大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

云海-2掩星资料在区域数值预报中的同化应用评估

蔡其发 王业桂 张斌 李娟 兰伟仁 王广杰

Evaluation on Assimilation Application of Yunhai-2 Occultation Data in Regional Numerical Weather Prediction Model

CAI Qifa WANG Yegui ZHANG Bin LI Juan LAN Weiren WANG Guangjie

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20139

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

集合变分混合同化方案在快速循环同化系统中的应用研究
Implementation of Hybrid En-3DVAR Assimilation Scheme in Rapid Cycling Assimilation System
大气科学. 2020, 44(6): 1349 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2008.20118

基于NLS-4DVar方法的雷达资料同化及其在暴雨预报中的应用
The Radar Data Assimilation System Based on NLS-4DVar and Its Application in Heavy Rain Forecast
大气科学. 2017, 41(2): 321 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1605.16107

雷达资料同化在局地强对流预报中的应用
Application of Radar Data Assimilation in Local Severe Convective Weather Forecast
大气科学. 2017, 41(4): 673 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1608.15288

AMSR2辐射率资料同化对台风“山神”分析和预报的影响研究
The Impact of AMSR2 Radiance Data Assimilation on the Analysis and Forecast of Typhoon Son-Tinh
大气科学. 2017, 41(2): 372 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1608.16127

风廓线雷达资料在模式中的同化应用研究
A Study on Assimilation of Wind Profiling Radar Data in GRAPES-Meso Model
大气科学. 2019, 43(3): 634 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18125

闪电定位和雷达观测资料在云分析中的应用及数值试验
Application of Lightning Location and Radar Data in Cloud Analysis System and Numerical Experiments
大气科学. 2019, 43(1): 131 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17233

关注微信公众号，获得更多资讯信息

蔡其发, 王业桂, 张斌, 等. 2021. 云海-2 掩星资料在区域数值预报中的同化应用评估 [J]. 大气科学, 45(1): 217−228. CAI Qifa, WANG Yegui, ZHANG Bin, et al. 2021. Evaluation on Assimilation Application of Yunhai-2 Occultation Data in Regional Numerical Weather Prediction Model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 217−228. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20139

云海-2 掩星资料在区域数值预报中的同化应用评估

蔡其发 王业桂 张斌 李娟 兰伟仁 王广杰

61741 部队，北京 100094

摘 要 针对中国自主的云海-2 掩星资料，基于 WRF 模式和 GSI 三维变分同化系统，以 2019 年 5 月首次开展了区域同化预报试验，试验结果表明：同化云海-2 掩星资料后，风场、温度场的改善主要体现在预报的中后期，而湿度场的改善则贯穿于整个预报时间段，风场、温度场和湿度场的改善程度随着预报时间延长趋于一致；风场和温度场的改善主要体现在模式中层，而水汽混合比的改善则主要体现在模式的中低层；同化云海-2 掩星资料能够合理的调整模式的位势高度场、湿度场、温度场和风场，进而改善降水预报结果。

关键词 云海-2 掩星资料 三维变分 预报 均方根误差 降水 增量

文章编号 1006-9895(2021)01-0217-12 **中图分类号** P456 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20139

Evaluation on Assimilation Application of Yunhai-2 Occultation Data in Regional Numerical Weather Prediction Model

CAI Qifa, WANG Yegui, ZHANG Bin, LI Juan, LAN Weiren, and WANG Guangjie

Unit 61741, *PLA*, *Beijing* 100094

Abstract Based on the WRF (Weather Research and Forecasting) model and GSI (Gridpoint Statistical Interpolation analysis system) three-dimensional variational assimilation system, regional assimilation and prediction experiments for China' s autonomic Yunhai-2 occultation data were performed for the first time in May 2019. The results of the experiments demonstrated that after assimilating Yunhai-2 occultation data, the improvement for the wind and temperature fields is mainly reflected in the middle and later stages of the forecast, while the improvement for the humidity field is witnessed through the entire forecast period. The results also showed that the improvement degree of the wind, temperature, and humidity fields tends to be consistent with the extension of forecast time. It was found that the improvement for the wind and temperature fields is mainly reflected in the middle layer of the model, while the improvement for the water vapor mixing ratio is mainly reflected in the middle and lower layers of the model. Thus, assimilating Yunhai-2 occultation data can reasonably adjust the potential height, humidity, temperature, and wind fields in the model, thereby improving the precipitation forecast results.

Keywords Yunhai-2 occultation data, 3DVar (three-dimensional variational data assimilation), Forecast, RMSE (Root Mean Squared Error), Precipitation, Increment

收稿日期 2020-04-02；**网络预出版日期** 2020-09-20

作者简介 蔡其发，男，1973 年生，高级工程师，主要从事数值预报研究。E-mail: 1369313587@139.com

通讯作者 张斌，E-mail: zhangbinzhb1985@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41375105

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41375105)

1 引言

GPS（global positioning system）无线电掩星技术（GPS Radio Occulation, GPS RO）利用 GPS 卫星和地球低轨卫星与地球的相对运动造成的掩星过程中特定波长的无线电波穿透大气而引起的无线电信号折射，利用在此过程中无线电波产生的相位延迟和相应的振幅差异，从中获得不同高度的路径差异及频率等信息，通过这些信息，利用相应的大气学原理，可以反演出电离层电子密度信息、中性层大气温度、压力、湿度等参数廓线（朱孟斌, 2012）。GPS RO 探测技术具有高精度、高垂直分辨率、受气溶胶和云及降水的影响小、无需定标、全球均匀覆盖、成本低廉等优点（Anthes et al., 2000），在常规观测资料匮乏的海洋、高原和荒漠等地区，具有很强的实用价值。

因为 GPS RO 探测具有的优势，许多国家和地区先后实施了 GPS 掩星测量计划，1995 年 4 月 UCAR（University Corporation for Atmospheric Research）主持的 GPS/Meteorology 项目，成功发射了携带全球定位系统接收机的低轨实验卫星 MicroLab1，揭开了 GPS 无线电掩星技术探测地区大气试验计划的序幕。随后，德国、阿根廷等分别于 2000 年成功实施了 CHAMP（Challenging Minisatellite Payload）和 SAC-C（Satellite de Applicacions Cientificas-C）计划。GPS/Meteorology、CHAMP 和 SAC-C 均只有一个 GPS 掩星资料接收器，每天虽然可以获取一定数量的掩星廓线，但这些 GPS 掩星探测的密度不高，制约了 GPS 掩星探测的业务化应用（马再忠等, 2011）。2006 年中国台湾和美国合作的掩星探测项目 COSMIC（Constellation Observing System for Meteorology，Ionosphere，and Climate）发射成功，COSMIC 由 6 个 GPS 掩星资料接收器组成，每天可以获取更多数量的掩星廓线，大大增加了掩星探测密度和业务化应用的潜力。

GPS RO 探测技术作为一种很有前景的大气探测手段，能够提供丰富的高时空分辨率探测资料，在数值天气预报中得到了广泛的应用。同化 GPS RO 探测资料可以对初始场进行有效的调整，进而改善预报精度。GPS RO 资料同化通常采用弯曲角或折射率观测资料，在地球大气局部球对称假设下，弯曲角与折射率可以通过 Abel 变换相互转换（朱孟斌等, 2013）。Zou et al.（1995）和 Kuo et al.（1998）在数值模式中对 GPS RO 的折射率资料进行同化后，温度和湿度场得到了有效的改善，提高了数值预报模式的结果。Huang et al.（2005）利用 MM5 模式及其三维变分（3DVar）对 GPS 掩星折射率进行同化，发现 GPS RO 资料对于台风路径及降水预报都有正影响。Cucurull（2010）在全球模式业务预报中对 GPS RO 折射率资料进行同化，等压面的重力位势高度和风速得到了有效改善，预报准确度也得以提高。英国气象局（Healy et al., 2005）对 CHAMP 掩星资料进行同化，预报试验表明 GPS 掩星观测资料能够提高低对流层对无线电波温度观测量分析和预报的符合度。Healy and Thépaut（2006）通过 4DVar 将 GPS RO 弯角资料同化到 ECMWF 全球模式中，提供了高准确度的温度信息，并证明了这有助于提升温度预报的准确度，特别是南半球 300 hPa 到 50 hPa 高度的区域。朱孟斌等（2013）在全球模式中利用四维变分同化系统对 GPS 弯曲角进行同化，试验结果表明同化 GPS 无线电掩星资料之后全球区域正作用十分明显。余江林等（2014）针对暴雨天气，利用 GSI-3DVar 同化系统对 GPS 掩星弯角进行同化，结果表明同化后强降水的预报准确性得到了有效提高。邹逸航等（2017）基于 GRAPES 的三维变分同化系统对 GPS 掩星资料进行同化，可以减小台风路径误差，提高降水预报准确率。

目前，无论是业务应用还是科学研究，掩星资料在数值预报中均展示了良好的应用效果和潜力。2019 年 12 月，中国发射了自主的云海-2 掩星大气探测星座系统，云海-2 星座由 6 颗卫星组成，可以探测获取丰富的全球中低纬度大气层温度、湿度、气压等参数的垂直廓线，能够为数值天气预报提供高垂直分辨率、高精度的观测信息，对于提升数值预报精度具有重要作用。

云海-2 掩星资料作为中国自主的掩星观测资料，自卫星成功发射后，尚未在数值预报中开展应用研究工作。为了解云海-2 掩星资料的同化效果，加快自主掩星资料的业务化应用进度，发挥好云海-2 掩星资料在数值预报模式中的作用，本文基于区域数值预报模式，针对云海-2 掩星资料首次开展同化应用研究，通过建立云海-2 掩星卫星在区域数值预报模式中的同化技术流程，对云海-2 掩星资料同化应用效果进行检验，为业务化应用提供借鉴。

2　云海-2 掩星数据、模式和试验设置

云海-2 掩星大气探测资料包括干空气廓线数据和湿空气廓线数据，每类数据均包括弯角和折射率变量。本文对干空气廓线数据的折射率资料进行同化，为了确保掩星资料得到合理有效的同化，同化之前对其进行一定的质量控制，主要包括最初的质量控制、背景场检验和相对误差检验（王挺等, 2015），其次考虑到云海-2 掩星资料在垂直方向上具有较高的分辨率，在对其进行同化时，将观测数据进行稀疏化，为每个模式层匹配一个距离最近的观测。

本文基于 NCEP（National Centers for Environmental Prediction）开发的 GSI（gridpoint statiscal interpolation system）三维变分同化系统（three dimension variational analysis，3DVar）对云海-2 掩星资料的折射率进行同化，GSI 是 NOAA（National Oceanic and Atmospheric Administration）开发并用于 NCEP 业务预报的变分同化系统；采用的区域数值预报模式为 Advanced Research WRF（ARW），WRF 模式是一个在三维非静力平衡中尺度/云模式基础上加入混合相微物理过程参数化、高阶湍流闭合参数化、辐射参数化、网格嵌套等多种先进技术而发展起来的，近年来已广泛应用于各种研究与业务预报中。

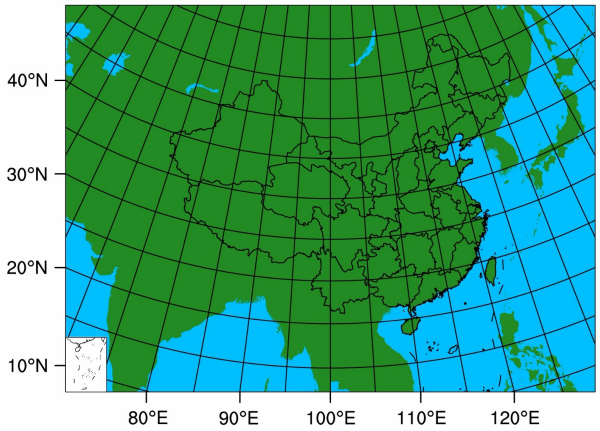

图 1　试验区域

Fig. 1　Experiment region

本文针对如图 1 所示的中国及其周边区域开展同化预报试验，同化时间窗设置为 6 h；WRF 模式的中心点为（35°N，100°E），水平分辨率为 30 km，格点数为 240×175，垂直层数为 35 层，模式层顶高度为 10 hPa。采用的参数化方案包括：WSM6 微物理方案，Kain-Fritsch 积云对流参数化方案，RRTM 长波辐射方案，Dudhia 短波辐射方案，YSU 边界层参数化方案。

为了系统考察云海-2 掩星资料的同化预报效果，以 2019 年 5 月开展长达一个月的数值预报试验。试验中设置两组试验，分别为试验 CTRL 和试验 YHDA，试验 CTRL 为控制试验，仅同化常规观探测资料，试验 YHDA 在试验 CTRL 的基础上，增加了云海-2 掩星资料的同化，两组试验同化完成后均进行 72 h 的预报。试验 CTRL 和试验 YHDA 的预报结果对比即可反映云海-2 掩星资料在区域模式预报中的同化效果。两组试验每天进行一次，72 h 的起报时间均为 08 时（北京时，下同）。试验中均采用 T799 模式每隔 6 h 的全球预报数据为 WRF 模式提供背景场和边界条件。

本文的同化试验均采用如图 2 所示的三次循环同化的方式，即首先在初始场对应时刻完成第一次资料同化过程，得到一个分析场，随后基于分析场进行 6 h 的预报，得到一个预报场，然后将此预报场当作对应时刻的背景场，完成第二次资料同化过程，得到一个分析场，继续进行一个 6 h 的预报，得到一个预报场，然后将此预报场当作对应时刻的背景场，完成第三次资料同化过程，得到一个分析场，最后利用这个分析场进行 72 h 的区域预报，同化预报试验的最终起报时间均为 08 时。

3　数值试验结果分析

在分析同化云海-2 掩星资料对预报的整体影响时，本文首先采用 NCEP 的 0.25 度再分析资料对多个要素场的预报结果进行评估，即以 NCEP

图 2　同化、预报流程

Fig. 2　Assimilation and prediction process

的 0.25 度再分析资料作为参照，对两组试验的水平风场 U、V，温度场 T，水汽混合比 Q_v 的预报结果的均方根误差进行对比分析；其次基于强降水过程，考察分析同化云海-2 掩星资料对降水预报结果的影响及其对模式要素场的调整。

3.1 统计结果分析

3.1.1 要素场的均方根误差分析

在考量同化云海-2 掩星资料对于预报场的调整效果时，本节对 2019 年 5 月的两组批量试验 6 h 到 72 h 每隔 6 h 预报的均方根误差进行统计，然后将 5 月份每天相同预报时刻的均方根误差进行平均，得到各要素场预报的均方根误差统计结果。

为了更清晰地对比同化云海-2 掩星资料对各要素场预报场的调整效果，下面对试验 YHDA 相对于试验 CTRL 在各预报时次上各要素场降低的均方根误差进行分析。

图 3 为试验 YHDA 相对于试验 CTRL 各要素预报场均方根误差降低的统计结果，可以看到 U 风场、V 风场和温度场随着预报时间延长，降低的均方根误差逐渐增大，即随着预报时间的延长，同化云海-2 掩星资料对各要素场预报的改善程度逐渐增大，但是可以看到 U 风场、V 风场和温度场在预报前期降低的均方根误差均为负值，其中 U 风场、V 风场分别在 42 h 和 12 h 后才体现出正效应，温度场则在 60 h 后出现正效应。3 个要素预报场的改善效应基本都出现在预报的中后期，这可能是因为云海-2 掩星资料作为一种新观测资料，目前同化参数尚未完全优化，对模式要素场的改善需要一定的适应时间，因此对于要素场的改善作用有所滞后。进一步分析，同化云海-2 掩星资料对风场的改善作用要好于温度场，对温度场的改善在预报时间段整体并不是很理想，仅在预报最后时刻才展现一定的正效应。不同于 U 风场、V 风场和温度场，同化云海-2 掩星资料对于水汽混合比的调整在整个预报时间段内均为正效果，这可能源于云海-2 掩星的探测量与大气的湿度场有着紧密联系，因而可以对湿度场进行直接有效的调整，而风场与其没有直接联系，对风场初期的调整主要是通过背景误差协方差中统计的各要素相关性进行间接调整，因此如果统计的背景误差协方差不够精确，也会一

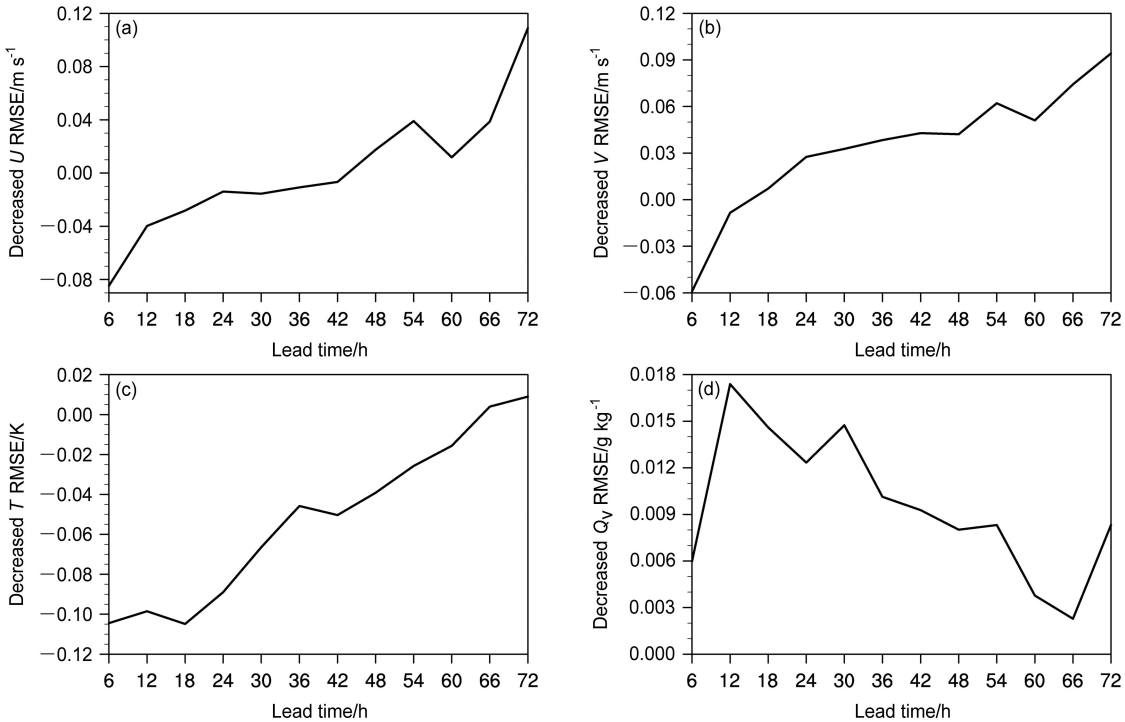

图 3 试验 YHDA 相对于试验 CTRL 的（a）U（单位：m s^{-1}）、（b）V（单位：m s^{-1}）、（c）温度场 T（单位：K）和（d）水汽混合比（单位：g kg^{-1}）预报场降低的均方根误差

Fig. 3 Root mean square errors (RMSE) of the decrease for experiment YHDA (the assimilation of yunhai-2 occultation data is added on the basis of the experiment CTRL) forecast relative to experiment CTRL (Only conventional observation data were assimilated): (a) Zonal wind U (units: m s^{-1}); (b) meridinal V (units: m s^{-1}); (c) temperature T (units: K); (d) water vapor mixing ratio Q_v (units: g kg^{-1})

定程度影响到对风场的调整，这也可能导致对风场前期调整改善效果不理想；其次相对于 U 风场、V 风场和温度场，水汽混合比的调整在整个预报时间段内呈现较大的波动性，这可能是因为水汽混合比作为湿度场，具有较强的局地性和非线性特征，因此其变化也易产生较大的起伏。

整体来说，随着预报时间的延长，同化云海-2 掩星资料对于要素预报场的改善效果逐渐增强，湿度场的改善效果贯穿于整个预报时间段内，而风场、温度场的改善效应主要是体现在预报的中后期，风场的改善要好于温度场。

3.1.2　各要素预报场提高的百分比分析

在 3.1.1 节的基础上，为了考察同化云海-2 掩星资料对于各要素场的调整程度，本节进一步对各要素预报场的提高百分比进行分析。

图 4 为试验 YHDA 相对于试验 CTRL 各要素场均方根误差随预报时间降低的百分比。图 4 与图 3 有着较好的对应，风场和温度场的改善程度在预报中前期改善均不理想，但随着预报时间的延长逐渐增强，到一定预报时间后趋于稳定，温度场的改善效果整体来说最不理想。不同于风场和温度场，水汽混合比的改善程度在整个预报时间段内相对比较平稳，调整改善的程度随着预报时间延长只是呈现略微的下降，这可能仍源于其与云海-2 掩星探测量有着直接联系，因此易于取得较稳定的改善效果。最后，可以看到随着预报时间的延长，4 个要素场的改善程度趋于接近，这是因为在模式积分过程中，各个物理量存在相互关联，各要素场的改善程度相互影响，经过长时间的积分预报，能够达到

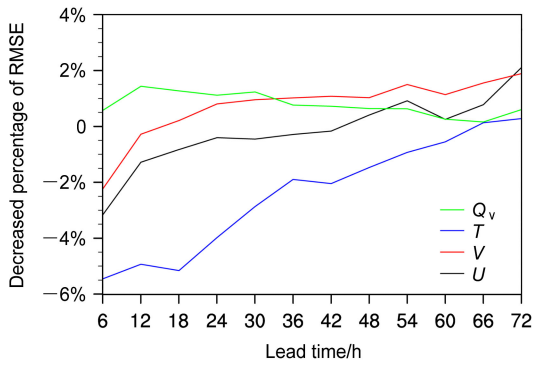

图 4　试验 YHDA 相对于试验 CTRL 各要素场预报均方根误差降低百分比

Fig. 4　Decrease percentage of RMSE for experiment YHDA prediction relative to experiment CTRL

整体协调一致的改善。

3.1.3　各要素预报场在模式层上的均方根误差分布

云海-2 掩星探测在垂直方向上具有较高的分辨率，垂直方向上不同的探测特性可能对要素场预报会产生不同的影响，为了分析同化云海-2 掩星资料对模式垂直层上各要素场预报的具体影响，本节结合 2019 年 5 月份整月的试验结果，对 U 风场、V 风场、温度场和水汽混合比要素场预报在垂直方向上的均方根误差分布特征进行分析。

垂直方向上的均方根误差是将 5 月每日相同预报时效的预报场的各层次的均方根误差进行平均得到。类似前文的分析，为了清晰对比同化云海-2 掩星资料在垂直方向上对预报场的影响，下面对试验 YHDA 相对于试验 CTRL 在垂直方向上降低的均方根误差进行分析。结合前文的分析结果，同化云海-2 掩星资料对各要素场的改善效果主要体现在预报的中后期，因此本节主要对 24 h、36 h 和 48 h 预报的结果进行分析。

图 5～7 为试验 YHDA 相对于试验 CTRL 在模式层上各要素场 24 h、36 h 和 48 h 预报降低的均方根误差分布，可以看到各要素场在 3 个预报时刻降低的均方根误差在垂直方向上的分布基本类似。从图 5～7 中的 a、b 图可以看到，对于风场而言，同化云海-2 掩星资料在模式垂直方向上主要是改善了 10 层以上到 30 层以下的中层预报，而对于 10 层以下和 30 层以上的改善均不理想，且随着层数的增加有所加剧，尤其是 30 层以上，变化更为剧烈。而对于温度场，从图 5～7 的 c 图可以看到，同化云海-2 掩星资料对于 25 层以下的调整影响较小，改善效果主要体现在 25 层以下的中层，但改善较小，低层的改善效果不理想，25 层以上的调整幅度相对较大，但均呈现不理想的效果，且随着层数增加进一步加剧。图 5～7 的 d 图为同化云海-2 掩星资料对于水汽混合比的调整，不同于风场和温度场，同化云海-2 掩星资料对其调整主要体现在 20 层以下的中下层，而对于 20 层以上基本未进行调整，20 层以下的调整呈现较大幅度波动变化，5 层以下的低层为正效果，5 层到 11 层则改善效果不理想，而 11 层到 20 层则为正效果，5 层以下、11 层到 20 层呈现类似的变化特征，均出现了一个改善波峰，11 层到 20 层则出现了 2 个波峰和一个波谷的特征，变化更为剧烈。

整体来说在模式层上，对风场和温度场而言，

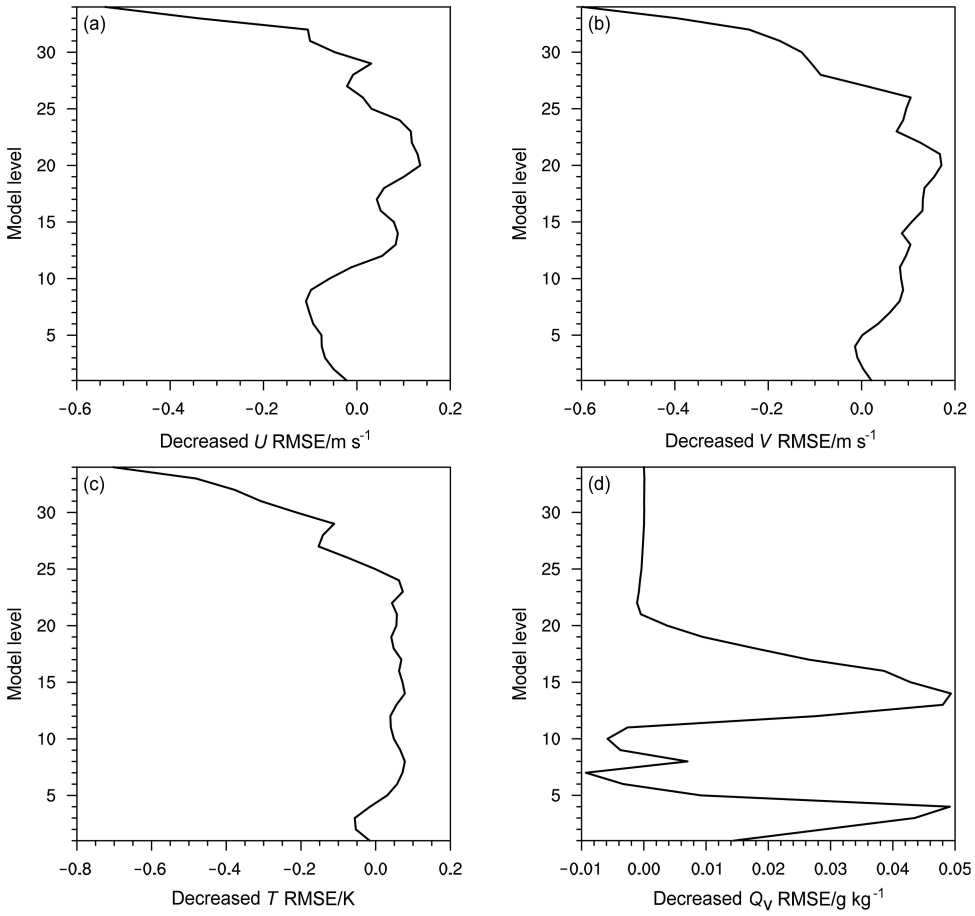

图 5 试验 YHDA 相对于试验 CTRL 在模式层上（a）U（单位：m s^{-1}）、（b）V（单位：m s^{-1}）、（c）温度场（单位：K）和（d）水汽混合比（单位：g kg^{-1}）24 h 预报降低的均方根误差分布

Fig. 5 RMSE distributions of the decrease in the 24-h forecast for experiment YHDA relative to experiment CTRL on model levels: (a) U (units: m s^{-1}); (b) V (units: m s^{-1}); (c) T (units: K); (d) Q_v (units: g kg^{-1})

同化云海-2 掩星资料的改善主要体现在模式中层，而在低层和高层均不理想，相对于风场，温度场的调整效果较弱。对于水汽混合比而言，同化云海-2 掩星资料对其调整主要体现在模式的中低层，并且呈现较大的波动性，改善作用主要体现在中低层中的低层和高层。

3.2 强降水个例分析

3.1 节主要分析了同化云海-2 掩星资料对各要素预报场调整的统计结果，本节将基于 2019 年 5 月 25 日 08 时至 5 月 26 日 08 时的降水预报，分析同化云海-2 掩星资料对降水预报结果和要素场结构的影响。

3.2.1 降水预报

图 8 为 2019 年 5 月 25 日 08 时到 5 月 26 日 08 时全国降水量实况，可以看到强降水主要发生在中国长江中下游，降水强度达到 100 mm 以上，雨带位于武汉、合肥和南京连线的南部地区，呈准东西向分布。

对于此次降水，试验 YHDA 相对于试验 CTRL 的 24 h 预报（图略）并没有取得明显改善，这与 4.1.1 节和 4.1.2 节中所分析的同化云海-2 掩星资料对于各要素场前期的改善不理想相对应，因此本节主要考察 48 h 的降水预报结果。图 9 为试验 CTRL 和 YHDA 的 2019 年 5 月 25 日 08 时（起报时刻）到 5 月 26 日 08 时的 48 h 全国降水量预报，可以看到试验 CTRL 和 YHDA 都大致预报出了长江中下游的强降水，但是试验 CTRL 预报的雨带呈西南—东北走向，与实况有着明显区别，而试验 YHDA 的雨带则呈现准东西走向，降水落区和强度与实况更为接近。

3.2.2 500 hPa 高度场及 700 hPa 增量场

同化云海-2 掩星资料对于降水的改善与对其

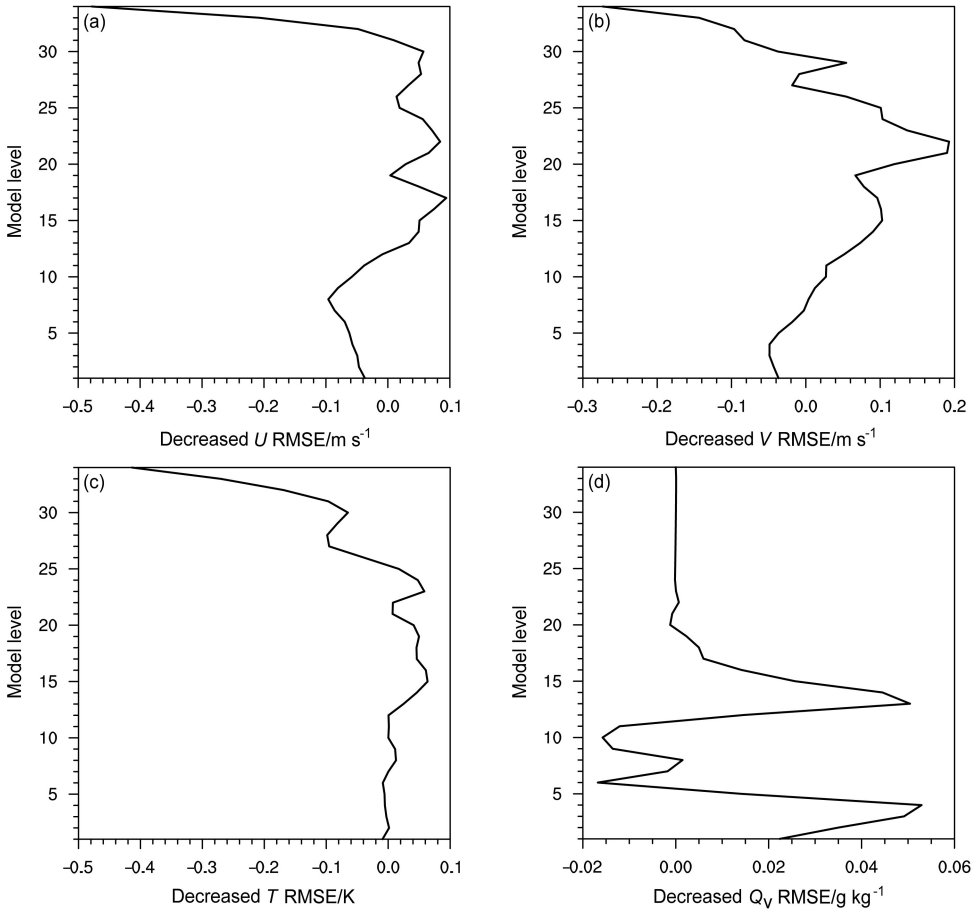

图 6　同图 5，但为 36 h 预报降低的均方根误差分布

Fig. 6　As in Fig. 5, but for RMSE distributions of the decrease in the 36-h forecast

模式中要素场的调整直接联系。本节对本次降水的 500 hPa 高度场、700 hPa 的比湿、温度和风场增量场进行分析，考察同化云海-2 掩星资料对各要素场的调整与降水改善的联系。

图 10 为 2019 年 5 月 25 日 08 时 500 hPa 位势高度场。与 NCEP 再分析场（0.25°×0.25°）对比，试验 CTRL 和 YHDA 的 24 h 预报场均能够大致刻画 500 hPa 位势高度场的特征，如中国北部的一槽一脊形势，然而对于云南至湖北的 5800 gpm 线，两者的描述有着较大差别，试验 CTRL 在此处为一个明显小脊，而试验 YHDA 则相对较为平直，与 NCEP 再分析场更为接近，易于产生准东西向的强降水雨带。总的来说同化云海-2 掩星资料能够对 500 hPa 位势高度场进行有效的调整，易于改善降水预报。

图 11 为 2019 年 5 月 25 日 08 时试验 YHDA 相对于试验 CTRL 的 700 hPa 比湿增量场和温度增量场，可以看到在湖北北部至河南南部出现了一条准东西向的比湿正增量带，这有利于此处准东西向雨带的产生，在这条比湿正增量带的 111°E 附近出现了闭合的温度负值增量区域，温度的降低不利于对流的发生，综合而言正值比湿增量和负值温度增量不易于产生较大的降水，这与试验 YHDA 相对于试验 CTRL 在此处降水预报没有较大的调整有着较好的对应，而在比湿正增量带东部（113°E 附近）紧邻的南边出现了闭合的温度正值增量区域，有利于此处降水的增强，这与试验 YHDA 相对于试验 CTRL 降水的东移发展相对应。图 12 为 2019 年 5 月 25 日 08 时试验 YHDA 相对于试验 CTRL 的 700 hPa 风场增量和散度场增量，可以看到湖北至河南南部出现了一条准东西向的风场辐合带，这与图 11 的湿度场配合易于产生准东西向的降水，从风场散度分布可以看出在辐合带的东部为强度最大的区域，这有利于强降水向东部的发展。综合来讲，

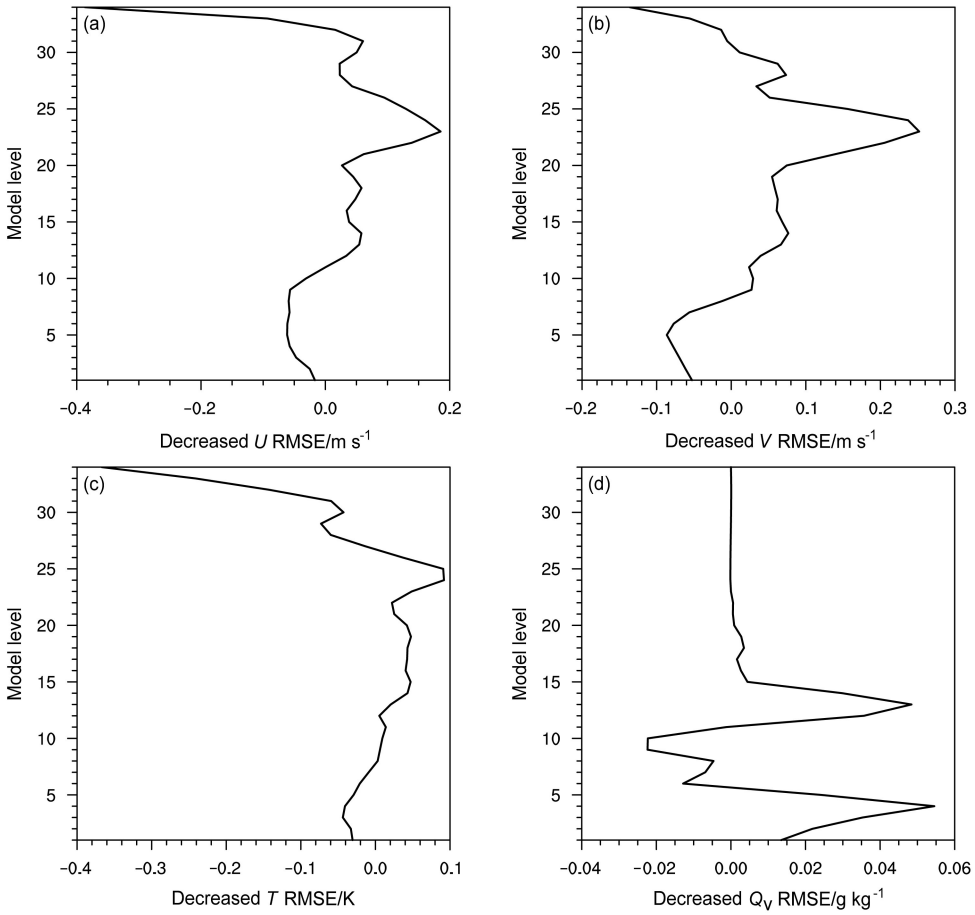

图 7　同图 5，但为 48 h 预报降低的均方根误差分布

Fig. 7　As in Fig. 5, but for RMSE distributions of the decrease in the 48-h forecast

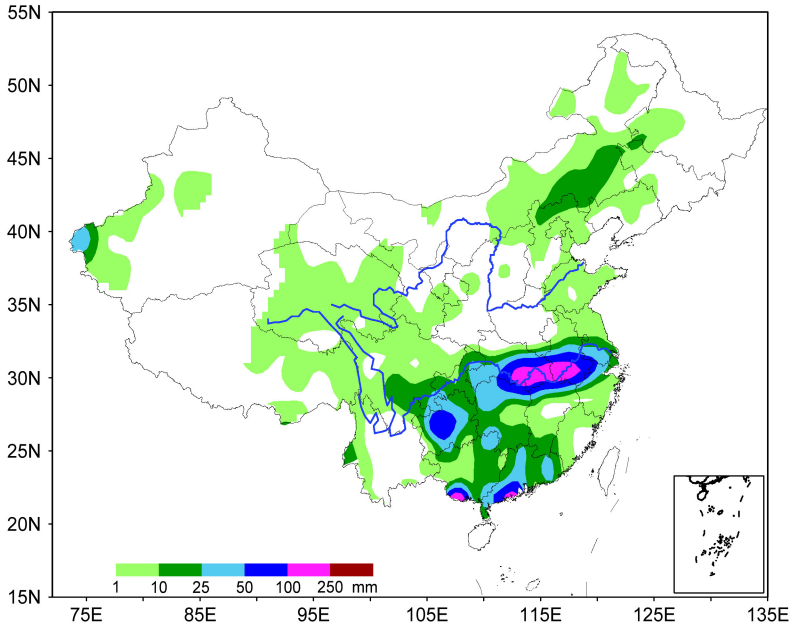

图 8　2019 年 5 月 25 日 08 时到 5 月 26 日 08 时中国降水量（单位：mm）实况

Fig. 8　Precipitation (units: mm) observation for China from 0800 BJT (Beijing time) 25 May to 0800 BJT 26 May 2019

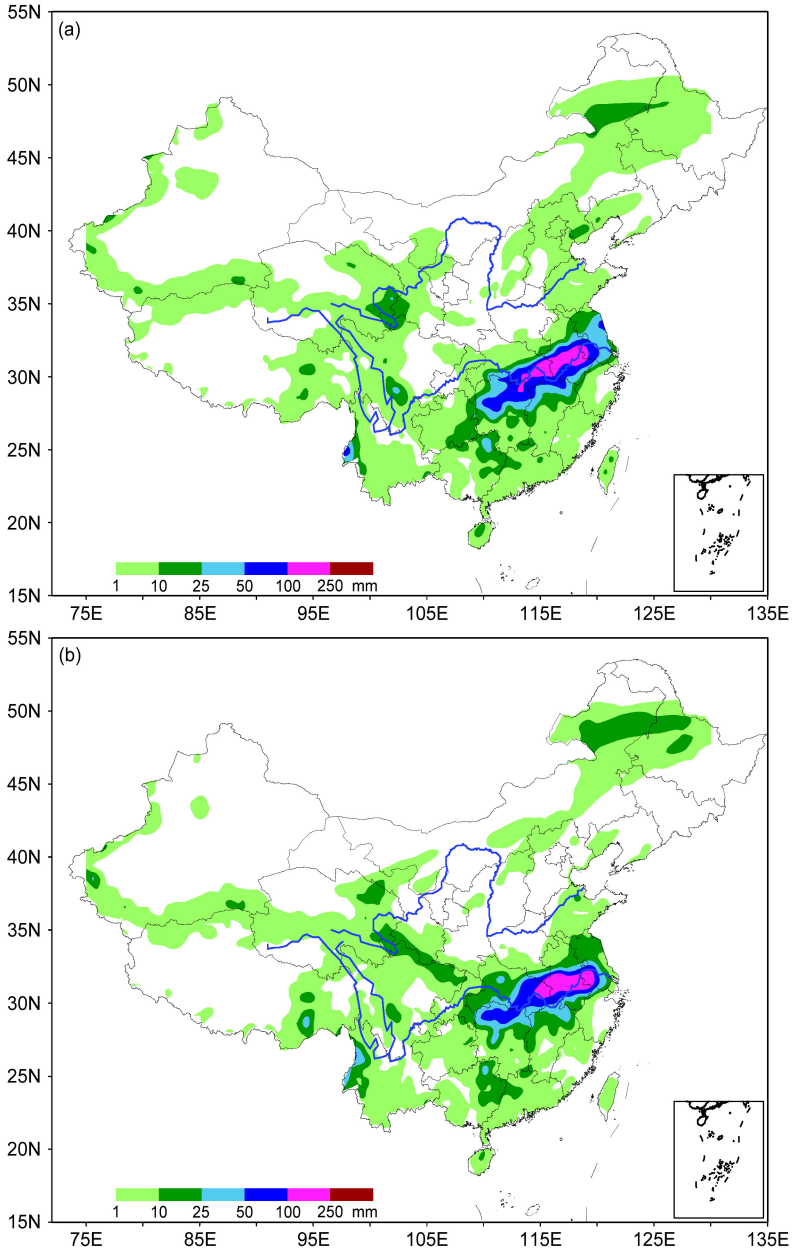

图 9　2019 年 5 月 25 日 08 时（起报时刻）到 5 月 26 日 08 时中国降水量（单位：mm）的 48 h 预报：（a）试验 CTRL；（b）试验 YHDA

Fig. 9　48-h prediction of precipitation (units: mm) for China from 0800 BJT on 25 May to 0800 BJT on 26 May 2019: (a) Experiment CTRL; (b) experiment YHDA

同化云海-2 掩星资料对于湿度场、温度场和风场的调整均有利于降水的改善，这与图 9 的降水预报结果相对应。

4　总结

本文针对中国自主的云海-2 掩星资料，基于区域数值预报模式，以 2019 年 5 月整月首次开展了同化预报试验。结合 NCEP 再分析资料（0.25°×0.25°）对风场、温度和水汽混合比等要素的预报场进行了统计分析，其次针对降水预报，分析了同化云海-2 掩星资料对降水影响及对模式要素场结构的调整，主要结论如下：

（1）同化云海-2 掩星资料对风场、温度场的改善主要体现在预报的中后期，随着预报时间的延长，改善效果逐渐增强，最后趋于稳定，而对湿度场的改善则贯穿于整个预报时间段内；对风场、温

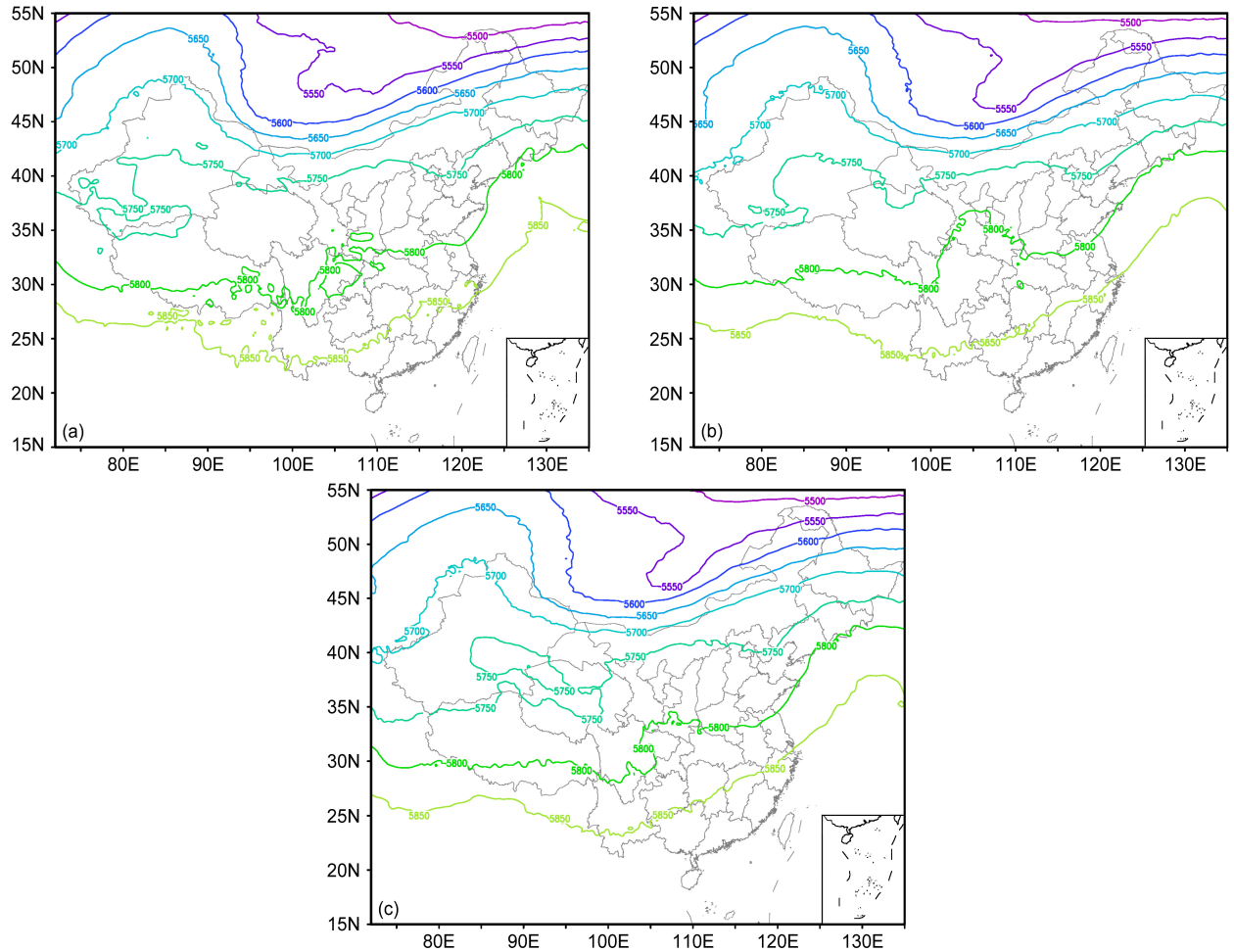

图 10 2019 年 5 月 25 日 08 时 500 hPa 位势高度场（单位：gpm）：（a）NCEP 再分析场（0.25°×0.25°）；（b）试验 CTRL、（c）试验 YHDA 的 24 h 预报场

Fig. 10 500-hPa geopotential height field (units: gpm) at 0800 BJT on 25 May 2019: (a) NCEP reanalysis data (0.25°×0.25°); the 24-h prediction fields for (b) experiment CTRL, (c) experiment YHDA

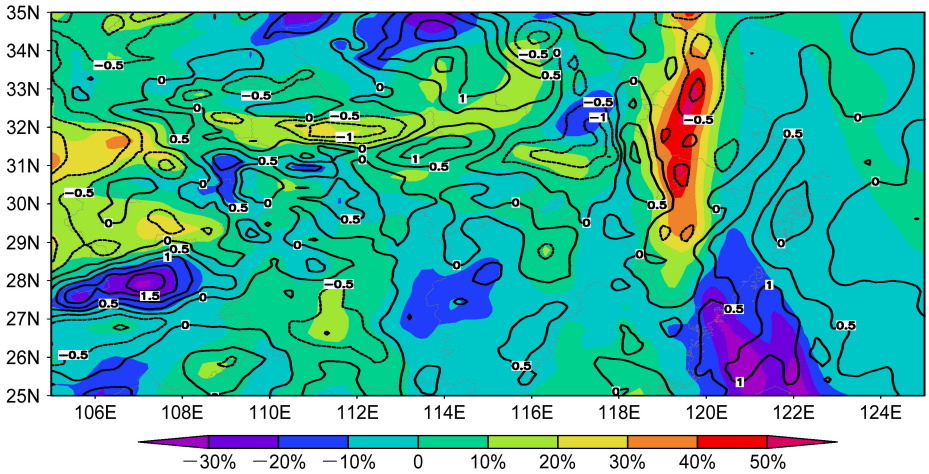

图 11 2019 年 5 月 25 日 08 时试验 YHDA 相对于试验 CTRL 的 700 hPa 比湿增量场（彩色阴影）和温度增量场（黑色等值线，单位：K）

Fig. 11 Specific humidity increment field (color shadings) and temperature increment field (black contours, units: K) at 700 hPa for experiment YHDA relative to experiment CTRL at 0800 BJT on 25 May 2019

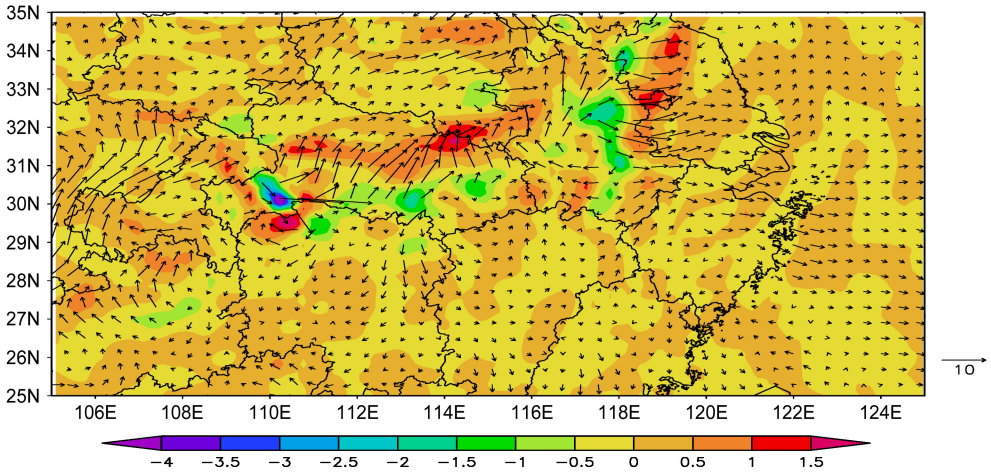

图 12　2019 年 5 月 25 日 08 时试验 YHDA 相对于试验 CTRL 的 700 hPa 风场增量（箭头，单位：m s^{-1}）和散度场增量（彩色阴影，单位：10^{-4} s^{-1}）

Fig. 12　Wind increment field (vectors, units: m s^{-1}) and divergence increment field (color shadings, units: 10^{-4} s^{-1}) at 700 hPa for experiment YHDA relative to experiment CTRL at 0800 BJT on 25 May 2019

度场的调整改善程度也随着预报时间的延长逐渐增强，而湿度场的改善程度则相对平稳，风场、温度场和湿度场的改善程度随着预报时间延长最终趋于一致。

（2）同化云海-2 掩星对风场和温度场的改善主要体现在模式中层，而对低层和高层的改善不理想，相对于温度场，中层风场的改善更为明显，对水汽混合比的调整则主要体现在模式的中低层，并呈现较大的波动性，改善作用主要体现在模式中低层的低层和高层。

（3）同化云海-2 掩星资料能够有效的改善降水的预报，这源于其能够有效的调整模式要素场。同化云海-2 掩星资料后 500 hPa 的位势高度场描述更加准确，700 hPa 湿度场、温度场和风场的调整则有利于降水预报的改善，与降水预报结果有着较好的对应。

由于本文是首次开展云海-2 掩星资料同化预报试验，因此结果具有一定的局限性，下一步将开展更长时间的同化试验，为云海-2 掩星资料业务化积累更多经验。

参考文献（References）

Anthes R A, Rocken C, Kuo Y H. 2000. Applications of COSMIC to meteorology and climate [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 11(1): 115−156. doi:10.3319/TAO.2000.11.1.115(COSMIC)

Cucurull L. 2010. Improvement in the use of an operational constellation of GPS radio occultation receivers in weather forecasting [J]. Wea. Forecasting, 25(2): 749−767. doi:10.1175/2009WAF2222302.1

Healy S B, Jupp A M, Marquardt C. 2005. Forecast impact experiment with GPS radio occultation measurements [J]. Geophys. Res. Lett., 32(3): L03804. doi:10.1029/2004GL020806

Healy S B, Thépaut J N. 2006. Assimilation experiments with CHAMP GPS radio occultation measurements [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 132(615): 605−623. doi:10.1256/qj.04.182

Huang C Y, Kuo Y H, Chen S H, et al. 2005. Improvements in typhoon forecasts with assimilated GPS occultation refractivity [J]. Wea. Forecasting, 20(6): 931−953. doi:10.1175/WAF874.1

Kuo Y H, Zou X, Huang W. 1998. The impact of Global Positioning System data on the prediction of an extratropical cyclone: An observing system simulation experiment [J]. Dyn. Atmos. Oceans, 27(1−4): 439−470. doi:10.1016/S0377-0265(97)00023-7

马再忠, 郭英华, 王斌. 2011. GPS 掩星观测的发展及其在气象业务中的应用现状 [J]. 气象学报, 69(1): 208−218.　Ma Zaizhong, Kuo Y H, Wang Bin. 2011. The GPS radio occultation data and its current operational applications to the numerical weather prediction [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 69(1): 208−218. doi:10.11676/qxxb2011.018

王挺, 项杰, 寇正, 等. 2015. 掩星折射率和弯角同化对台风预报影响的对比 [J]. 解放军理工大学学报, 16(3): 260−265.　Wang Ting, Xiang Jie, Kou Zheng, et al. 2015. Comparison of impact of GPS RO refractivity and bending angle data assimilation for typhoon prediction [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition) (in Chinese), 16(3): 260−265.

余江林, 寇正, 项杰, 等. 2014. 掩星弯角资料同化在一次暴雨过程中的应用 [J]. 暴雨灾害, 33(2): 181−186.　Yu Jianglin, Kou Zheng, Xiang Jie, et al. 2014. Application of GPS bending angle data

assimilation in a rainstorm event [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 33(2): 181−186. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2014.02.011

朱孟斌. 2012. GPS 无线电掩星资料同化技术研究 [D]. 国防科学技术大学硕士学位论文. Zhu Mengbin. 2012. Research on GPS radio occultation data assimilation [D]. M. S. thesis (in Chinese), National University of Defense Technology.

朱孟斌, 张卫民, 曹小群. 2013. GPS 掩星一维弯曲角算子在四维变分资料同化系统中的实现方法研究 [J]. 物理学报, 18(62): 189203. Zhu Mengbin, Zhang Weimin, Cao Xiaoqun. 2013. Research on the implementation of GPS radio occultation one-dimensional bending angle operator in four-dimensional variational data assimilation system [J]. Acta Phys. Sinica (in Chinese), 18(62): 189203. doi:10.7498/aps.62.189203

Zou X, Kuo Y H, Guo Y R. 1995. Assimilation of atmospheric radio refractivity using a nonhydrostatic adjoint model [J]. Mon. Wea. Rev., 123(7): 2229−2250. doi:10.1175/1520-0493(1995)123<2229:AOARRU>2.0.CO;2

邹逸航, 马旭林, 姜胜, 等. 2017. COSMIC 掩星资料同化对台风“天兔”预报影响的试验 [J]. 海洋学研究, 35(3): 9−19. Zou Yihang, Ma Xulin, Jiang Sheng, et al. 2017. Effect of COSMIC occultation data assimilation on prediction of typhoon Usagi [J]. Journal of Marine Sciences (in Chinese), 35(3): 9−19. doi:10.3969/j.issn.1001-909X.2017.03.002