

东亚区域大气再分析技术研究及资料集建设

尹金方¹ 梁旭东¹ 陈锋² 刘英¹ 何会中¹ 梁钊明¹ 邹海波³ 徐建军⁴ 郝世峰² 谢衍新¹

(1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2 浙江省气象局, 杭州 310017;

3 江西省气象灾害应急预警中心, 南昌 330046; 4 广东海洋大学海洋与气象学院, 湛江 524088)

摘要: 从资料搜集、同化系统、数值模式、检验评估四个方面介绍了东亚区域大气再分析技术研究及资料建设取得的进展。就观测资料而言, 搜集了常规地面和探空、飞机观测、GPS、雷达、风廓线、卫星导风、野外试验等观测资料。其中未参加国际交换的地面、探空资料、雷达等观测资料是本再分析资料构建的特色之一。针对Gridpoint Statistical Interpolation (GSI) 同化系统, 开展了该系统的本地化移植, 并改进了GSI雷达径向风同化算子。对于Weather Research and Forecasting Model (WRF-ARW) 模式, 采用多组物理过程参数化方案组合, 开展了批量个例和长时间模拟试验, 并基于试验结果优化了模式的配置。检验评估系统采用NCAR模式评估系统MET。目前, 再分析系统搭建及优化已完成, 试验结果表明再分析系统初步具有在全球再分析的基础上提高区域再分析资料性能的能力, 可将本再分析系统用于今后再分析数据的研制。

关键词: 东亚地区, 区域大气再分析, 再分析系统, 资料同化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.009

Development of Atmospheric Data Assimilation Techniques and Regional Reanalysis Datasets in the East Asia

Yin Jinfang¹, Liang Xudong¹, Chen Feng², Liu Ying¹, He Huizhong¹,
Liang Zhaoming¹, Zou Haibo³, Xu Jiangjun⁴, Hao Shifeng², Xie Yanxin¹

(1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Zhejiang Meteorological Bureau, Hangzhou 310017 3 Meteorological Sciences Institute of Jiangxi Province,

Nanchang 330046 4 College of Ocean and Meteorology Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088)

Abstract: The atmospheric reanalysis in the East Asian region is the fifth sub-project of the key mission of China Meteorological Administration—"Meteorological Data Quality Control and Multi-source Data Fusion and Reanalysis". In this paper, the progress of the development of atmospheric reanalysis in East Asia is documented from four aspects of data collection, assimilation system, numerical model, and verifications. In terms of observational data, of conventional ground-based observations and sounding, aircraft, GPS, radar, wind profile, satellite observations have been collected, as well as data from field experiments. One of the characteristics of the regional reanalysis is that lots of observational data such as some conventional ground-based and sounding observations, and radar datasets are used, which are not shared with the Global Communications System (GTS). As for the data assimilation system, the Grids Statistical Interpolation (GSI) assimilation system is introduced and localized, especially with the radial wind radar assimilation operator improved. For the Weather Research and Forecasting Model (WRF-ARW) model, experiments of real cases and long-term simulations have been completed with multiple physical parameterization options, and the model configurations have been optimized based on the experimental results. Besides, the NCAR Model Evaluation Tools (MET) has been introduced to build the verification system. At present, the reanalysis system has been completed and optimized. The experimental results show that the reanalysis system has a potential performance of improving the regional reanalysis based on a global reanalysis data. Therefore, the reanalysis system can be used to generate regional reanalysis datasets over East Asia in the future.

Keywords: East Asia, regional atmospheric reanalysis, reanalysis system, data assimilation

0 引言

大气再分析资料在天气、气候研究以及各种应

用中已经得到广泛的应用。针对区域天气、气候研究以及能源、环境等应用需求, 高时空分辨率的区域再分析得到快速发展。美国NCEP于2005年开始建立北美区域再分析系统(North American Regional Reanalysis, NARR)^[1], ECMWF开发了覆盖整个欧洲的高分辨率再分析系统(High Resolution Regional

收稿日期: 2017年7月10日; 修回日期: 2018年1月18日

第一作者: 尹金方(1984—), Email: yinjf@cma.gov.cn

通信作者: 梁旭东(1971—), Email: liangxd@cma.gov.cn

Reanalysis for Europe, HRRRE)^[2], 美国NCAR等机构共同建立了北极区域的再分析系统 (Arctic System Reanalysis, ASR)^[3], 美国阿拉斯加州立大学等机构建立了白令海峡大气再分析系统 (Chukchi-Beaufort High-Resolution Atmospheric Reanalysis, CBHAR)^[4], 芬兰和瑞典在ECMWF的组织下完成了波罗的海地区的再分析系统^[5], 德国气象局组织建立了德国及欧洲区域的再分析系统 (CORDEX: High-resolution Regional Reanalysis for the European CORDEX Domain)^[6], 日本在全球再分析的基础上建立了东亚区域高分辨率 (25 km) 再分析系统。

近30年来, 中国气象局积累了丰富的观测资料, 为东亚区域大气再分析提供了很好的基础。针对再分析资料的广泛需求, 中国气象局设立了“气象资料质量控制多源数据融合与再分析”攻关任务 (2015—2020年), 东亚区域再分析是该攻关任务的一个攻关方向。通过攻关任务的实施, 将用6年时间, 初步建立我国的东亚区域再分析资料集并建立再分析业务技术体系。

东亚区域再分析的研究任务包括: 同化系统优化及观测资料同化效果研究; 适合东亚区域的模式物理过程试验研究; 东亚区域再分析系统集成与再分析数据集的研制; 东亚区域再分析数据集检验与评估。研究目标是发展有效同化多源观测资料的东亚区域再分析关键技术, 建成我国第一代东亚区域大气再分析系统, 制作10年 (2008—2018年) 的较高分辨率 (东亚区域10~15 km, 局地3~4 km) 的东亚区域再分析数据产品。

1 东亚区域再分析系统建设

建立集成的东亚区域再分析系统, 包括资料预处理、资料同化、数值模式、检验与评估四个部分。

1.1 资料收集及预处理

目前可利用的观测资料包括常规地面和探空、飞机观测、GPS、雷达、风廓线、卫星导风、野外试验等观测资料。区域再分析的特色之一是采用更多的全球再分析中没有使用的资料。因此, 东亚区域再分析中针对探空、雷达、地面观测、地基GPS/Met、飞机报、风廓线等资料进行进一步的收集, 以便得到当前东亚地区最为完善的观测资料集。以探空资料为例 (图1), 黑色圆点表示探空观测的国际交换站空间分布, 红色圆点表示未参加交换的探空观测空间分布。红色圆点这部分观测资料即为新增部分, 在其它再分析资料中是没有使用到的。此外, 区域再分析中探空资料采还包括时间加密观测, 从而一定程度上增

加了探空资料的空间分辨率和时间分辨率。需要指出的, 雷达观测资料是全部未参与国际交换。

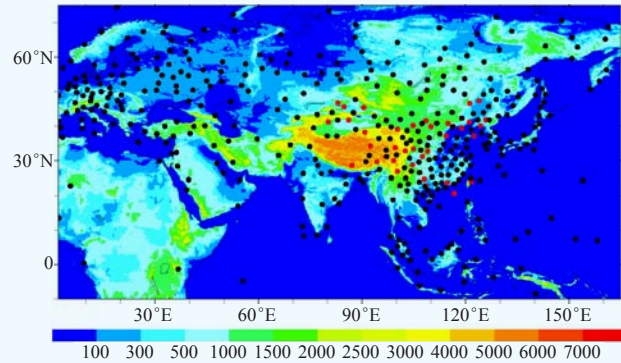


图1 探空观测的空间分布 (红色点为中国未参加国际交换的探站点, 填色代表地形)

Fig. 1 Spatial distribution of sounding stations (The red dots represent the observational data which are not shared with the Global Communications System (GTS), and the shaded with colors is terrain)

1.2 同化系统

基于Gridpoint Statistical Interpolation (GSI) 资料同化系统^[7], 开展了GSI同化系统的本地化移植和优化, 实现了地面、探空、雷达、风廓线、GPS/MET等多源资料的同化, 从而建立了基于GSI的循环同化模块。通过长时期模拟试验测试了GSI同化系统的稳定性。针对不同的观测资料, 开展了观测资料的同化效果分析。例如, 同化风廓线资料后, 对低层风场改进明显, 从而激发上升运动。

GSI中原始雷达径向风资料同化是以径向风作为观测算子进行同化, 缺乏有效的切向风信息, 存在一定不足。为了改善GSI同化系统对雷达资料的同化效果, 重点改进了雷达径向风同化算子。GSI中的原始径向风同化算子为问题

$$V_r^* = u \cos \theta \cos \phi + v \sin \theta \cos \phi + w \sin \phi, \quad (1)$$

其中, V_r^* 为径向风速, u 为纬向风, v 为经向风, w 为垂直风, θ 为雷达方位角, ϕ 为雷达仰角。

当雷达仰角较小时 (小于 5°), 垂直分量对雷达径向风影响较小, 将径向风中垂直分量扣除后式 (1) 变为:

$$V_r = u \cos \theta + v \sin \theta, \quad (2)$$

$$V_r = (V_r^* - w \sin \phi) / \cos \phi. \quad (3)$$

GSI中原始径向风同化方法是式 (2) 的右端作为观测算子。通过式 (2) 可以发现, 原始径向风观测算子仅能引入单一的径向风增量, 通过同化系统后会产生风场二维增量, 即同化系统在吸收径向风信息后根据背景误差协方差矩阵调节得到风场的切向分

量。也就是说，分析风场在径向上吸收了观测资料而体现出观测场的特征，而切向分量则无法反映观测场的切向特征。

为了改进雷达径向风的同化效果，引入了以IVAP反演方程组为基础的同化算子^[8-9]。该方法采用提取单位分析单元内的平均风信息在同化系统背景场和物理条件的约束下，求取式(4)左右两端极小化得到分析风场。

$$\begin{cases} \frac{\sum_{\Omega} V_r \cos \theta}{\sum_{\Omega} \cos^2 \theta} = \bar{u} - \frac{\sum_{\Omega} \sin \theta \cos \theta}{\sum_{\Omega} \cos^2 \theta} + \bar{v} \\ \frac{\sum_{\Omega} V_r \sin \theta}{\sum_{\Omega} \sin^2 \theta} = \bar{u} + \bar{v} - \frac{\sum_{\Omega} \sin \theta \cos \theta}{\sum_{\Omega} \sin^2 \theta} \end{cases}, \quad (4)$$

式中， \bar{u} 和 \bar{v} 分别为分析单元 Ω 内的平均纬向风和经向风，分析单元 Ω 为一定区域（如12 km×12 km）的正方形区域，这样避免了分析单元随距离雷达中心的位置改变而发生形变的情况，同时也自动解决了观测资料的稀疏化问题。通过式(4)可以发现，同化变量由传统单一的径向风变量转变为径向风在经向和纬向

上的投影项，在引入真实径向风的同时引入了部分切向信息，使得进入同化系统的信息是完整的风场观测信息。也就是说，引入径向风在经向和纬向投影上的两个信息后通过同化系统得到常规风场的两维增量，即两个方程(式4)求解得到两个未知变量（常规风场的两维分量增量）满足了计算方程组的闭合问题。

根据上述同化理论，改进了的GSI雷达径向风同化算子，并开展了个例模拟试验分析。针对2013年菲特台风，选取2013年10月6日06—12时刻雷达径向风资料进行。采用原始方法(RW)和新方法(IVAP)分别同化雷达资料后可以看到，同化雷达径向风在一定程度上增强了近台风中心的风场结构，尤其是在台风第一、四象限的风速增加较为明显。从图2中可以看出，改进算子试验模拟出的台风风场增量更为显著，尤其是在台风第四象限模拟出了约10~15 m/s的西南风增量，使整个风场增量场闭合形成了较为完整的逆时针涡旋结构，也增强了整个台风的结构和强度。这主要得益于IVAP方法将部分切向风信息的引入，增强了对整个风场的调整程度，得到了更为准确的风场。

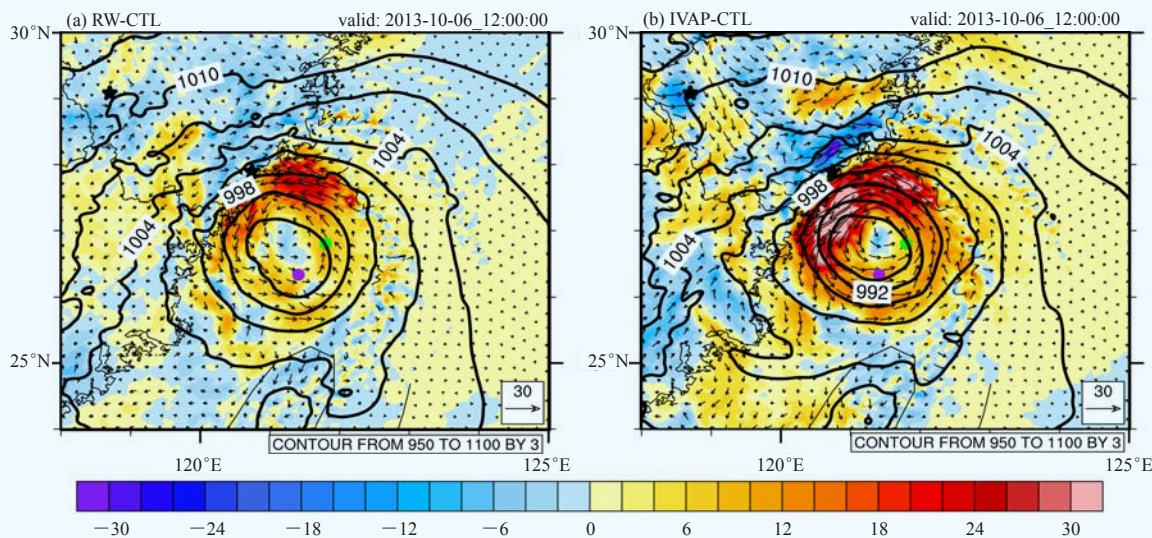


图2 同化后3 km高度层风场增量和海平面气压：(a)原方法和(b)改进方法

Fig. 2 Horizontal wind increments at 3 km level above ground after radar data assimilation with (a) the original method and (b) the improved method. The shaded in colors is wind speed and the contours are sea level pressure

图3 给出了三组试验对台风未来12 h的路径和强度预报。由图可见，得益于雷达径向风同化对台风初始结构和风场特征的改进，RW试验和IVAP试验预报的台风路径均比对照(CTL)试验有明显改进，三组试验的平均路径误差分别为77.2、61.3和44.7 km。RW试验在1~5 h内路径误差波动明显，而后均优于CTL试验。IVAP试验得益于同化对1~5 km有雷达资料区

域的风场的改进，其预报的前8 h一直维持在40 km范围内，而后逐渐增加到80 km，比RW试验有明显优势。从强度模拟上看，RW试验和IVAP试验模拟的中心气压强度误差均小于CTL试验，虽然其强度数值上离观测还有较大差距，但IVAP试验给出了最接近的结果。从近中心最大风力上来看，CTL试验在登陆前模拟的风场强度明显偏弱，RW试验减小了模拟偏差，

而IVAP试验模拟出与实况相当的风速。但是对于台风登陆后IVAP模拟的风场却明显偏强。整体而言,对台风12 h的路径和强度预报表明,雷达径向风同化通过对台风初始结构和风场的改进,使预报的台风路径误差比不同化时有明显减小,而改进同化算子后,预报精度有进一步的提高。

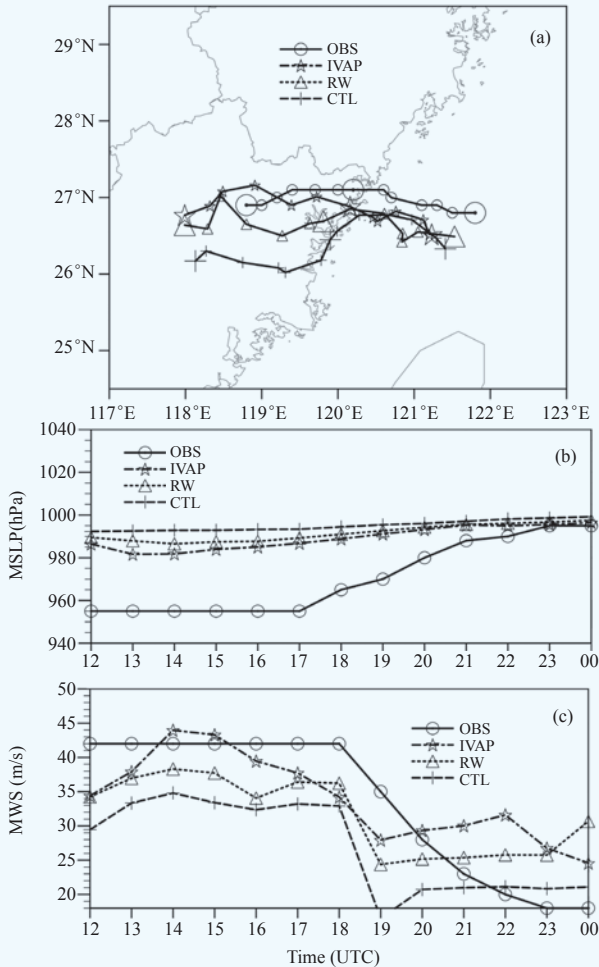


图3 台风路径和强度预报对比: (a) 三种预报路径与观测路径; (b) 预报中心最低海平面气压误差; (c) 预报最大风速。其中, OBS为观测, CTL为不同化雷达资料的比较试验, RW为GSI原方法同化雷达资料, IVAP为基于IVAP方法的改进同化算子同化试验

Fig. 3 Comparisons of predicted (a) tracks, (b) MSLP, and (c) MWS of Typhoon Fitow to observations with no radar data assimilation (CTL), radar data assimilation with the original method (RW) and the improved method (IVAP)

1.3 数值模式系统

东亚区域大气再分析系统采用Weather Research and Forecasting Model (WRF-ARWv3.8.1) 中尺度模式^[10]。在模式配置过程中,综合考虑了东亚区域的天气和气候特征,确定了大气再分析系统的流程和模式参数配置。模式区域的设置主要考虑以下五个方面:

1) 模式区域空间范围,模式空间区域需包括全中国的范围,尤其是南海“九段线”范围(图4); 2) 主要天气系统,利用近10年的ERA-Interim再分析数据分析了高中低3个主要层次的天气形势^[11]。850 hPa考虑了索马里急流到中南半岛的西南季风水汽输送带、太平洋近赤道东北信风水汽输送高值区的影响; 500 hPa主要捕捉东北亚大槽、北欧高压脊和乌拉尔山高压脊的位置演变的影响(图5); 200 hPa层次包括中纬度高空急流区的主体位置,侧重西边界效应; 3) 模式边界地形,模式边界应处在地形变化缓慢的区域,同时避免在海陆交界的地区; 4) 地图投影及投影因子,由于区域范围较大,在设置模式中心点时,应控制地图投影因子在1.0左右; 5) 模式区域地表特征,下垫面属性对模式的影响较明显,范围的设置需同时兼顾地表属性。

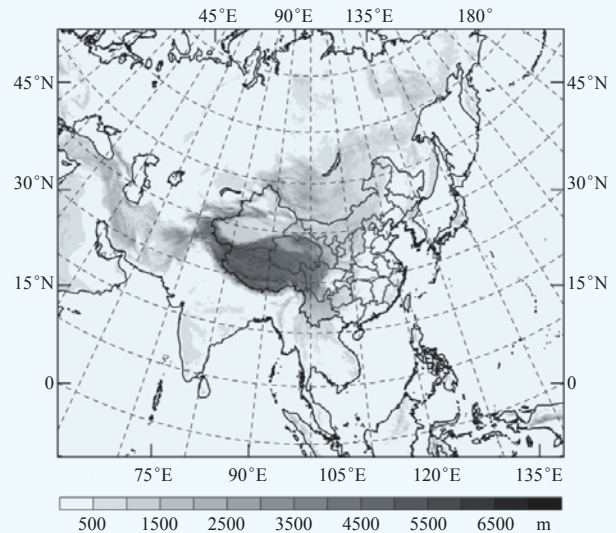


图4 模式区域设置(填色表示地形高度)
Fig. 4 Spatial coverage of the model domains (shade represents terrain)

根据本攻关任务的需求,结合东亚区域的地理特征,模式分辨率设置为12 km,垂直层次为74层,模式顶高10 hPa。为了使模式能够更好地分辨复杂地形,在模式低层进行层次加密,即模式的厚度层从低层到高层,厚度逐渐增加。基于对东亚地区天气系统的模拟研究的调研结果,开展了不同物理过程组合的系列敏感性试验。根据试验结果,云微物理参数化方案选取Thompson方案^[12],边界层参数化方案采用YSU方案^[13],积云对流参数化方案采用新Kain-Fritsch方案^[14],陆面参数化方案为Noah-MP方案^[15],长短波辐射参数化方案采用rrtmg方案^[16]。

东亚区域再分析系统设计中采用了循环同化,为了确定循环同化的时间间隔,采用地表气压随的时间

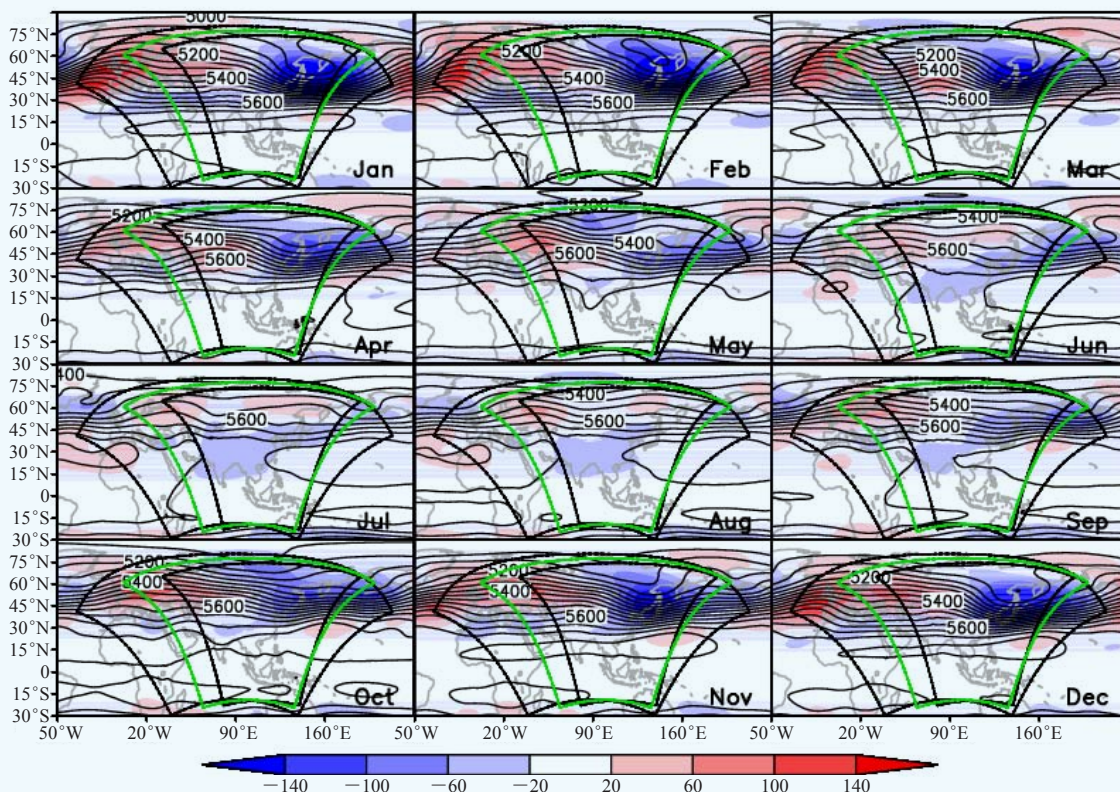


图5 东亚区域500 hPa层主要天气系统

Fig. 5 Main synoptic systems at 500 hPa level over East Asia

变化来确定模式起转 (spin-up) 时间。图6显示的是模式区域平均地表气压随时间的变化。从图中可以看出, 模式积分300 min后, 模式地表气压倾向变化趋于稳定。因此, 本系统中spin-up时间设为6 h。

东亚区域大气再分析系统整体框架如图7所示, 系统用hybrid-3Dvar同化方法。系统采用ERA-Interim再分析资料作为背景场, 每天18 UTC时冷启动一次, spin-up时间为6 h。随后模式每3 h一次循环, 分别在同化时刻生成再分析数据, 并输出每小时一次预报

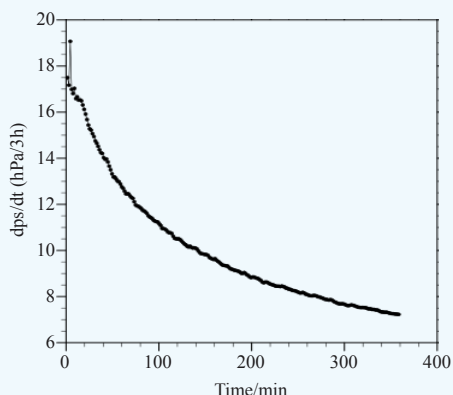


图6 模式区域平均地表气压倾向随时间的变化

Fig. 6 Evolution of the domain-averaged surface pressure tendency

场。对于模式的集成员的产生采用两种方式, 其中第一组10个成员叠加随机扰动, 第二组10个成员采用不同的物理参数化方案, 第三组10个成员采用第二组的参数化方案并叠加随机扰动。

1.4 初步试验评估

为了测试本再分析系统的性能, 首先开展了为期一个月(2014年7月)的控制试验(不同化任何资料)。利用模式区域内的常规站点观测资料对模式结果进行

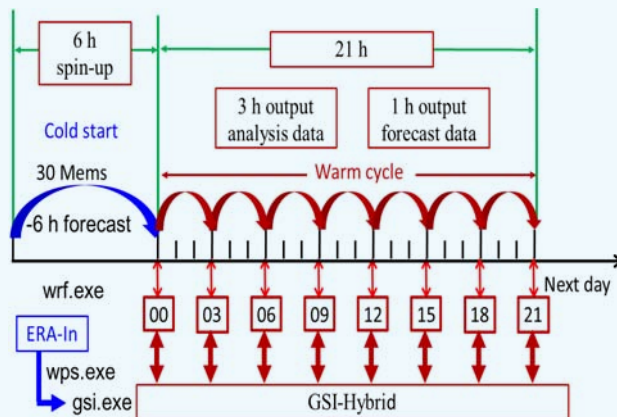


图7 东亚区域再分析系统流程

Fig. 7 Flowchart of the reanalysis system

了检验。从高空要素（表1）和地面要素（表2）评估结果来看，控制试验所得的高空要素的均方根误差均小于原有ERA-Interim，地面要素的均方根误差略大于ERA-Interim资料。进一步分析地面要素场发现，地面要素场能够反映出时间、空间变化的中小尺度特征。此外，对1、4和10月做了同样的试验和评估，结果一致。整体而言，本系统能够保留原有ERA-Interim大尺度信息的同时，又能够反映出局地的细微特征。因此，可将本再分析系统用于今后再分析数据的研制。

表1 降尺度试验高空要素检验结果

Table 1 Vertical levels verification of the downscaling experiments

		全天	00时	12时
高度	再分析均方差	12.985	11.628	14.191
	ERA均方差	22.134	22.758	21.482
温度	再分析均方差	1.492	1.389	1.577
	ERA均方差	1.856	1.818	1.883
湿度	再分析均方差	19.934	18.868	20.929
	ERA均方差	27.533	28.054	26.978
U	再分析均方差	3.609	3.304	3.890
	ERA均方差	3.946	3.927	3.956
V	再分析均方差	3.474	3.216	3.713
	ERA均方差	4.059	4.013	4.103

表2 降尺度试验地面要素检验结果

Table 2 Surface verification of the downscaling experiments

		全天	00时	06时	12时	18时
2 m温度	再分析均方差	2.974	2.521	3.375	3.195	2.725
	ERA均方差	2.825	2.499	3.162	2.970	2.618
2 m相对湿度	再分析均方差	13.933	11.136	14.640	16.577	12.786
	ERA均方差	11.204	9.700	12.194	12.116	10.611
10 m经向风	再分析均方差	1.861	1.713	2.198	1.817	1.669
	ERA均方差	1.728	1.553	2.061	1.729	1.516
10 m纬向风	再分析均方差	2.058	1.943	2.320	1.997	1.946
	ERA均方差	1.981	1.904	2.223	1.913	1.862

2 结论及展望

本文介绍了中国气象局“气象资料质量控制多源数据融合与再分析”攻关任务的第五攻关方向——东亚区域大气再分析项目取得的进展。围绕着东亚区域大气再分析需求，收集整理各类观测资料，基于WRF模式及GSI同化系统建立了东亚区域大气再分析系统。该系统由资料预处理、资料同化、数值模式和检验与评估四部分组成。模式设置综合考虑了东亚区域的地理地貌特点、天气气候特征等因素。改进了GSI同化系统对雷达资料径向风的同化算子，使得同

化径向风能够同时引入更加合理的风场信息。基于已搭建的东亚区域大气再分析系统，开展了个例模拟和批量降尺度试验。个例试验结果表明，该系统能够较好的再现典型天气过程特征。降尺度试验结果检验显示，高空要素的均方根误差均小于原有ERA-Interim，地面要素的均方根误差略大于ERA-Interim资料。整体而言，该系统初步具有在全球再分析的基础上提高区域再分析资料性能的能力，可将本系统用于今后再分析数据的研制。今后将针对常规观测、雷达、地基GPS、飞机报等资料的同化及进一步优化完善，在此基础上构建东亚区域大气再分析数据集。

参考文献

- [1] Mesinger F, Dimego G, Kalnay E, et al. North American Regional Reanalysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 2006, 3(3): 343-360.
- [2] Dahlgren P, Landelius T, Källberg P et al. A high-resolution regional reanalysis for Europe. Part 1: Three-dimensional reanalysis with the regional High-Resolution Limited-Area Model (HIRLAM). *Q J R Meteorol Soc*, 2016, 142: 2119-2131.
- [3] Bromwich D H, Wilson A B, Bai L, et al. A comparison of the regional arctic system reanalysis and the global ERA-Interim reanalysis for the Arctic. *Q J R Meteorol Soc*, 2016, 142, 644-658.
- [4] Krieger J R, Zhang J, Liu F, et al. Regional reanalysis over the Beaufort and Chukchi Seas. 2012, AGU Fall Meeting.
- [5] Fortelius C, Andræ U, Forsblom M. The BALTEX regional reanalysis project. *Boreal Environment Research*, 2002, 7: 193-201.
- [6] Bollmeyer C, Keller J D, Ohlwein C, et al. 2015. Towards a high-resolution regional reanalysis for the European cordex domain. *Q J R Meteorol Soc*, 2015, 141: 1-15.
- [7] Shao H, Derber J, Huang X Y, et al. Bridging research to operations transitions: Status and plans of community GSI. *Bull Amer Meteor Soc*, 2016, 97: 1427-1440.
- [8] Liang X D. An integrating velocity-azimuth process single-doppler radar wind retrieval method. *J Atmos Oceanic Technol*, 2007, 24: 658-665.
- [9] Chen F, Liang X D, Ma H. Application of IVAP-based observation operator in radar radial velocity assimilation: The case of typhoon Fitow. *Mon Wea Rev*, 2017, 145: 4187-4203.
- [10] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 2008.
- [11] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q J R Meteorol Soc*, 2011, 137(656): 553-597.
- [12] Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Mon Wea Rev.*, 2008, 136(12): 5095-5115.
- [13] Hong S-Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon Weather Rev*, 2006, 134(9): 2318-2341.
- [14] Kain J S. The kain-fritsch convective parameterization: An update. *J Appl Meteorol*, 2004, 43(1): 170-181.
- [15] Niu G-Y, Yang Z-L, Mitchell K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP) I: Model description and evaluation with local-scale measurements. *J Geophys Res: Atmos*, 2011, 116(D12): D12109.
- [16] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J Geophys Res: Atmos*, 1997, 102(D14): 16663-16682.