进一步提高该系统预报的准确率。

#### 参考文献:

- [1] 李泽椿,毕宝贵,金荣花,等. 近 10 年中国现代天气预报的发展与应用[J]. 气象学报, 2014, 72(6): 1069-1078.
- [2] 陈德辉,薛纪善. 数值天气预报业务模式现状与展望[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 623-633.
- [3] 官元红,周广庆,陆维松,等. 资料同化方法的理论发展及应用综述[J]. 气象与减灾研究, 2007, 30(4): 1-8.
- [4] 张爱忠,齐琳琳,纪飞,等. 资料同化方法研究进展[J]. 气象科技, 2005, 33(5): 385-389.
- [5] 张少婷,王东海,于星,等. 雷达和卫星资料同化在一次华南暴雨预报中的应用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(5): 80-93.
- [6] HU M, XUE M, BREWSTER K. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, Tornadoic Thunderstorms. Part I: Cloud analysis and its impact [J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(2): 675-698.
- [7] BARKER D M, HUANG X Y, LIU Z, et al. The weather research and forecasting model's community variational/ensemble data assimilation system: WRFDA [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(6): 831-843.
- [8] BARKER D M, HUANG X Y, GUO Y R, et al. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: Implementation and initial results [J]. Monthly Weather Review, 2004, 132(4): 897-914.
- [9] BARKER D M, HUANG W, GUO Y R, et al. A three-dimensional variational (3DVAR) data assimilation system for use with MM5[R]. NCAR Tech Note, 2002.
- [10] 张飞民,王澄海. 利用 WRF-3DVAR 同化常规观测资料对近地层风速预报的改进试验[J]. 高原气象, 2014, 33(3): 675-685.
- [11] 刘红亚,薛纪善,顾建峰,等. 三维变分同化雷达资料暴雨个例试验[J]. 气象学报, 2010, 68(6): 779-789.
- [12] 刘晓燕. HY-2A SCAT 资料在 3DVAR 和 Hybrid 同化方法中的应用研究[R]. 国家海洋环境预报中心, 2015.
- [13] GAO S, MIN J, LIU L, et al. The development of a hybrid EnSRF-En3DVar system for convective-scale data assimilation [J]. Atmospheric Research, 2019,

- 229: 208–223.
- [14] 谢宾鹏, 张立凤, 张明阳, 等. FY-3A 卫星微波资料的集合变分混合同化试验[J]. 气象科学, 2018, 38(5): 606–615.
- [15] HAMILL T M, SNYDER C. A hybrid ensemble Kalman filter/3D variational analysis scheme[J]. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(8): 2905–2919.
- [16] WANG X, SNYDER C, HAMILL T M. On the theoretical equivalence of differently proposed ensemble-3DVAR hybrid analysis schemes[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(1): 222–227.
- [17] LI Y, WANG X, XUE M. Assimilation of radar radial velocity data with the WRF hybrid ensemble-3DVAR system for the prediction of hurricane Ike (2008) [J]. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(11): 3507–3524.
- [18] 张诚忠, 薛纪善, 黄燕燕, 等. 资料同化对 2017 年登陆广东沿海台风的短期降水与路径预报影响[J]. 热带气象学报, 2019, 35(5): 577–586.
- [19] 闵锦忠, 刘盛玉, 毕坤, 等. 基于 Hybrid EnSRF-En3DVar 的雷达资料同化研究[J]. 大气科学学报, 2015, 38(2): 213–221.
- [20] XIA Y, CHEN J, ZHI X F, et al. Topography-dependent horizontal localization scale scheme in GRAPES-MESO hybrid en-3DVar assimilation system[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2019, 25(2): 245–256.
- [21] 黄江平, 刘健文, 董佩明, 等. 基于混合集合同化方案的台风“海鸥”的数值模拟研究[J]. 热带气象学报, 2014, 30(6): 1113–1118.
- [22] XU D, HUANG X Y, WANG H. Impact of assimilating radiances with the WRFDA ETKF/3DVAR hybrid system on prediction of two typhoons in 2012 [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2015, 29(1): 28–40.
- [23] 梅疏影, 闵锦忠. 不同同化方案在一次梅雨锋暴雨预报中的应用研究[J]. 气象科学, 2018, 38(4): 432–441.
- [24] 刘磊, 费建芳, 程小平. 三维变分同化中不同物理量对台风预报的影响[J]. 气象与减灾研究, 2008, 31(1): 29–34.

(责任编辑 秦社彩)