

我国全球大气再分析（CRA-40）卫星遥感资料的收集和预处理

王旻燕¹ 姚爽¹ 姜立鹏¹ 刘志权² 师春香¹ 胡开喜¹ 张涛¹ 张志森¹ 刘景卫¹

（1 国家气象信息中心，北京 100081；2 美国国家大气研究中心，博尔德 80301，美国）

摘要：卫星资料对数值天气预报准确率的影响非常显著。可用于1979年以来全球大气再分析的卫星资料，来源于80余颗卫星的约60种星载传感器，卫星观测资料数据格式的标准化、长时间序列数据使用和均一化处理技术难点多。在推进我国全球大气再分析（CRA-40，1979—2018年）研发时，已优先开展并全面完成了83.5TB的1979年以来53种115个子类气象卫星资料的收集整理。介绍了面向我国全球大气再分析所用卫星资料的收集整理情况、对应于10年再分析试制产品CRA-Interim（2007—2016年）的数据格式标准化和卫星资料数据质量预评估等观测资料预处理情况。近年发布的重处理卫星数据产品已替换了原同期业务产品。所收集整理的这些历史和实时卫星资料，已逐步通过全国综合气象信息共享平台（CIMISS）归档和提供应用服务。

关键词：再分析，CRA-40，卫星遥感资料，收集整理，预处理，同化

DOI：10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.021

Collection and Pre-Processing of Satellite Remote-Sensing Data in CRA-40 (CMA's Global Atmospheric ReAnalysis)

Wang Minyan¹, Yao Shuang¹, Jiang Lipeng¹, Liu Zhiquan², Shi Chunxiang¹,
Hu Kaixi¹, Zhang Tao¹, Zhang Zhisen¹, Liu Jingwei¹

(1 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

2 National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO 80301)

Abstract: Satellite data is of significance on the accuracy of numerical forecast. The satellite data were used for global atmospheric reanalysis collected from more than 80 satellites, about 60 kinds of space-borne sensors since 1979. There are a number of difficulties in the satellite observational data format conversion, long time series data application and homogenization. So far, 83.5 TB in 53 kinds (115 sub kinds) of meteorological satellite data are collected and integrated for researches on the CMA's global atmospheric Re-Analysis (CRA-40, 1979-2018) in the first stage. This paper reviewed and summarized the satellite data collection and integration for global atmospheric reanalysis, the data pre-processing such as data format conversion and the pre-evaluating satellite data quality. We focus on the CRA-Interim (2007-2016) reanalysis products. The reprocessed satellite products released for recent years will replace the old operational products. These historical and real-time satellite data are achieved and shared gradually via the China Integrated Meteorological Information Service System (CIMISS).

Keywords: reanalysis, CRA-40, satellite remote-sensing data, collection and integration, pre-processing, assimilation

0 引言

从20世纪90年代中期开始，美国、欧盟和日本等先后组织和实施了一系列全球大气再分析计划，这些计划生成的再分析产品使用价值和获得的应用效

益，已远远超过观测资料本身。全球大气再分析是利用当前最先进并固定的同化系统，对多源历史观测资料进行同化分析，从而获取空间覆盖完整、时间序列均一、大气状态变量协调的长时间序列大气要素分析场。自1979年全球大气研究计划第一次全球试验（FGGE）以后，大气分析场的科研和社会应用价值逐渐被重视起来。20世纪90年代，NASA DAO^[1]（ $2^\circ \times 2.5^\circ$ ，14层）、NCEP R1^[2]（210 km，28层）、ERA-15^[3]（125 km，31层）等使用最优插值同化技

收稿日期：2017年6月30日；修回日期：2017年12月15日

第一作者：王旻燕（1979—），Email：wangmy@cma.gov.cn

资助信息：公益性气象行业专项（GYHY201506002）；国家气象科技创新工程攻关任务“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”

术的第一代全球大气再分析问世。21世纪初,以三维变化同化技术为特色的第二代再分析产品NCEP R2^[4] (210 km, 28层)、ERA-40^[5] (125 km, 60层)、JRA-25^[6] (110 km, 40层)极大地推动了现代大气科学的发展。2010年后,以增量分析更新、四维变分、耦合同化为特色的第三代再分析产品CFSR^[7] (38 km, 64层)、MERRA^[8] (1/2°×2/3°、72层)、ERA-Interim^[9] (79 km, 60层)、JRA-55^[10] (55 km, 60层)时间序列更长、空间分辨率更高、多圈层耦合性更强。目前,国际上正在实施第四代混合变分、四维同化集合变分的全球大气再分析计划,如ERA-5^[11-12] (31 km, 137层)、JRA-3Q、NCEP/ESRL等。

大气再分析涉及数值模式、资料同化和资料处理技术,被认为是一个国家气象综合实力的体现。但迄今为止,我国还没有自主研发的大气再分析产品,气象业务和科研上摆脱不了对欧美的依赖。因此,研发中国自主的全球大气再分析产品已刻不容缓。

我国全球大气再分析CRA-40 (CMA's Global Atmospheric ReAnalysis, 1979—2018年)计划^[13]的总体目标是制作四个40年数据集,其中,原始观测数据集是再分析数据集、同化反馈数据集、再分析不确定性数据集的基础。常规观测数据的积累我国已有很好的基础,而用于全球大气再分析的1979年以来全球卫星遥感历史数据的处理,无论是清单制定、来源确认、数据获取、规范整合,还是格式标准化、黑名单信息应用、同化测试、质量控制和评估等,都存在相当大的空白。

全球数值预报不使用卫星资料,可使预报准确率下降23.4%,而不使用探空观测的 T 、 q 、 u 和 T 、 q 将使预报准确率分别下降9.9%和2.2%,卫星资料对预报准确率的影响大大超过传统的探空观测^[14]。国家气象信息中心自2013年底开始牵头准备和组织全球大气再分析计划以来,考虑到全球卫星遥感数据中历史数据和实时数据的不同特点,已全面完成了历史卫星数据的收集整理和实时数据接入;数据格式转换、数据预评估等数据预处理也分别针对实时数据、历史数据逐步开展。

本文第1部分分析了2010年以后国际上全球大气再分析对卫星遥感资料的需求,第2部分总结了我国第一代全球大气再分析的卫星资料收集整理情况,第3部分针对同化应用需求具体描述了与观测资料使用相关的数据格式标准化处理、不同来源数据选择和拼接、卫星数据质量预评估的情况。第4部分对全文进行总结。

1 全球大气再分析所用卫星遥感资料

用于全球大气再分析的卫星观测资料,涉及到1979年以后的近80余颗气象观测卫星的60种左右星载传感器^[13]。其中,气象观测卫星包括近20余颗静止气象卫星和60颗左右极轨卫星、美国国防卫星、GPS导航卫星,星载传感器包括近10个静止卫星上搭载的传感器和近50个极轨卫星传感器。用于ERA-Interim的卫星仪器数接近50台,1989年只有6台,而2010年达到20台^[9]。美、欧、日、中、印、加、法等国家全球空间对地遥感观测系统的建立,以及卫星遥感技术的发展,极大程度地弥补了常规探测在观测范围、观测采样、协同观测等方面的局限性。

国际上第三代全球再分析产品CFSR^[7]、MERRA^[8]、ERA-Interim^[9]、JRA-55^[10]等的卫星观测资料输入,主要以极轨卫星垂直探测的辐射率或亮温(SSU、MSU、AMSU-A、AMSU-B/MHS、HIRS等)、GPS掩星观测的大气廓线(CHAMP、COSMIC等)、静止及极轨卫星观测的大气运动矢量(GOES、METEOSAT、GMS和MTSAT、FY-2、TERRA和AQUA/MODIS、NOAA和MetOp/AVHRR等)、洋面风(ERS、QuikSCAT、ASCAT等)和浪高、臭氧等数据为主。浪高数据的输入取决于再分析计划是否使用海洋模式。降雨率/大气可降水/气溶胶光学厚度等卫星产品,也会选择性地使用。除此以外,国际第三代再分析产品的制作过程中大量使用了静止卫星辐射率和极轨卫星高光谱数据,例如,ERA-Interim使用美、日、欧静止卫星晴空辐射率和AIRS数据, CFSR使用GOES辐射率和AIRS、IASI高光谱数据, MERRA使用GOES/Sounder和AIRS数据, JRA-55使用美、日、欧静止卫星辐射率。

2 卫星遥感资料的收集整理

通过广泛调研,分析了国际上第二代、第三代、正在发展的再分析计划在卫星遥感资料应用方面的情况后,分多个批次目前已全面完成CRA-40所需气象卫星观测资料的历史数据收集整理,资料清单、时间段、数据来源以及历史和实时情况见表1。涉及53种气象卫星资料的115个子类中,有31个正在进行准实时自动追加。截至2017年12月底,数据总量为83.5 TB,日增量约11.26 GB。其中,最大数据量的卫星数据是2012年3月—2016年3月Suomi NPP/CrIS传感器数据记录和地理位置数据(47.3 TB)。

这些卫星资料按相关标准进行了规范存储和说明文档撰写^[15]、正逐步通过全国综合气象信息共享平台(CIMISS, China Integrated Meteorological Information

表1 我国全球大气再分析主要卫星观测资料清单
Table 1 Main satellite observational data used in CRA-40

要素	资料清单	时间段	来源	历史	实时
微波辐射率	TOVS和ATOVS垂直探测数据	1979年至今	NESDIS、EUMETSAT	√	√
	Suomi NPP/ATMS辐射率数据 (HDF-历史, BUFR-实时)	2011年至今	CIMSS+CLASS、NESDIS	√	√
	AQUA/AMSR-E亮温数据、ADEOS-II/AMSR亮温数据	2002—2011年	JAXA	√	停
	GCOM-W1/AMSR-2亮温数据	2012年至今	JAXA	√	√
	SSM/I和SSMIS辐射率-重处理	1987—2015年	CM SAF	√	×
	FY-3C/MWHS亮温数据	2013年至今	NSMC	√	√
红外探测辐射率	AQUA/AIRS L1辐射率数据	2015年至今	NASA	×	√
	MetOp/IASI简化的光谱样例通道辐射率 (RED) 数据	2015年至今	EUMETSAT	×	√
	Suomi NPP/CrIS辐射率数据 (HDF-历史, BUFR-实时)	2012年至今	CIMSS+CLASS、NESDIS	√	√
静止卫星辐射率	METEOSAT晴空辐射率 (CSR) 数据-重处理和实时	1982年至今	EUMETSAT	√	√
	日本静止气象卫星晴空辐射率 (CSR) 数据-重处理和实时	1995年至今	JMA	√	√
	GOES/Sounder和Imager圆盘图数据	1995年至今	NOAA	测试收	√
大气运动矢量	GOES、METEOSAT、日本静止气象卫星大气运动矢量产品-重处理和实时	1982年至今	CIMSS、EUMETSAT、JMA (历史-官方协议)	√	√
	FY-2C/E大气运动矢量产品-重处理和实时	2005—2013年	NSMC	√	√
	NOAA/AVHRR极地风产品-重处理和实时	1982年至今	CIMSS、NESDIS	√	√
	MetOp/AVHRR极地风产品-重处理和实时	2007年至今	EUMETSAT	√	√
	TERRA & AQUA/MODIS极地风产品	2004年至今	NESDIS	√	√
GPS掩星	CHAMP、GPS/MET、GPS/METAS、C/NOFS、SACC、MetOp、COSMIC、TerraSAR-X、GRACE掩星数据 (重处理、后处理、准实时)	1995—2016年	UCAR CDAAC	√	/
	GNSS实时 (包括COSMIC、TerraSAR-X、TanDEM-X、GRACE-A/B、MetOp-A/B等)	2015年至今	NCAR、EKMI、EDZW	/	√
洋面风	QuikSCAT/SeaWinds、Oceansat-2/OSCAT洋面风产品	1999—2014年	KNMI	√	停
	MetOp/ASCAT洋面风产品-重处理和实时	2007年至今	EUMETSAT、KNMI	√	√
	Coriolis/WindSAT海洋观测产品、SSM/I海洋产品 (V7)	1987—2016年	RSS	√	停

注: NESDIS表示NOAA美国国家环境卫星数据和信息中心, CLASS表示NOAA综合性大型阵列数据管理系统, JAXA表示日本宇宙航空研究开发机构, JMA表示日本气象厅, EKMI表示丹麦气象研究所 (哥本哈根), CM SAF表示欧洲气候监测卫星应用机构, EDZW表示德国 (奥芬巴赫), RSS表示美国遥感系统公司。

Service System) 进行数据归档和提供应用服务。

CRA-40输入的卫星资料, 除了包括国际第三代再分析产品也使用的ATOVS辐射率、AIRS/IASI/CrIS高光谱红外辐射率、GPS掩星观测等以外, 还收集了并将充分使用近年最新发布的各种卫星重处理产品, 以替换原来的同期的实时业务产品, 这些产品的数据完整性和数据质量均有大幅度提高。实时业务产品对时效性要求较高, 当时的遥感反演算法所制作的实时遥感产品尽管能够满足实时数值天气预报的需要, 但数据产品本身在数据完整性、数据质量等方面存在一定问题, 包括数据质量控制方法、数据均一化方面等。2013-2016年期间国际上不同机构, 包括欧洲中尺度预报中心 (EUMETSAT)、美国威斯康辛大学空间科学工程中心气象卫星合作研究所 (WISC-CIMSS)、国家卫星气象中心 (NSMC)、美国大气研究高校联盟COSMIC数据分析和存档中心 (UCAR CDAAC)、荷兰皇家气象研究所 (KNMI) 等, 制作和发布了一系列高质量的长序列重处理数据产品, 包括大气运动矢量产品、洋面风产品、GPS掩星数据

等。这些重处理产品, 由于制作和发布时间较晚, 并没有完整地应用于CFSR、ERA-Interim、JRA-55这些第三代国际全球再分析产品中。同时, CRA-40产品也已开始考虑如何使用我国风云系列卫星资料, 包括FY-3C卫星辐射率、FY-3C掩星数据、FY-2C/E重处理大气运动矢量产品等。除重处理SSM/I和SSMIS辐射率、用于海浪模式的卫星资料等外, CRA-40的卫星观测资料输入与最新一代再分析产品ERA-5一致。

3 面向同化应用的卫星遥感资料的预处理

卫星遥感资料的预处理, 一方面是需要解决数据格式等接口问题, 另一方面需要对不同来源的同种资料进行优先性选择和去重处理。在同化系统不够完善的情况下, 预处理阶段还需要对部分质量不理想的观测数据予以剔除。在作为实际观测输入进行历史再分析产品制作之前, 对不同种类的卫星观测资料进行整个时间序列、不同空间层次上的数据质量预评估, 可以对观测数据的整体质量、与模式背景场或同化分析场的偏差程度等情况进行较为细致的了解。

2017年10月已完成CRA-Interim 10年试制产品。

在此之前,对卫星辐射率、GPS掩星、大气运动矢量、洋面风等观测资料已进行了格式标准化和质量评估分析。相应的数据预处理技术也将用于40年再分析产品的观测资料准备中。

3.1 与数据质量控制有关的数据格式标准化处理

卫星遥感原始观测数据的数据格式有WMO FM94-IX BUFR、二进制、ASCII、HDF、NetCDF等,需要转换为符合NCEP格点统计插值系统(GSI)^[16]同化接口的NCEP BUFR格式。

格式标准化处理,是对原始文件进行解码,采用NCEP GSI同化系统源码(www.nco.ncep.noaa.gov、www.emc.ncep.noaa.gov)中自定义代码赋值规范,将与观测、质控信息相关的变量有针对性地挑选出来,进行去重复处理、前后3 h时间窗数据拼接,编码生成同化系统能够直接使用的数据文件。

目前在NCEP业务中,常规资料和卫星散射计反演洋面风产品,使用PREPBUFR文件。辐射率数据、GPS掩星数据、大气运动矢量产品使用各自种类的BUFR文件。这几种观测资料所采用的BUFR码表不同,存储的变量也有差别。

图1以大气运动矢量产品为例,说明了从所收集数据格式到最终数据格式的格式转换过程。CRA-40采用的大气运动矢量主要来源于重处理产品和CFSR、GDAS输入大气运动矢量产品,按“重处理>GDAS>CFSR输入数据”策略进行优先选择。CFSR指CFSR再分析产品的公开发布的输入数据。GDAS指美国NCEP全球预报系统(GFS, Global Forecast System)全球数据同化系统(GDAS, Global Forecast System and Global Data Assimilation System)同化输入观测数据。重处理的多个系列卫星大气运动矢量产品,原始格式是ASCII、二进制、WMO BUFR FM-94IX,需转换为具有NCEP BUFR格式的大气运动矢量产品BUFR文件。GDAS输入数据中的大气运动矢量产品存于

BUFR文件中。

GSI同化系统能够同化PREPBUFR文件和NCEP BUFR文件。历史上NCEP GSI同化系统对大气运动矢量产品曾采用过PREPBUFR文件,其文件内容、观测变量等与大气运动矢量产品BUFR文件中的基本一致,但BUFR码表、数据组织结构、在GSI中的处理过程和所采用的质控方法有所不同。CFSR的大气运动矢量产品存于其PREPBUFR文件中,其存储的变量与大气运动矢量BUFR文件相比,缺少生产制作机构代码、大气运动矢量通道中心频率、大气运动矢量反演算法、卫星天顶角等变量,气压、风向、风速的定义也有所不同,因此需要额外进行赋值或转换计算,生成BUFR文件。

利用GSI经量化的比较验证^[17]发现:1)使用大气运动矢量产品BUFR文件比使用PREPBUFR文件能同化更多的如下6个通道的大气运动矢量产品:GOES短波红外通道、GOES可见光通道、GOES深层水汽通道、METEOSAT水汽通道、MTSAT水汽通道、AVHRR红外通道,PREPBUFR文件仅能同化9个通道的大气运动矢量产品;2)在GSI同化系统内对大气运动矢量BUFR文件质量控制的处理更为细化,例如,剔除了美、日、欧静止气象卫星20°N以北陆地上的红外通道观测,剔除了卫星天顶角大于68°的观测。

所收集重处理及实时卫星资料的质量控制和偏差订正,主要在同化系统GSI内完成,同时,也充分利用不同卫星数据产品制作机构所提供的质量控制信息。重处理MetOp-A/ASCAT洋面风产品只保留风矢量质控码为0的质量可靠的观测,占60%左右。大气运动矢量产品的质控码即可信度,取值在0~100,与数据产品的质量控方法有关,有4种:有EUMETSAT一致性检验的质控法、无EUMETSAT一致性检验的质控法、NOAA NESDIS回归过滤法、NOAA NESDIS期望误差法。GSI同化系统采用“无EUMETSAT一致性检验的质控法”的可信度进行质量控制,可信度在85及其以上的观测占总观测数的比例在26%~91%^[17],各种卫星大气运动矢量产品间差异较大。

3.2 不同来源卫星数据产品的优先选择策略和数据拼接

大气运动矢量产品、洋面风产品、GPS掩星数据,按“重处理>GDAS>CFSR输入数据”的优先级策略来选择同一同化时刻的输入数据。每个时刻基于不同卫星代码的数据拆分、选择和拼接,在数据预处理阶段进行。

表2和图2是在研制CRA-Interim 10年试制产品(2007—2016年)时所用静止气象卫星大气运动矢量

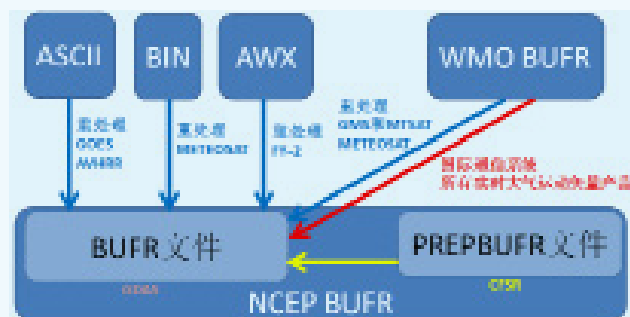


图1 大气运动矢量产品的数据格式转换

Fig. 1 Data format conversion of atmospheric motion vector products

产品和极轨气象卫星极地风产品的数据来源情况。不同时空情况下大气运动矢量观测来源于6个系列、23

颗卫星、15个大气运动矢量通道。图2的时间分辨率精确到一日4次（每6 h）。

表2 CRA-40 2006年7月—2016年12月大气运动矢量输入产品及数据来源

Table 2 Input products and data sources for the Atmospheric Motion Vector in CRA-40 for July, 2006 – December, 2016

		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013		2014	2015	2016	Sources
1	GOES-10/11/12/13/14/15	200607-201307							201308-201612					NESDIS, CIMSS
2	METEOSAT-5/7/8/9/10	200607-201212						201301-201304	201305-201612					EUMETSAT
3	MTSAT-1R/2,HIMAWARI-8	200607-200909			200910-201304				201305-201612					JMA
4	Terra & Aqua MODIS	200607-201304							201305-201612					NESDIS
5	NOAA-15/16/17/18 AVHRR	200607-201412											20150114-201612	NESDIS, CIMSS
6	MetOp-A/B AVHRR		200703-201412										20150114-201612	EUMETSAT

注：阴影部分表示重处理数据，淡蓝色部分表示CFSR输入数据，黄色部分表示GDAS输入数据，红色部分表示无数据。

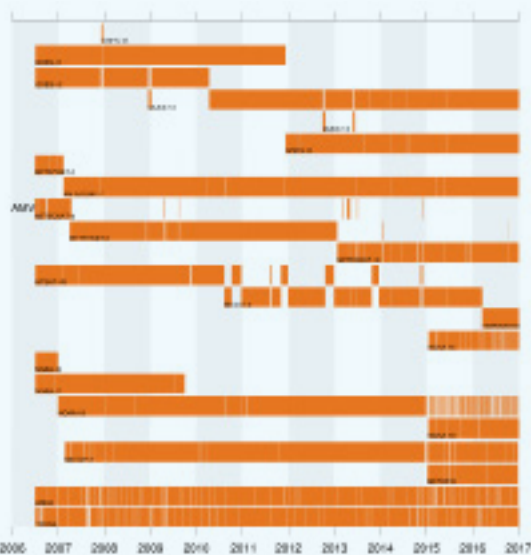


图2 CRA-40 2006年7月—2016年12月大气运动矢量输入产品各卫星时间段

Fig. 2 Timelines of different satellites for CRA-40 atmospheric motion vector input products for July, 2006–December, 2016

3.3 卫星数据质量预评估

全球大气再分析对卫星资料的质量预评估，侧重的是观测数据与模式背景场或同化分析场的偏差分布情况。长时间序列的观测反馈信息^[18]正是通过分析观测增量、观测残差，寻找同一气候背景条件中部分或全部事件在不同观测记录间的关系来获得的。通过检查不同空间范围（如全球、南北半球、热带、东亚、中国等）、不同高度层的观测数、与背景场或同化分析场的偏差平均值、偏差的均方根误差的长时间序列变化等情况，以及再分析产品的综合评估情况，包括完整性、稳定性、是否在预期误差允许范围内，可以反映出输入的观测数据的质量状况、对同化和再分析的贡献情况。利用诊断分析能够辨别出观测与模式背景场或同化分析场的增量信息，以及该增量随时间的

演变情况，从而了解观测数据在模式和同化系统中的可用性、合理性。

利用建立的“基于ERA-Interim的常规与卫星资料质量预评估系统（PET）”^[19]，1979—2013年常规观测资料^[20]、1998—2014年ATOVS卫星资料^[21]、2000—2016年大气运动矢量产品^[17]、2006—2016年洋面风产品^[22]均进行了数据质量预评估。

大气运动矢量和洋面风产品的预评估结果表明，作为CRA-40的输入数据，其观测数序列稳定，其与同化分析场的偏差平均值、偏差的均方根误差合理；预评估结果经与CFSR输入数据、GDAS数据等实时业务输入数据相比，由于大量使用了重处理卫星产品，观测数、与同化分析场的偏差平均值、偏差的均方根误差等均有明显改善。图3为GOES红外大气运动矢量在CRA-Interim 10年试制产品的预评估结果，重处理产品同化观测数比CFSR更多（2013年8月起观测数明显下降的原因是使用了实时业务产品）、偏差平均值和均方根误差明显比CFSR的更小。对CRA-Interim 10年试制产品（2007—2016年）的评估结果表明，全球风场均方根误差优于CFSR，与JRA-55产品误差相当，效果达到了国第三代际再分析产品的水平。

利用质量预评估系统，通过比较重处理数据和实时业务数据，发现了重处理数据产品的3大优势：1）观测数更多，水平和垂直空间观测数有所增加，增加的量级与具体产品类型有关。由EUMETSAT制作的重处理的METEOSAT红外通道大气运动矢量产品观测数比实时业务产品分别增加了10%~15%^[23]。GOES重处理大气运动矢量产品，增加了短波红外通道和深层水汽通道的大气运动矢量。重处理QuikSCAT/Seawinds洋面风观测数比实时业务产品多一倍以上^[22]；2）以ERA-Interim再分析产品为参照，重处理产品的偏差和均方根误差较实时业务产品小或相当；3）观测数、偏差、均方根误差的整个时间序列更为稳定。

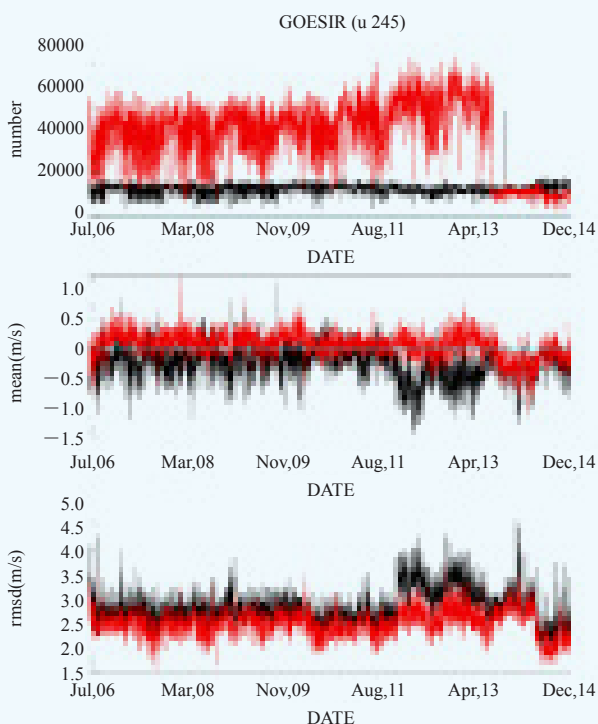


图3 GOES长波红外通道大气运动矢量产品重处理（红线）与CFSR输入实时业务数据（黑线）的预评估比较（横坐标时间轴以“月，年”表示）

Fig. 3 Comparisons of pre-evaluation of reprocessed atmospheric motion vector products (red lines) from GOES longwave infrared channel with that of real-time operational data (black lines) by CFSR input

4 结语

针对中国气象局研制全球大气再分析数据集（CRA-40，1979—2018年）的需求，本文对全球大气再分析的卫星遥感资料设计了需求分析、收集整合、预处理、质量分析和评估等过程，并进行了全面介绍。目前已从无到有地收集了83.5 TB的卫星资料，解决了GSI接口、循环同化等技术问题，在研制CRA-Interim 10年试制产品（2007—2016年）前利用质量预评估系统对观测资料进行了系统化的格式标准化处理和质量评估分析，CRA-Interim试制产品取得了比较理想的结果。下一步将针对前期工作中的部分细节进行完善，并为40年再分析产品研制做准备，同时开始开展卫星资料黑名单的研制工作。

通过面向全球大气再分析计划（CRA-40，1979—2018年）而进行的全球常规和卫星资料收集和预处理，一方面能够提升气象观测数据完整性和数据处理、观测资料误差分析的能力，另一方面将大大提高数据质量和偏差订正水平。这些资料和数据处理技

术不仅为CRA-40研发奠定了坚实基础，而且对改进卫星资料在我国数值天气预报中的应用也有借鉴意义。

致谢：国家气象中心的李娟和瞿安祥、中国科学院大气物理研究所的赵天保等为本文的修改提供了建设性意见，在此表示感谢。

参考文献

- [1] Schubert S D, Rood R B, Pfendner J. An assimilated dataset for earth-science applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(12): 2331-2342.
- [2] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP /NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77: 437-471.
- [3] Gibson J K, Källberg P, Uppala S, et al. ERA-15 Description. ECMWF Re-Analysis Project Report Series, 1997, 1: 1-84.
- [4] Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bull Amer Meteor Soc*, 2002, 83: 1631-1643.
- [5] Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. The ERA-40 reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131: 2961-3012.
- [6] Onogi K, Tsutsui J, Koide H, et al. The JRA-25 reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2007, 85 (3): 369-432.
- [7] Saha S, Moorthi S, Wu Xingren, et al. The NCEP climate forecast system version 2. *J Climate*, 2014, 27: 2185-2208.
- [8] Rienecker M, Suarez M J, Gelaro R, et al. MERRA NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J Climate*, 2011, 24: 3624-3648.
- [9] 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: 553-597.
- [10] Kobayashi S, Yukinari O, Yayoi H, et al. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2015, 93 (1): 5-48.
- [11] Hans H, Dick Dee. ERA5 reanalysis is in production. *ECMWF Newsletter No. 147*, Spring 2016.
- [12] Andras H, Paul B, Gionata B, et al. The impact of observations in the ECMWF latest reanalysis system: WMO workshop, Shanghai, 10-13 May, 2016.
- [13] 刘志权等. 全球大气再分析技术与数据集研制实施方案（详细）. 国家气象信息中心, 2014.
- [14] 董佩明, 薛纪善, 黄兵, 等. 数值天气预报中卫星资料同化应用现状和发展. *气象科技*, 2008, 36(1): 1-7.
- [15] 王旻燕. 全球大气再分析系统之全球大气再分析卫星观测数据集技术报告. 国家气象信息中心, 2014-2015.
- [16] NCAR/NCEP/ESRL/NOAA, GSI (Gridpoint Statistical Interpolation) Community Version 3.3 Users guide, 2014.
- [17] 王旻燕, 姚爽, 张志森, 等. 全球大气再分析系统之重处理大气运动矢量产品质量评估报告. 国家气象信息中心, 2016-2017.
- [18] Poli P. Observational feedback-what reanalysis tells us about the quality of observations: ECMWF Copernicus workshop on climate observation requirements, ECMWF, June 29-July 2, 2015.
- [19] 姜立鹏. 全球大气再分析系统之常规与卫星资料质量预评估子系统技术报告. 国家气象信息中心, 2015.
- [20] 胡开喜, 胡佳军, 张永华, 等. 全球大气再分析系统之1979年以来全球常规观测资料质量预评估报告. 国家气象信息中心, 2015.
- [21] 姚爽, 姜立鹏, 等. 全球大气再分析系统之ATOVS大气垂直探测资料质量预评估技术报告. 国家气象信息中心, 2015.
- [22] 王旻燕, 张志森, 姚爽, 等. 全球大气再分析系统之重处理洋面风质量评估报告. 国家气象信息中心, 2017.
- [23] Doutriaux B M. AVHRR Metop-A polar LAC reprocessed AMVs CDR Validation Report, EUM/OPS/REP/16/839403, 8 November 2016.