

多源气象数据融合格点实况产品研发进展*

师春香 潘 旻 谷军霞 徐 宾 韩 帅 朱 智 张 雷 孙 帅 姜志伟
SHI Chunxiang PAN Yang GU Junxia XU Bin HAN Shuai ZHU Zhi ZHANG Lei SUN Shuai JIANG Zhiwei

国家气象信息中心,北京,100081

National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China

2018-06-27 收稿,2019-01-08 改回.

师春香,潘旻,谷军霞,徐宾,韩帅,朱智,张雷,孙帅,姜志伟. 2019. 多源气象数据融合格点实况产品研发进展. 气象学报, 77(4):774-783

Shi Chunxiang, Pan Yang, Gu Junxia, Xu Bin, Han Shuai, Zhu Zhi, Zhang Lei, Sun Shuai, Jiang Zhiwei. 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(4):774-783

Abstract This paper is focused on the latest gridded fusion products developed by the National Meteorological Information Center (NMIC) of China Meteorological Administration (CMA), which include soil temperature and moisture, sea surface temperature, sea surface wind, three-dimensional cloud information and a series of meteorological elements data (such as air temperature, air pressure, precipitation, radiation, humidity, wind speed and direction, etc). The multi-source data fusion testbed and integrated quality evaluation system for these products are then introduced. Furthermore, recent progresses in multi-source data fusion in both foreign countries and China are reviewed in the paper, and the prospect of future development of multi-source meteorological data fusion is discussed.

Key words Multi-source gridded products, Precipitation fusion, Forcing data fusion, Land data assimilation, SST and SSW fusion, Three-dimensional cloud information fusion

摘 要 阐述了中外主要的多源气象数据融合产品研究进展与趋势,重点介绍了中国气象局国家气象信息中心研制的陆面气象要素(包括气温、降水、湿度、风、气压、辐射等)、土壤温度与土壤湿度、洋面温度与洋面风、三维云等多源融合格点产品研发现状,以及中国气象局国家气象信息中心多源数据融合中试平台及统一质量检验评估系统的进展,并对未来多源气象数据融合产品研发进行了展望。

关键词 多源融合格点产品,降水融合,陆面气象驱动数据融合,陆面数据同化,海表气象要素融合,三维云量融合

中图法分类号 P468

1 引 言

随着气象观测系统的迅猛发展,利用地面自动气象站、雷达、卫星等获取的观测数据越来越多,多种数值模式模拟数据质量也在不断提高,同时,各行业对格点化的时、空连续的气象数据产品要求越来越高。利用数据融合与数据同化技术,综合多种来

源观测资料及多模式模拟数据,获得高精度、高质量、时空连续的多源数据融合气象格点产品是行之有效的有效的手段。多源气象数据融合研究重点是,地面站点观测数据与卫星、雷达等遥感手段获取的面观测数据,不同分辨率面观测数据之间的时、空匹配技术,以及不同观测之间系统性偏差订正技术,多源观测资料融合分析技术等。中外多源数据融合气象格

* 资助课题:国家重点研发计划(2018YFC1506601)、国家自然科学基金项目(91437220)、公益性行业(气象)科研专项经费项目(GY-HY201306045,GYHY201506002)、国家气象科技创新工程——“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”攻关任务。

作者简介:师春香,主要从事多源数据融合与再分析研究。E-mail: shicx@cma.gov.cn

点产品研究成果众多,涉及陆面、海洋、大气多个领域,已在天气、气候研究与业务,防灾、减灾等应用中发挥了重要作用。

中国多源气象数据融合研究起步相对较晚,中国气象局在2014年启动了国家气象科技创新工程“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”(以下简称“创新工程”),其攻关任务目标之一是研制高质量的陆面、海洋与三维云雨多源数据融合产品及相关技术。依托创新工程,中国气象局国家气象信息中心在引进国际先进融合技术的基础上,消化吸收并自主创新,建成了业务化的亚洲区域中国气象局陆面数据同化系统(CMA Land Data Assimilation System, CLDAS)和中国区域融合降水分析系统(CMA Multi-source Precipitation Analysis System, CMPAS),以及全球海表温度融合分析系统(CMA Ocean Data Analysis System-SST, CODAS-SST)和中国区域三维云融合分析系统(3D Cloud Analysis System, 3DCloudAS)。2017年中国气象局天气预报业务由原来的站点预报升级为智能网格预报,一系列多源数据融合产品(包括气温、降水、湿度、风、总云量、能见度等)通过优化产品时效、调整网格,已提供智能网格预报业务应用。此外,包括地面气象要素及土壤温湿度、径流、蒸散发等在内的由中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS)生产的系列产品也提供中国气象局智慧农业业务应用。

文中首先阐述了中外主要的多源气象数据融合产品研究进展与趋势,重点介绍中国国家气象信息中心研制的陆面气象要素、土壤温度与土壤湿度、海洋洋面温度与洋面风、大气三维云信息等多源融合格点产品研发现状,之后介绍中国气象局国家气象信息中心多源数据融合中试平台及统一质量检验评估系统的建设进展,最后对未来多源气象数据融合产品研制进行了展望。

2 降水融合进展

多源降水融合分析起始于20世纪90年代,为了综合利用静止气象卫星红外探测时、空连续分辨率高和极轨气象卫星被动微波降水精度高的优势,对多颗卫星不同类型探测资料反演的降水进行校正和融合,形成多卫星集成降水产品,再采用地面观测对卫星降水的系统偏差进行订正,形成最终的融合降水产品。初期由于卫星数量较少,卫星降水产品

如GPCP(Global Precipitation Climatology Project)(Huffman, et al, 1997)、CMAP(Climatic Prediction Center(CPC)Merged Analysis of Precipitation)(Xie, et al, 1997)时、空分辨率低,时间序列从1979年开始,适合气候研究。随着卫星遥感探测技术的发展,发展了概率密度函数(PDF)匹配等卫星资料校正及偏差订正技术,且最优插值(OI)、卡尔曼滤波(KF)等融合技术在降水融合领域也有了成熟广泛的应用,卫星集成及融合降水产品的时、空分辨率显著提高,如美国的TMPA(TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis)(Huffman, et al, 2007)、CMORPH(CPC Morphing technique)(Joyce, et al, 2004)、日本GsMAP(East Asian Multi Satellite Integrated Precipitation)(Ushio, et al, 2009)等产品的分辨率已不低于3 h、 0.25° ,为全球大范围降水监测提供了可能。

在区域高分辨率降水监测领域雷达定量降水估测(QPE)产品仍是主流(表1)。雷达探测的是与降水直接的结构信息,精度较卫星明显要高。针对雷达估测降水的偏差,以雨量计为基准发展了基于卡尔曼滤波、最优插值、距离反比加权(IDW)等方法的平均场系统误差订正和局部偏差订正技术(Seo, et al, 2002),已在美国国家环境预报中心(NCEP)的Stage IV系统和美国国家强风暴实验室(NSSL)的MRMS(Multi-Radar Multi-Sensor)系统中成熟应用。目前,美国MRMS(Multi-Radar Multi-Sensor)产品的最高时、空分辨率达到2 min、1 km,在强降水灾害天气监测和临近预报方面有重要应用价值。

与国际主流高分辨率的降水产品以雷达资料应用为主的情况不同,中国复杂地形和雷达型号差异造成雷达组网的技术困难,以及如超折射、负折射、电磁干扰、海浪回波、地形遮挡、地物杂波、 0°C 层亮带、衰减、未完全充塞、扫描方式局限等雷达回波的基本质量问题尚未完全解决,中国雷达定量降水估测产品质量与美国相比有很大差距,如中国雷达定量降水估测产品夏季的相关系数不超过0.6,均方根误差(RMSE)大于1.3 mm/h(潘昉等,2018),而美国本土雷达定量降水估测暖季相关系数大于0.75,均方根误差小于1 mm/h(Wu, et al, 2012)。目前,中国区域业务化的高分辨率融合降水产品多是模式预报或卫星与地面观测资料的融合产品。其中,中国气象局国家气象信息中心引进吸收美国国

家海洋和大气管理局(NOAA)气候预测中心(CPC)的“概率密度函数+最优插值”两步融合法(Xie, et al, 2011),研制逐时、10 km 地面和卫星二源降水融合产品(潘昞等,2012)。2014年,潘昞等提出“概率密度函数+贝叶斯模型平均(BMA)+最优插值”方

法,引入中国气象局气象探测中心的雷达定量降水估测产品,研制了逐时、5 km 的地面、卫星、雷达三源融合降水产品,2016年将产品的空间分辨率提高至1 km(潘昞等,2018)。

表1 国际主要高分辨率降水业务产品

Table 1 List of main high-resolution operational products of precipitation in foreign countries

国家	机构	产品名称	主要技术	产品要素	空间覆盖	起始时间	时、空分辨率	
美国	NCEP	Stage II	地面杂波、异常回波、固定地面目标去除;0 C层亮带检测;静态Z-R关系	累计降水量	美国本土	1994年	4 km, 1 h	
	NCEP	Stage IV (Kitzmler, et al, 2013)	地面雨量计偏差订正、人工质量控制、卫星填补	累计降水量	美国本土	2001年	4 km, 1 h	
	NSSL	MRMS (Zhang, et al, 2016)	dpQC、无缝混合扫描、波束阻挡订正、VPR订正、降水类型分类、Mountain Mapper、基于降水类型Z-R关系、地面雨量计局部偏差订正	降水率、累计降水量、误差	美国本土	2006年	1 km, 1 h, 2 min更新	
法国	法国气象局	业务雷 达降水	第1代	地物杂波抑制	降水	单部雷达	1997年	1 km, 15 min
			第2代 (Tabary, 2007)	地物杂波抑制、VPR订正、波束阻挡订正	降水	法国组网	2007年	1 km, 5 min
			第3代 (Jordi, et al, 2013)	地物杂波抑制、VPR订正、波束阻挡订正、地面雨量计校准、双偏振晴空回波去除及降水估计	降水	法国组网	2013年	1 km, 5 min
德国	德国气象局	RADOLAN (Radar-Online-Aneichung)	地物杂波抑制、地形遮挡订正、气候态订正	降水	德国	2001年	1 km, 1 h	
澳大利亚		雷达定量降水估测产品 (http://www.bom.gov.au/australia/radar/about/radar_coverage_national.shtml)	去除地面杂波、海量杂波;降水类型分类;基于卡尔曼滤波方法的地面雨量计校准	累计降水量	单部雷达		6 min	

3 陆面数据融合同化进展

目前,国际上陆面数据融合产品主要包括陆面大气驱动场(如气温、气压、湿度、风速、降水、辐射)和陆面要素融合分析(如土壤湿度、土壤温度、地表温度、地表热通量、径流、积雪等)两大类产品。

陆面大气驱动场是陆面过程模式的输入数据,其数据来源可以为大气再分析资料中的近地面要素场,也可以是在此基础上通过数据融合订正等技术对再分析场进行优化,获取更高质量的陆面大气驱动场。国际上主要包括Sheffield大气驱动数据场、Qian大气驱动数据和美国全球陆面数据同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)大气驱动场数据等,其研制技术主要采用数值模式预报、卫星资料反演、多源数据融合等(Sheffield, et al, 2004; Qian, et al, 2006)。以上3种陆面大气驱

动场覆盖区域均为全球,时间分辨率为3 h,但空间分辨率各有不同,Sheffield大气驱动数据场与Qian大气驱动数据已经回算到1948年,具有较长的时间序列,适宜开展长时间的陆面模拟分析和气候评估研究等,美国全球陆面数据同化系统大气驱动场作为美国NOAA业务产品,实时向用户提供最新时次产品。

国际上陆面要素数据融合分析产品主要来自于各业务和科研单位构建的陆面数据同化系统,如欧洲陆面数据同化系统(European Land Data Assimilation System, ELDAS)(Albergel, et al, 2013)、美国全球陆面数据同化系统(Rodell, et al, 2004)、北美陆面数据同化系统(North American Land Data Assimilation System, NLDAS)(Xia, et al, 2012)、东京大学陆面数据同化系统(LDAS-UT)(Rasmy, et al, 2011)等。多数陆面数据同化系统尚未真正同化

陆面状态变量,仍然局限于提高陆面模式驱动及参数数据等,例如全球陆面数据同化系统和北美陆面数据同化系统致力于完善反照率、土地覆盖/土地利用类型、植被绿度和叶面积指数等。也有部分系统开展了同化研究及业务应用,如:欧洲陆面数据同化系统采用最优插值和扩展卡尔曼滤波(EKF)方法,可同时同化 2 m 高气温和湿度以及微波反演土壤湿度资料。总体来看,尽管陆面数据同化是当前的一个研究热点,但在业务天气预报模式中的应用仍处于起步阶段。

美国 NCEP 准业务运行的北美陆面数据同化系统虽然没有真正同化陆面状态变量,但是已在美国干旱监测等领域发挥了重要作用。其下一阶段的目标是引入最新版本的 LIS(Land Information System)系统,以真正实现业务化的陆面数据同化,陆面要素产品的空间分辨率将达到 3.125 km。另外,美国国家大气研究中心(NCAR)也已开展了 4 km 分辨率陆面数据同化(HRLDAS)研究(Chen, et al, 2007),通过同化观测数据,为天气研究预报模式(WRF)提供高质量、高时空分辨率陆面分析数据。

中国陆面数据融合与同化研究起步相对较晚,但发展较快。表 2 给出了中国主要陆面数据融合与同化产品。其中,中国气象局国家气象信息中心研发的中国气象局陆面数据同化系统第 1 版(CLDAS-V1.0)于 2013 年率先在中国实现了国家级陆面要素融合产品的业务化生产和发布,重点解决了

东亚(尤其是中国)区域陆面大气驱动场的多源融合技术难题。引进和改进美国 NOAA 地球系统研究实验室(ESRL)的时、空多尺度分析系统(ST-MAS),改进中国气象局国家卫星气象中心基于离散坐标法物理模型(Hybrid)的短波辐射遥感反演业务算法(刘军建等,2018),采用基于“概率密度函数+最优插值”的融合降水,发展基于 CLM3.5、CoLM、Noah-MP(4 套参数化方案)多陆面模式集合模拟技术,于 2015 年研制了中国气象局陆面数据同化系统第 2 版(CLDAS-V2.0),实时发布亚洲区域逐时和逐日的 0.0625°分辨率的大气驱动场和陆面要素集合分析产品。同时,在 CLDAS-V2.0 关键技术研发基础上,高分辨率中国气象局陆面数据同化系统第 1 版(HRCLDAS-V1.0)投入试运行,产品分辨率提高至 1 km(韩帅等,2018)。与中、外同类产品比较分析结果表明,中国气象局陆面数据同化系统系列大气驱动场产品、陆面要素融合分析产品在中国区域的时、空分辨率和质量更高(韩帅等,2017;孙帅等,2017)。2017 年底中国气象局国家气象信息中心研制完成了中国气象局陆面数据同化系统第 3 版(CLDAS-V3.0),实现了中国 FY-3C 卫星反演土壤湿度资料同化、地表温度同化以及地表温度与微波亮温资料协同同化;开展了 FY-3 积雪覆盖率以及雪深资料的同化研究,进一步提高了 CLDAS 产品精度,积雪同化的效果明显,尤其在东北、新疆及青藏高原地区(张帅等,2018;师春香等,2018)。

表 2 中国主要陆面数据融合与同化产品

Table 2 Main land surface elements merging products in China

机构	产品名称	主要技术	产品要素	空间覆盖	起止时间	时空分辨率	下载地址
中国气象局国家气象信息中心	CLDAS 陆面数据同化产品	多重网格变分;空间格点拼接、离散纵坐标短波辐射遥感反演; CLM、Noah-MP、CoLM 多陆面模式集合模拟	气温、气压、湿度、风速、降水、短波辐射、土壤湿度、土壤温度、地表温度、土壤相对湿度	亚洲	2008—	1 h, 0.0625°	中国气象数据网 (http://data.cma.cn/)
中国气象局国家气象信息中心	HRCLDAS 高分辨率陆面数据同化产品	多重网格变分;离散纵坐标短波辐射遥感反演和融合、多卫星集成降水融合; CLM 陆面模式模拟	气温、气压、湿度、U/V 风、风速、降水、短波辐射、土壤湿度、土壤温度、地表温度、土壤相对湿度	中国	2015—	1 h, 0.01°	全国综合气象信息共享平台 (CIMISS)
中国科学院寒区旱区环境研究所	中国西部陆面数据同化产品	陆面模式模拟	土壤水分、土壤温度、积雪、冻土	中国西部	2002—	3 h, 0.25°	寒区旱区科学数据中心 http://westde.westgis.ac.cn/
中国科学院青藏高原研究所	中国区域地面气象要素驱动数据集	双线性空间插值;播版样条插值;Hybrid Model 辐射估算	气温、气压、湿度、风速、降水、太阳辐射	中国	1981—2008	3 h, 0.1°	

4 海表要素融合进展

海表要素的融合思路和技术与降水融合类似,采用实测数据订正多卫星反演要素,再将卫星反演与船舶、浮标等实测数据融合,而诸如泊松方程、最优插值、概率密度函数匹配、二维变分等偏差订正和融合技术的应用也较降水更早更成熟。目前,海表要素融合研究主要集中在海表温度(SST)、洋面风、海冰等融合产品的研发。

海表温度是全球海洋大气系统中最为重要和基础的海洋要素之一,各国研究机构 and 业务部门陆续研制出了高质量的海表温度融合产品(表3),如逐

月哈得来中心海冰和海温产品(HadISST)(Rayner, et al, 2003)、逐日、 0.25° 的最优插值海表温度(Optimum Interpolation Sea Surface Temperature, OISST)(Reynolds, et al, 2002)以及逐日、 $(1/12)^\circ$ 的RTG-HR(Daily real-time global sea surface temperature-high resolution analysis)(Gemmill, et al, 2007)等。最近,英国气象局基于GHRSSST-PP(Group for High Resolution Sea Surface Temperature Pilot Project)提供的多卫星数据和实测数据,研制了 0.05° 的全球逐日海温-海冰融合产品OSTIA(Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis)(Donlon, et al, 2012)。

表3 国际主要海表温度融合产品列表

Table 3 List of main sea surface temperature merging products in foreign countries								
国家	机构	产品名称	主要技术	产品要素	空间覆盖	起始时间	时、空分辨率	下载网址
美国	NOAA	OISST	Poisson 方法校正卫星资料大尺度偏差,最优插值方法融合	海表温度	全球	1981年	周, 1° 月, 1°	https://www.ncdc.noaa.gov/oisst
		OISST V2.0	月平均资料由周资料线性插值得到该月每日值,再经累计得到	海表温度	全球	1981年	d, 0.25°	
		RTG-HR	二维变分方法	海表温度	全球	2005年	d, 0.5° — $(1/12)^\circ$	http://polar.ncep.noaa.gov/sst/rtg_high_res/
英国	Hadley Center	HADISST1	两步约化空间最优插值(RSOD),叠加高质量的格点观测(RDB)	海表温度 海冰覆盖度	全球	1870年	月, 1°	https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/data/download.html
		OSTIA	多尺度最优插值技术	海表温度	全球	2006年	d, 0.05°	http://ghrsst-pp.metoffice.com/pages/latest_analysis/ostia.html

海冰的高反照率和隔绝海-气热量和动量交换作用对区域乃至全球气候变化均有重要的调节作用。HadISST 是国际上应用最为广泛的全球海冰密集度融合资料之一(Rayner, et al, 2003),利用数字化图表订正微波数据,保证了融合产品的均一性。还有一些区域的海冰融合资料,如美国的IMS(the interactive multisensor snow and ice mapping system)(Ramsay, 2000)和MASIE(Multisensor Analyzed Sea Ice Extent project for the Northern Hemisphere)(Fetterer, 2006)北半球逐日海冰覆盖资料,也常用于天气、气候实时监测业务。

洋面风场影响大气-海洋的相互作用,也影响船只航行、海上工程等活动。国际上应用较多的洋面风融合有CCMP(Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind)(Atlas, et al, 2011)和BSW(Blended Sea Winds)(Zhang, et al, 2006a,

2006b)。

中国也开展了相关研究,王际朝(2014)分别以QSCAT(QuikSCAT satellite)/NCEP和CCMP再分析风场为背景场,利用最优插值方法对研究区域内浮标的风速和风向进行融合研究。中国国家海洋环境预报中心在西北太平洋海域利用最优插值方法将船舶报资料和全球海洋观测网(ARGO)海温数据同化到数值模拟中,有效地改进了三维海温模拟的结果(李云等,2008)。中国科学院大气物理研究所的全球海洋资料同化系统(ZFL_GODAS)能够同化包括卫星高度计资料、卫星海表温度资料以及ARGO、投弃式温度剖面测量系统(XBT)、热带大气海洋观测阵列(TAO)等各种不同来源的温盐廓线资料(路泽廷等,2014)。但是,目前业务工作中所使用的海表温度、海冰和洋面风资料主要依靠国际卫星及融合产品。中国气象局国家气象信息中心

2016年采用时、空多尺度分析方法实现了中国风云3B卫星(FY-3B)、日本全球变化观测任务卫星(GCOM-W1)、欧洲气象业务化卫星(MetOP-B)等反演海温产品与浮标、船舶观测海表温度与欧洲中期天气预报中心(ECMWF)精细化预报海温产品的融合,能够更好地反映出台风路径上的海表温度变化(徐宾等,2018),基于此方法建立的全球海表温度融合分析系统于2018年底实现了业务化运行。同时,中国气象局国家气象信息中心还开展了基于欧洲气象卫星应用组织(EUMETSAT/OSI-SAF)制作的全球海冰密集度分析日产品、美国NISE(Near-Real-Time SSM/I EASE-Grid Daily Global Ice Concentration and Snow)产品、风云卫星微波成像仪(MWRI)反演产品、IMS(the interactive multi-sensor snow and ice mapping system)等海冰覆盖度产品的全球多卫星海冰覆盖度融合试验。

5 三维云融合进展

美国NOAA地球系统研究实验室发展了局地分析预报系统(LAPS),能够通过融合数值预报产品、地面、探空、雷达、静止气象卫星、GPS/MET、风廓线雷达、飞机等多源观测数据,获得三维云融合格点数据,为数值预报模式提供更好的初始场,改进数值预报模式的短期预报水平。其他一些机构也发展了类似的三维云融合系统,例如美国的ARPS(Advanced Regional Prediction System)、RUC(Rapid Update Cycle)、奥地利的INCA(Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis)等(表4)。近年来,美国通过在目前的业务同化系统(GSI)中嵌入ARPS和RUC,研发了GSI-Cloud云分析模块,实现了云分析的功能,可以为数值预报模式提供包含更高精度云信息的初始场,意味着三维云融合

表4 国际三维云融合系统概况

Table 4 Overview of three-dimensional cloud merging systems in foreign countries			
国家	研发机构	系统名称	系统介绍
美国	NOAA/ESRL	LAPS	LAPS系统能够将多种观测数据(气象地面观测网、雷达、卫星、垂直探测器、飞机等)进行融合分析,得到高分辨率的三维分析结果(Albergel, et al, 2013)
美国	俄克拉荷马大学/风暴分析和预测中心	ARPS	ARPS的云分析模块主要从LAPS发展而来,也采用了逐步订正的方法进行三维云分析(Xue, et al, 2001; Wang, et al, 2003; 朱立娟等,2017)
美国	NOAA/ESRL	RUC	云分析模块采用了逐步订正的方法(Benjamin, et al, 2015)
美国	俄克拉荷马大学/风暴分析和预测中心 NOAA/ESRL/全球系统部	GSI-Cloud	结合了RUC和ARPS的优势,通过融合卫星的云产品、地面云观测、雷达和闪电定位等资料,形成较为准确的三维云融合产品,并应用于北美快速天气模拟业务中(Hu, et al, 2007)
奥地利	奥地利国家气象局	INCA	通过融合数值预报产品、卫星、雷达和地面观测数据,并结合精细化下垫面信息,对数值预报产品进行订正后,形成高分辨率的分析场与外推预报场;每15 min计算1次(Haiden, et al, 2011)

将成为同化系统的重要模块。

中国在三维云融合方面也开展了一些研究工作,主要是引进国际的融合系统,并基于中国的业务环境开展本地化研发(表5),如中国气象局国家卫星气象中心基于中国区域业务环境搭建的三维云信息融合分析系统。中国气象局国家气象信息中心也针对中国区域特点以及中国现有资料情况,基于局地分析预报系统和全国综合气象信息共享平台(CIMISS)数据环境,建成了适用于中国区域的3DCloudAS系统,实现了中国区域的地面观测、机场观测、探空观测、飞机观测、风云-2号/风云-4号/葵花-8静止气象卫星、多普勒雷达、风廓线雷达等

多种观测资料的融合,该系统于2018年实现业务运行,可实时逐时输出三维云量,以及三维温度场、湿度场、风场等的网格化产品,空间覆盖为中国区域,分辨率为 0.05° 。

6 多源数据融合中试平台设计

中试平台是完善气象科技成果转化应用体制机制、推动气象科技成果转化应用的重要途径。多源数据融合中试平台的设计目的即推动多源数据融合关键技术快速地转化为业务应用能力。

多源数据融合中试平台作为气象信息中试基地的有机组成部分,在其框架下,发展适用于多源数据

表 5 中国三维云融合系统概况
Table 5 Overview of three-dimensional cloud merging systems in China

机构	系统平台	区域	系统介绍
上海市气象局	LAPS	华东	引进并业务化,能够融合自动站、雷达径向风和回波、风云卫星云图等资料(刘寿东等, 2012)
武汉暴雨所	LAPS	华中	根据本地探测资料的种类和特点开展了 LAPS 本地化移植及二次开发(李红莉等, 2009)
北京市气象局	LAPS	北京	能够融合雷达、卫星云导风、常规探空及自动气象站等观测资料(高华等,2009)
国家卫星气象中心	LAPS	中国	搭建三维云信息融合分析系统,可生成集多颗卫星、多部雷达、地面常规和非常规等多种观测资料优势为一体的三维大气信息产品(刘瑞霞等,2013)
中国气象局公共气象服务中心	LAPS	中国	引进并业务化,使用 GRAPES-Meso 预报场作为背景场,融合风云卫星、葵花卫星、探空、地面、多普勒雷达等多种资料,产生每小时 1 次的三维分析场(李超等,2017)
中国气象局国家气象信息中心	LAPS	中国	建成三维云融合业务系统,能够融合包括地面、探空、雷达、GPS/MET、风云-2G 卫星、葵花-8 卫星等多种观测资料,实时生成三维大气融合格点产品与三维云融合格点产品

融合科研成果迅速转化为业务的中试平台,主要用于实现多源数据融合产品研发和业务转化。中试平台主要包括:依托气象信息中试基地提供的软硬件环境及数据环境,构建多源数据融合的资源环境;打造包括降水融合分析、陆面数据融合同化、海表要素融合、三维云大气融合等多源数据融合分析功能于一体的中试系统环境;重点研发融合格点实况产品检验评估的统一规范,开发评估工具;建立统一的准入规则、中试系统开发、检验评估、业务转化流程等规范。

7 未来发展

多源数据融合格点分析中需要解决的科学问题

主要集中在以下两个方面:

第一,融合分析的时、空尺度代表性问题,即在不同观测数据条件,如空间上站网疏密变化、时间上观测频次的增减等,以及在不同地形条件、不同气候背景、不同天气系统条件下如何合理制定多源融合格点分析产品时、空分辨率,从而得到最优分析尺度上时序一致的多源融合产品。如青藏高原典型区域,站点稀疏且受高大地形、积雪覆盖、复杂下垫面条件等多种因素影响,成为融合分析中的难点。

第二,由于多源数据融合格点分析产品常被用来对数值预报产品等进行检验评估,以及在智能网格气象预报业务中被作为实况产品应用,因而如何

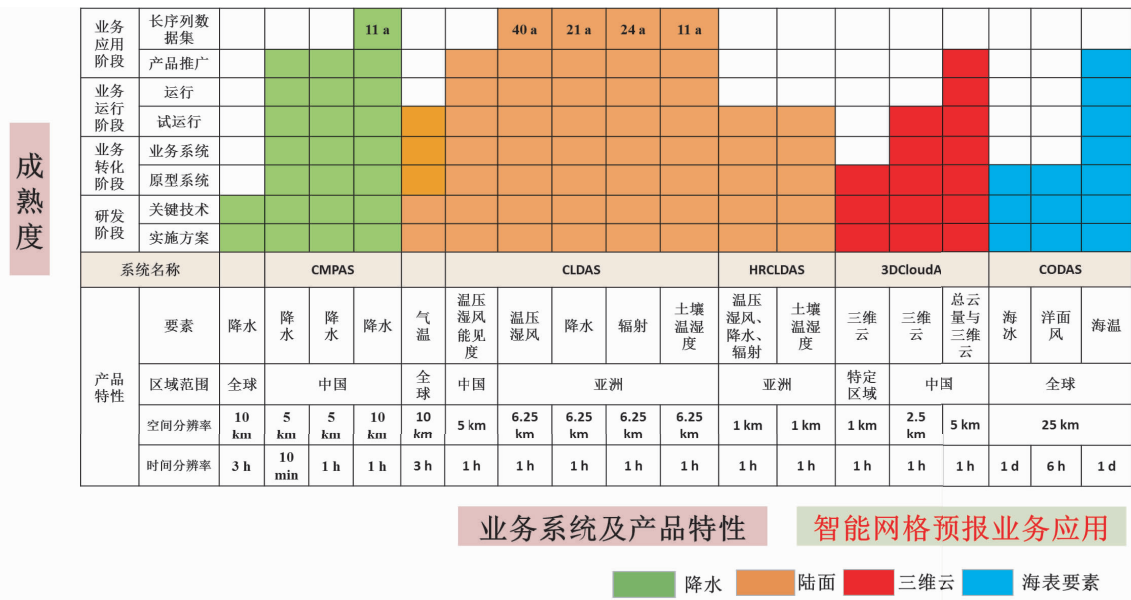


图 1 中国气象局国家气象信息中心多源数据融合业务系统成熟度及产品特性

Fig. 1 The maturity of multi-source data merging system of NMIC and products characteristics

对融合数据的“真实性”进行评判,需要利用多源协同观测和设计外场科学试验进行独立检验,建设多源数据融合合格点分析产品质量评价体系,并将其视作真值的质量标准。

在多源数据融合合格点分析产品研制中,一些关键的技术问题尚需要深入研究。包括地面、探空、卫星、雷达、模式等多种来源资料的协同质量控制,针对不同气候背景、复杂地形、下垫面条件下各来源资料的误差分析系统及偏差订正技术,时、空多尺度分析系统、最优插值、EnKF、Hybrid 等方法的局地优化应用技术。引进机器学习、大数据挖掘等人工智能方法在降水、陆面、海洋以及三维云融合中应用也是值得探索的研究内容。

未来,将在多源数据融合科学问题与关键技术研究基础上,在业务单位形成多源数据融合合格点分析产品业务体系,图 1 是目前中国气象局国家气象信息中心多源数据融合多个业务系统成熟度及产品特性。在保证产品质量同时,产品空间分辨率由现在的千米级提高到米级,时间分辨率由小时级提高到分钟级,产品时效逐步提高到分钟级,产品覆盖范围从中国扩展到全球(重点是一带一路区域)。同时对历史数据进行回算,建成长时间序列的多源数据融合合格点分析产品数据集,提供应用。

参考文献

- 高华,谭旭光,李英华等. 2009. 局地分析和预报系统(LAPS)在北京市气象局移植与应用//第 26 届中国气象学会年会论文集. 杭州:中国气象学会,146-151. Gao H, Tan X G, Li Y H, et al. 2009. Transplantation and application of local analysis and prediction system(LAPS) in Beijing meteorological administration//Annual meeting of the China Meteorological Society. Hangzhou: Chinese Meteorological Society, 146-151 (in Chinese)
- 韩帅,师春香,姜立鹏等. 2017. CLDAS 土壤湿度模拟结果及评估. 应用气象学报, 28(3): 369-378. Han S, Shi C X, Jiang L P, et al. 2017. The simulation and evaluation of soil moisture based on CLDAS. J Appl Meteor Sci, 28(3): 369-378 (in Chinese)
- 韩帅,师春香,姜志伟等. 2018. CMA 高分辨率陆面数据同化系统(HRCLDAS-V1.0)研发及进展. 气象科技进展, 8(1): 102-108, 116. Han S, Shi C X, Jiang Z W, et al. 2018. Development and progress of high resolution CMA land surface data assimilation system. Adv Meteor Sci Technol, 8(1): 102-108, 116 (in Chinese)
- 李超,唐千红,陈宇等. 2017. 多源数据融合系统 LAPS 的研究进

- 展及其在实况数据服务中的应用. 气象科技进展, 7(2): 32-38. Li C, Tang Q H, Chen Y, et al. 2017. An overview of progresses in LAPS and prospective applications in real time data service. Adv Meteor Sci Technol, 7(2): 32-38 (in Chinese)
- 李红莉,崔春光,王志斌. 2009. LAPS 的设计原理、模块功能与产品应用. 暴雨灾害, 28(1): 64-70. Li H L, Cui C G, Wang Z B. 2009. Scientific designs, functions and applications of LAPS. Torr Rain Dis, 28(1): 64-70 (in Chinese)
- 李云,刘钦政,张建华等. 2008. 最优插值方法在西北太平洋海温同化中的应用研究. 海洋预报, 25(2): 25-32. Li Y, Liu Q Z, Zhang J H, et al. 2008. Optimal interpolation and its application to assimilation of sea temperature in northwest Pacific region. Mar Forecasts, 25(2): 25-32 (in Chinese)
- 刘军建,师春香,贾炳浩等. 2018. FY-2E 地面太阳辐射反演及数据集评估. 遥感信息, 33(1): 104-110. Liu J J, Shi C X, Jia B H, et al. 2018. Retrievals and evaluation of downward surface solar radiation derived from FY-2E. Remote Sens Inf, 33(1): 104-110 (in Chinese)
- 刘瑞霞,徐祥德,刘玉洁. 2013. JICA 综合观测与卫星数据在高原地区三维云和水汽场构建中的应用. 高原气象, 32(6): 1589-1596. Liu R X, Xu X D, Liu Y J. 2013. Application of JICA comprehensive observation and satellite data in three-dimensional cloud and humidity construction over Qinghai-Xizang Plateau. Plateau Meteor, 32(6): 1589-1596 (in Chinese)
- 刘寿东,唐玉琪,邵玲玲等. 2012. LAPS 分析场在一次强对流天气过程尺度分析中的应用. 大气科学学报, 35(4): 391-403. Liu S D, Tang Y Q, Shao L L, et al. 2012. The application of LAPS products in mesoscale analysis of a severe storm. Trans Atmos Sci, 35(4): 391-403 (in Chinese)
- 路泽廷,朱江,符伟伟等. 2014. 全球海洋资料同化系统 ZFL_GODAS 的研制和初步评估试验. 气候与环境研究, 19(3): 321-331. Lu Z T, Zhu J, Fu W W, et al. 2014. Design and preliminary evaluation of the global ocean data assimilation system ZFL_GODAS. Climatic Environ Res, 19(3): 321-331 (in Chinese)
- 潘旸,沈艳,宇婧婧等. 2012. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验. 气象学报, 70(6): 1381-1389. Pan Y, Shen Y, Yu J J, et al. 2012. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique. Acta Meteor Sinica, 70(6): 1381-1389 (in Chinese)
- 潘旸,谷军霞,宇婧婧等. 2018. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验. 气象学报, 76(5): 755-766. Pan Y, Gu J X, Yu J J, et al. 2018. Test of merging methods for multi-source observed precipitation products at high resolution over China. Acta Meteor Sinica, 76(5): 755-766 (in Chinese)
- 师春香,张帅,孙帅等. 2018. 改进的 CLDAS 降水驱动对中国区域积雪模拟的影响评估. 气象, 44(8): 985-997. Shi C X, Zhang S, Sun S, et al. 2018. Effect of improved precipitation CLDAS on snow simulation in China. Meteor Mon, 44(8): 985-997 (in Chinese)

- 孙帅, 师春香, 梁晓等. 2017. 不同陆面模式对我国地表温度模拟的适用性评估. *应用气象学报*, 28(6): 737-749. Sun S, Shi C X, Liang X, et al. 2017. Assessment of ground temperature simulation in China by different land surface models based on station observations. *J Appl Meteor Sci*, 28(6): 737-749 (in Chinese)
- 王际朝. 2014. 基于风场和海浪同步观测的海浪同化模式构建[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所). Wang J C. 2014. Building of wave assimilation model based on the synchronous observations of wind and wave[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (in Chinese)
- 徐宾, 宇婧婧, 张雷等. 2018. 全球海表温度融合研究进展. *气象科技进展*, 8(1): 164-170. Xu B, Yu J J, Zhang L, et al. 2018. Research progress of global sea surface temperature fusion. *Adv Meteor Sci Technol*, 8(1): 164-170 (in Chinese)
- 张帅, 师春香, 梁晓等. 2018. 风云三号积雪覆盖产品评估. *遥感技术与应用*, 2018, 33(1): 35-46. Zhang S, Shi C X, Liang X, et al. 2018. Assessment of FY-3 snow cover product. *Remote Sens Technol Appl*, 33(1): 35-46 (in Chinese)
- 朱立娟, 龚建东, 黄丽萍等. 2017. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用. *应用气象学报*, 28(1): 38-51. Zhu L J, Gong J D, Huang L P, et al. 2017. Three-dimensional cloud initial field created and applied to GRAPES numerical weather prediction nowcasting. *J Appl Meteor Sci*, 28(1): 38-51 (in Chinese)
- Albergel C, Dorigo W, Balsamo G, et al. 2013. Monitoring multi-decadal satellite earth observation of soil moisture products through land surface reanalyses. *Remote Sens Environ*, 138: 77-89
- Atlas R, Hoffman R N, Ardizzone J, et al. 2011. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. *Bull Amer Meteor Soc*, 92(2): 157-174
- Benjamin S G, Weygandt S S, Brown J M, et al. 2015. A North American hourly assimilation and model forecast cycle: The rapid refresh. *Mon Wea Rev*, 144(4): 1669-1694
- Chen F, Manning K M, Lemone M A, et al. 2007. Description and evaluation of the characteristics of the NCAR high-resolution land data assimilation system. *J Appl Meteor Climatol*, 46(6): 694-713
- Donlon C J, Martin M, Stark J, et al. 2012. The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sens Environ*, 116: 140-158
- Fetterer F. 2006. A selection of documentation related to National Ice Center sea ice charts in digital format. Boulder, CO, USA; National Snow and Ice Data Center
- Jordi F V I, Tabary P. 2013. The new French operational polarimetric radar rainfall rate product. *J Appl Meteor Climatol*, 52(8): 1817-1835
- Gemmill W, Katz K, Li X. 2007. Daily real-time global sea surface temperature-high resolution analysis at NOAA/NCEP. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Office Note, 260, 39
- Haiden T, Kann A, Wittmann C, et al. 2011. The integrated nowcasting through comprehensive analysis (INCA) system and its validation over the eastern Alpine region. *Wea Forecasting*, 26(2): 166-183
- Hu M, Xue M. 2007. Implementation and evaluation of cloud analysis with WSR-88D reflectivity data for GSI and WRF-ARW. *Geophys Res Lett*, 34(7): L07808
- Huffman G J, Adler R F, Arkin P, et al. 1997. The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(1): 6-20
- Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. 2007. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J Hydrometeorol*, 8(1): 38-55
- Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J Hydrometeorol*, 5(3): 487-503
- Kitzmilller D, Miller D, Fulton R, et al. 2013. Radar and multisensor precipitation estimation techniques in national weather service hydrologic operations. *J Hydrol Eng*, 18(2): 133-142
- Qian T T, Dai A G, Trenberth K E, et al. 2006. Simulation of global land surface conditions from 1948 to 2004. Part I: Forcing data and evaluations. *J Hydrometeorol*, 7(5): 953-975
- Ramsay B H. 2000. Prospects for the interactive multisensor snow and ice mapping system (IMS) // Proceedings of the 57th Eastern Snow Conference. Syracuse, NY.
- Rasmy M, Koike T, Boussetta S, et al. 2011. Development of a satellite land data assimilation system coupled with a mesoscale model in the Tibetan Plateau. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 49(8): 2847-2862, doi: 10.1109/TGRS.2011.2112667
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res*, 108(D14): 4407, doi: 10.1029/2002jd002670
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J Climate*, 15(13): 1609-1625
- Rodell M, Houser R, Jambor U, et al. 2004. The global land data assimilation system. *Bull Amer Meteor Soc*, 85(3): 381-394
- Seo D J, Breidenbach J P. 2002. Real-time correction of spatially nonuniform bias in radar rainfall data using rain gauge measurements. *J Hydrometeorol*, 3(2): 93-111
- Sheffield J, Ziegler A D, Wood E F, et al. 2004. Correction of the high-latitude rain day anomaly in the NCEP-NCAR reanalysis for land surface hydrological modeling. *J Climate*, 17(19): 3814-3828
- Tabary P. 2007. The new French operational radar rainfall product.

- Part I: Methodology. *Wea Forecasting*, 22(3): 393-408
- Ushio T, Kubota T, Shige S, et al. 2009. A Kalman filter approach to the global satellite mapping of precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data. *J Meteor Soc Japan*, 87A: 137-151
- Wang D, Gao J, Brewster, et al. 2003. The advanced regional prediction system (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. *Meteor Atmos Phys*, 82(1): 139-170
- Wu W R, Kitzmiller D, Wu S R. 2012. Evaluation of radar precipitation estimates from the national mosaic and multisensor quantitative precipitation estimation system and the WSR-88D precipitation processing system over the conterminous United States. *J Hydrometeorol*, 13(3): 1080-1093
- Xia Y L, Mitchell K, Ek M, et al. 2012. Continental-scale water and energy flux analysis and validation for North American land data assimilation system project phase 2 (NLDAS-2): 2. Validation of model-simulated streamflow. *J Geophys Res*, 117 (D3): D03110, doi: 10.1029/2011JD016051
- Xie P, Arkin P A. 1997. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull Amer Meteor Soc*, 78 (11): 2539-2558
- Xie P P, Xiong A Y. 2011. A conceptual model for constructing high-resolution gauge-satellite merged precipitation analyses. *J Geophys Res*, 116 (D21): D21106, doi: 10.1029/2011JD016118
- Xue M, Droegemeier K K, Wong V, et al. 2001. The advanced regional prediction system (ARPS): A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part II: Model physics and applications. *Meteor Atmos Phys*, 76(3-4): 143-165
- Xue M, Wang D H, Gao J D, et al. 2003. The advanced regional prediction system (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. *Meteor Atmos Phys*, 82(1-4): 139-170
- Zhang H M, Bates J J, Reynolds R W. 2006a. Assessment of composite global sampling: Sea surface wind speed. *Geophys Res Lett*, 33(17): L17714
- Zhang H M, Reynolds R W, Bates J J. 2006b. Blended and gridded high resolution global sea surface wind speed and climatology from multiple satellites: 1987-present//Proceedings of the 14th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. Atlanta, GA: American Meteorological Society
- Zhang J, Howard K, Langston C, et al. 2016. Multi-radar multi-sensor (MRMS) quantitative precipitation estimation: Initial operating capabilities. *Bull Amer Meteor Soc*, 97(4): 621-638