

国际主流多源融合降水实况产品的研究进展与展望

张璐 潘旸 谷军霞 师春香

(国家气象信息中心气象数据研究室, 北京 100081)

摘要: 精细、精准、高时效的网格降水实况产品对于智能网格预报业务、防灾减灾以及水循环、地气相互作用具有重要意义。从20世纪90年代起,利用地面观测、卫星、雷达、模式等多源资料和数据,美国、日本、欧盟等先后开始研制降水融合产品,并形成一系列区域或全球范围的多源融合降水实况产品。目前全球降水实况产品中,美国NASA研发的Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM (IMERG)产品已推出第六代,将数据覆盖范围扩大至全球,结合地球同步红外数据、微波数据、地面雨量计数据等,形成具有较高时空分辨率的降水融合产品。日本推出的GSMaP产品使用了PMW (Passive Microwave)算法、降雪估算算法等方法,也研制出了具有较高质量的降水产品。区域高分辨率降水实况产品方面,美国最新业务化的MRMS (Multi-Radar/Multi-Sensor System)系统研制的雷达QPE (Quantitative precipitation estimation)产品基于雷达基数据、地面雨量计数据、模式数据等,结合先进的技术在美国区域生成了1 km、2 min更新的降水实况产品。我国多源降水融合技术的研究起步较晚,自2010年起逐步开展研究,2018年国家气象信息中心牵头,中国区域逐时、5 km分辨率的地面卫星、雷达三源融合降水实况产品实现业务运行,作为零时刻实况应用于我国无缝隙智能网格预报业务,2021年该产品空间分辨率将提高至1 km。但同时需意识到,我国降水实况业务产品与灾害天气监测预警、高频次滚动更新的智能预报、智慧气象服务业务需求以及国际最先进降水实况产品研制技术尚有差距,全球降水产品还未摆脱对国际产品的依赖,及时掌握国际多源融合降水研制技术研究动态,开展降水融合核心技术的调研和攻关,对提高我国降水实况产品质量具有重要意义。

关键词: 多源融合, 降水实况, 卫星, 雷达, IMERG, GSMaP, MRMS

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.06.003

Advances and Outlook for International Mainstream Multi-Source Precipitation Merging Products

Zhang Lu¹, Pan Yang¹, Gu Junxia¹, Shi Chunxiang¹

(National Meteorological Information Centre, Beijing 100081)

Abstract: Precise, accurate and highly efficient grid precipitation real-time products are of great significance for intelligent grid forecasting, disaster prevention and reduction, water cycle and land-atmosphere interaction. Since the 1990s, the United States, Japan and the European Union have successively started to develop precipitation fusion products using ground observation, satellite, radar, model and other multi-source data and formed a series of regional or global multi-source fusion precipitation real-time products. At present, among the global precipitation real-time products, the Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM (IMERG) product developed by NASA of the United States has launched the sixth generation, expanding the data coverage to the whole world, combining the geosynchronous infrared data, microwave data, ground rain gauge data, etc., and forming a precipitation fusion product with high spatial and temporal resolution. The GSMaP product launched by Japan adopted PMW (Passive Microwave) algorithm, snow estimation algorithm and other methods, and developed high quality precipitation products. In terms of regional high-resolution precipitation real-time products, the radar QPE (Quantitative precision estimation) product developed by the latest operational MRMS (Multi Radar/Multi Sensor System) of the United States has generated 1km, 2 min updated precipitation products in the United States based on radar raw data, ground rain gauge data, model data, etc.. The research on multi-source precipitation fusion technology in China started relatively late and has been gradually carried out since 2010. In 2018, the National Meteorological Information Center took the lead, and the real-time precipitation fusion product of hourly and 5 km resolution, which integrated ground-based data, satellite data and radar data, was applied in the operational forecast. As a real-time product, it has been used in China's seamless smart grid forecasting operation. And the spatial resolution of the product was increased to 1km in 2021. However, it is necessary to realize that there is still a gap between Chinese real-time precipitation products and the demand for disaster weather monitoring and warning, high-frequency rolling update of intelligent forecasting and smart meteorological services. The gap also exists between our products and the most advanced technology in international precipitation real-time product development. Our global precipitation products are still heavily dependent

收稿日期: 2021年9月15日; 修回日期: 2021年12月8日
第一作者: 张璐 (1991—), Email: wisheszhanglu@126.com

Our global precipitation products are still heavily dependent

on international products. Hence it is of great significance to follow the latest development of technologies in international multi-source integrated precipitation products and carry out research targeting for the core technologies of precipitation fusion products so as to improve the quality of precipitation real-time products in China.

Keywords: Multi-Source merging, real precipitation, satellite, radar, IMERG, GSMaP, MRMS

0 引言

降水是气候系统中水分循环和能量交换的重要组成部分,是表征气候变化的重要指标,作为陆地表面的重要物理量,其时空分布和变化对于水文循环、天气相互作用以及防灾减灾具有重要作用。另一方面,在运用数值模式模拟和预测天气及气候系统变化时,也需要高质量的降水观测产品来进行对比检验。因此,准确的降水时空分布信息对于了解气候系统和长期的天气气候变化,以及陆表、水文过程的模拟和预报至关重要。

目前降水数据源主要包括站点观测、卫星遥感、雷达估算降水和数值模式模拟(或预报)。这几种数据各有优劣。站点观测数据通过雨量计获取数据,能够较为准确地测量当前时刻地面的降水量,但空间代表性差;由于受仪器故障、运行性能下降、杂物堵塞雨量筒等因素影响,实际的地面观测降水数据包含随机偏差和系统性偏差。雷达估算降水具有较高的时空分辨率,但雷达回波中的杂波和噪声会对估算结果造成较大影响,数据精确度不如地面雨量计观测^[1]。这两种降水资料空间分布不均匀,适合观测局区域性降水,很难获得较准确的大区域或全球的降水信息。卫星反演降水资料空间覆盖广,对某些特定目标区域的观测时间分辨率也很高,但由于卫星反演降水的物理原理和算法的局限性,其反演降水的精度相对降低。数值模式模拟(或预报)的降水数据是根据天气系统变化、微物理过程演变和地形条件作用等信息,综合得出的降水数据,通常包含地形信息且数据分布规则,然而由于模式动力框架、物理过程还不能完全描述大气的真实状态,模式本身亦存在严重的系统偏差,使得模拟(或预报)降水区域与实际地面观测常常存在一定程度的差异。因此,基于单一来源的降水资料各有优劣,有效利用不同来源降水的优势,将多源降水进行融合是获取高质量高分辨率网格降水产品的趋势。

“天气实况”是天气预报的起点。“网格天气实况”则要求多圈层多要素整体协调一致,还得对复杂地形和高影响天气中个别的极值负值进行合理化处理,为预报与服务提供“零时刻”数据支撑。多源降水实况产品的研制对于实时掌握天气形势、及时佐证降水预报具有重要意义。

从20世纪90年代起,美国、日本、欧盟等先后开始研制降水融合实况产品。美国国家海洋大气管理局(NOAA)、美国国家气象局(NWS)和气候预测中心(CPC)的CMAP产品覆盖全球,分别有月和候两种时间分辨率,CMORPH产品只覆盖60°N—60°S的地区,原始数据时间分辨率为30 min。2019年美国NASA推出了覆盖全球范围、时间分辨率30 min、空间分辨率为0.1°的卫星反演降水产品IMERG V06^[2]。相比于其他系列降水产品,在大幅度提高时空分辨率的基础上,仍具有较好的数据质量,成为卫星反演降水产品的主流产品之一。日本研制的GSMaP产品尽管只覆盖60°N—60°S区域,但是该产品在研制过程中合理考虑了地形作用对降水的影响,因此也具有较好的产品质量。

NOAA国家强风暴实验室(NSSL)和NWS水文发展办公室(Office of Hydrologic Development)针对高质量、高分辨率降水产品的需求,联合发展了NMQ计划(The National Mosaic and Multisensor QPE Project),发展了一系列针对雷达和卫星估测降水的误差订正^[3]和针对单部雷达特性的局地误差订正方案^[4]以及雷达、卫星与地面观测资料的融合技术^[5-6],并实时推出了各种高分辨率定量降水估测(QPE)产品,其中美国最新业务化的MRMS系统研制的雷达QPE产品Q3是区域高分辨率QPE产品中比较有代表性的降水产品。1 km的空间分辨率和2 min的时间分辨率使得Q3相比于Stage II和Stage IV有了较大提升,尤其在主要技术中新增了无缝混合扫描等关键技术,进一步提高了QPE的质量。

近年来国外降水融合技术逐步改进,不断推出时空分辨率更高、质量更好的多源降水融合产品。发展高分辨率的降水融合产品,是解决气象及水文业务和科研迫切需求的有效途径,因而越来越受到气象资料基础研究领域的关注和重视。我国对于多源降水融合技术的研究起步较晚,自2010年起逐步开展此项研究,旨在建成中国区域多源降水融合实况系统,研制中国区域高时空分辨率多源降水融合产品及全球多源降水融合产品。最初引进NOAA和CPC的“概率密度函数(PDF)+最优插值(OI)”两步融合法^[7]研制了中国区域逐小时、0.1°的地面和基于GSMaP和IMERG卫星反演降水的二源融合降水产品^[8-10]。2014年引入雷

达降水高分辨率的空间结构信息,采用贝叶斯模式平均(BMA)方法,在中国区域成功研制出逐时、5 km的地面卫星、雷达三源融合降水产品,2016年进一步将产品空间分辨率提高至1 km^[8,11]。2018年国家气象信息中心牵头,中国区域逐时、5 km分辨率的地面卫星、雷达三源融合降水实况产品实现业务运行,作为零时刻实况应用于我国无缝隙智能网格预报业务,2021年该产品空间分辨率将提高至1 km。三源融合产品虽然一定程度上满足了用户对产品质量、时效和高分辨率的需求,但是仍然存在需要解决的问题和未能满足的需求。首先,在卫星反演降水产品领域,我国还未推出自己研制的全球产品,目前仍依赖于国外产品,对于如何进行红外和微波反演技术研究和开展卫星反演降水产品研究,需要广泛调研,制定计划。其次,我国还没有时间上均一的长序列、全国组网的雷达QPE历史产品用于雷达QPE产品的偏差订正;并且对于雷达QPE的质量控制方法还不够详细和严谨。考虑到我国存在大量S波段雷达和C波段雷达,二者在雨区衰减方式不同,造成二者叠加区域组网也有一定的技术难度。雷达QPE产品还存在雷达放射状波束结构,以及不同雷达的系统偏差拼接后造成降水空间结构不连续等质量问题。第三,青藏高原地区的特殊地形也为降水融合带来了较大困难。山区降水如何根据地形合理

融合也是亟需解决的问题。

针对我国降水融合领域的发展现状和问题,对国际主流降水融合产品展开调研,以美国的IMERG、MRMS的Q3和日本的GSMaP为例,重点调研这几种产品的研制算法、产品优势和不足之处,及时掌握国际降水融合产品研究动态,为进一步完善我国降水融合产品奠定基础。

1 降水融合的发展现状

1.1 国际主流全球降水实况产品研究进展

静止卫星与极轨卫星运行方式的差异决定了二者的探测重点不同。静止卫星能够长时间、连续且高时空分辨率地探测大气,利用它探测的红外/可见光(IR/VIS)云顶亮温与降水概率和降水强度统计关系来反演降水,适用于对流性降水为主的区域。极轨卫星探测的是大气中降水例子发射或者散射的微波,由被动微波(PMW)反演降水精度显著提高。静止卫星与极轨卫星观测难以实现时空全覆盖,因此结合红外和微波探测的优势发展集成卫星反演降水是研制全球卫星反演降水产品的主流思路。国际现有主流的卫星反演降水融合产品如表1所示。这类降水产品虽然大多覆盖全球,但多以逐月(候)为主,空间分辨率也较粗,但资料时间覆盖从1979年至今,一定程度上满足

表1 国际主要降水业务产品
Table 1 List of global merged precipitation products

国家	机构	产品名称	时间分辨率	空间分辨率	覆盖范围	起始时间	数据源	
美国	NOAA	CMAP	候	2.5°	全球	1979—2016年12月	OPI/SSMI/GPI/雨量计	
			月	2.5°	全球	1979至今	OPI/SSMI/GPI/MSU/雨量计/模式	
			候	2.5°	全球	2000至今	OPI/SSMI/GPI/雨量计	
	NOAA	CMORPH Bias-corrected (v1.0)	30 min			1998年至今	IR: GOES/Meteosat/GMS; PMW: AMSU-B/SSMI/TMI; 雨量计	
			3 h	0.25°	60°N—60°S	1998年至今	同上	
			日	0.25°	60°N—60°S	1998年至今	同上	
			日	0.25°	60°N—60°S	1998年至今	同上	
	NOAA	CMORPH Blended (v1.0)	日	0.25°	60°N—60°S	1998年至今	同上	
			CMORPH (v2.0)	30 min	0.05°	全球	1998年至今	同上
				日	1°	全球	1979至今	SSMI/SSMIS/TOVS/AIRS/GPCP月值
美国	NOAA	GPCP_Daily	日	1°	全球	1979至今	SSMI/SSMIS/TOVS/AIRS/GPCP月值	
			月	2.5°	全球	1979至今	OPI/SSMI/GPI/MSU/雨量计	
	NOAA	TRMM_3B42_7	3 h	0.25°	50°N—50°S	1997年12月至今	TCI/TMI/SSMI/SSMIS/AMSR-E/AMSU/MHS/MW-VAR(IR)/雨量计	
			日	0.25°	50°N—50°S	1998至今	TCI/TMI/SSMI/SSMIS/AMSR-E/AMSU/MHS/MW-VAR(IR)/雨量计	
			月	0.25°	50°N—50°S	1998年至今	TCI/TMI/SSMI/SSMIS/AMSR-E/AMSU/MHS/MW-VAR(IR)/雨量计	
NASA	TRMM_3B43_7	30 min	0.1°	全球	2000年6月至今	GMI/TMI/SSMI/SSMIS/MHS/MWI/AMSU/ATMS/AMSR-E/雨量计		
		日	0.1°	60°N—60°S	2014年3月至今	IR:GOES/Meteosat/GMS; PMW:AMSU-B/SSMI/TMI; 雨量计		
日本	JMA	GSMaP-MVK (V7)	1 h	0.1°	60°N—60°S	2014年3月至今	IR:GOES/Meteosat/GMS; PMW:AMSU-B/SSMI/TMI; 雨量计	
欧洲	JRC	MSWEP	3 h	0.25°	全球	1979—2015年	GPCC, CPCU, JRA-55, ERA-Interim, CMORPH, PERRSAINN, TRMM3B42	

内有两个以上的估计值，则根据以下优先级只选择一个：选择锥形扫描传感器的估计值而非交叉扫描传感器的估计值，其次是估计值的观测时间最接近半小时的中心时刻。之后，对格点化的PMW估计值进行相互订正。IMERG使用Ku波段联合雷达和辐射计(CORRA)产品作为校准的参考标准，对全球降水气候项目V2.3产品^[12,13]进行季节性调整，以控制陆地和海洋某些纬度上已知的不足之处。理想情况下，所有传感器都将直接校准到CORRA，但由于轨道特性和Ku波段CORRA估计值的范围较窄，对于搭档传感器来说，重合采样太少了。因此，相互校准分两步进行。首先，网格化搭档传感器的平均值分别根据GPM和TRMM时期的GPM微波成像仪(GMI)和TRMM微波成像仪(TMI)，使用基于一年重合估计的静态季节性数据进行校准。其次，使用每5 d更新一次的45 d动态校准，将GMI-TMI校准到CORRA，该校准也适用于GMI-TMI校准的搭档传感器。

准拉格朗日插值应用于网格PMW估计，用以填补辅助数据计算的运动矢量中的空白。此过程称为变形，最初是作为CPC变形技术(CMORPH)的核心组成部分被引入的^[14-15]。利用人工神经网络-云簇系统(PERSIANN-CCS)算法计算红外亮温，并以此计算微波校准的降水估计值，再根据^[16]的卡尔曼滤波方法进一步补充变形降水。通常情况下，在冻结的表面上，PMW的反演是不准确的，所以IMERG掩盖了PMW和雪、冰覆盖表面的变形估计，正如NOAA AutoSnow产品所示^[17]。

1.1.1.2 IMERG算法变形

IMERG算法的一个关键组成部分是变形技术。首先由NOAA气候预测中心开发，作为CMORPH产品的核心部分，后来根据全球卫星降水制图改进卡尔曼滤波(GSMaP)^[18]，包括IR降水^[16]，最后将变形算法集成在IMERG算法中。全球降水的先进算法迅速采用这一概念，证明了它能够从有限的PMW传感器采样中在网格数据集中产生高时间分辨率的产品。

在CMORPH和IMERG中实现的变形算法可以分解为三个部分。首先，推导出代表降水运动的运动向量。其次，这些运动向量用于在没有瞬时PMW观察的区域上传播降水。第三，通过卡尔曼滤波器将传播降水与红外降水集成。

为了得到运动矢量，比较了全球范围的大气变量的两个连续场。在V06之前的CMORPH和IMERG中，所使用的变量是来自CPC 4 km融合的红外数据集的半小时全球地球同步红外亮温。为了计算网格框处的运动矢量，将 $5^\circ \times 5^\circ$ 模板中低于260 K的IR像素与接下

来半小时的IR像素进行比较，这些像素与模板具有不同的空间偏移。对每个空间偏移量计算红外像素的两个场之间的相关性，相关性最高的偏移量构成该网格框的运动矢量。这种方法得到的运动矢量反映了云顶的大尺度运动，与实际的亮温值相对独立。虽然运动矢量可以在每个降水网格处导出(对于IMERG来说是 0.1°)，但由于此过程计算量很大，实际上每 2.5° 计算一次。由于数据丢失或模板中缺少冷云而导致的任何缺失向量都使用时间和空间插值来填充。如果将多个像素传播到单个网格框，则对它们进行平均。如果传播后网格框为空，则使用来自相邻网格框的空间插值来填充它。

在CMORPH和IMERG中，从V05开始，运动矢量是根据4 km地球同步红外亮度温度计算的；因此，运动矢量反映了云顶运动。然而，使用地球同步IR计算运动矢量有两个主要限制。第一个是云顶运动可能与降水运动不匹配，主要是由于风切变以及降水和云系统演化的潜在差异。事实上，这就是使用美国地基雷达进行气候定标的原因(如上所述)，尽管尚不清楚这些定标因子对世界其他地区的适用程度。第二个是CPC红外数据集仅限于 60°N — 60°S 。 60°N/S 向极地方向，视角被认为过于倾斜，无法产生可靠有用的信息。这个限制阻止了变形直接扩展到高纬度(此处定义为 60°N/S 向极地区)。针对地球同步红外数据的这些缺点，改进了IMERG V06，使用数值模型变量导出运动矢量。

1.1.1.3 IMERG的未来发展

针对IMERG V06产品中陆地—海岸—海洋连续性降水探测的不确定性，Derin等人^[19]选取美国的三个沿海地区——西海岸、墨西哥湾和东海岸，已经进行了初步评估，所有这些地区都具有不同的地形和降水气候特征。在不同的表面(陆地、海岸和海洋)进行检测能力的对比。结果表明，PMW算法检测性能最好(命中率在25%~39%)，其次是变形(20%~34%)。对于地形难以检测的西海岸，降水形成机制起着重要作用。IMERG V06产品依旧有需要不断完善的地方。

对于IMERG V06，目前选择总可降水量(TQV)作为推导运动向量的变量，因为它具有竞争力的性能和全局完整性，尽管随着更多评估结果的到来，可能会在未来版本中重新考虑这一决定。

关于运动矢量源对TQV的变化，一个值得关注的问题可能是地形的负面影响。TQV作为一个垂直积分量，由于垂直柱较短，在较高海拔处TQV减小。考虑到运动矢量推导的间接性质和降水运动与地形之间复杂的相互作用，这如何影响运动矢量的精度尚不清

楚。事实上，也不清楚基于红外的运动矢量是如何受到地形的影响的。值得指出的是，IMERG不同于GS-MaP^[20-21]，还没有一个方案来解释地形对降水的增强，这使得更难理清地形对运动矢量可能的影响，同时也限制了评估方法的有效性。

与将IMERG扩展到极地有关的第二个问题是使用圆柱等距网格，在经度方向60°N/S的限制下，以前可以接受的网格扭曲现在在极点附近相当严重。虽然已经在V06中实施了更正，但它们的特殊性质可能会在高纬度的传播估计中引入误差。IMERG正在积极考虑为V07迁移到一个更公平的网格，转换到考虑经度失真的网格将提供更高的精度（特别是在高纬度地区）和计算速度。

1.1.2 日本 GSMaP 降水产品

2002 年在日本科学技术振兴机构的赞助下启动了一个新的“全球卫星降水制图(GSMaP)”项目，以开发基于可靠的降水物理模型的降雨率反演算法，并根据卫星数据生成高精度、高分辨率的全球降水图，为研究全球降雨率变化和长期水资源管理提供基础信息。

GPM时代的GSMaP产品主要由“标准产品”，“近实时产品”、“实时产品”和“再分析产品”组成。这些产品的延迟时间和输入数据的不同，如表2所示。

1.1.2.1 GSMaP算法

GSMaP算法基于多卫星被动微波辐射计观测数据，利用来自地球静止红外(IR)仪器的信息，以及

表2 GPM时代的GSMaP产品列表

Table 2 List of GSMaP products in the GPM era

产品名	变量	分辨率	延迟	更新间隔
标准产品	小时降水率 (GSMaP_MVK)			
	雨量计修正小时降水率 (GSMaP_Gauge)		3 d	
近实时产品	小时降水率 (GSMaP_NRT)			1 h
	雨量计修正小时降水率 (GSMaP_Gauge_NRT)	水平: 0.1°, 时间: 1 h		4 h
实时产品	小时降水率 (GSMaP_NOW)		0 h	0.5 h
再分析产品	小时降水率 (GSMaP_RNL)			
	雨量计修正小时降水率 (GSMaP_Gauge_RNL)			偶尔重新处理过去的周期数据

利用热带降雨测量任务 (TRMM) 上的降水雷达 (PR) 和闪电成像传感器 (LIS) 观测成果建立的数据库，生成高分辨率、高频率的全球降雨图。GSMaP 算法已经根据热带降雨测量任务 (TRMM) 降水雷达 (PR) 的各种属性进行了改进，并在1997—2015年运行。PR和TRMM微波成像仪 (TMI) 的结合使用大大改进了降雨估计技术。GPM核心天文台于2014年2月发射搭载双频降水雷达 (DPR) 和GPM微波成像仪 (GMI)。DPR和GMI通过将观测范围扩展到比TRMM获得的纬度更高的纬度，从而拥有更先进的技术。

GSMaP产品的核心算法主要包括：PMW降水反演算法、PMW-IR组合算法、雨量计观测调整算法。GSMaP产品的流程如图2所示。GSMaP算法使用一些辅助数据作为操作输入。利用6 h、0.5°网格分辨率的JMA全球分析 (GANAL) 和预测 (FCST) 数据集作

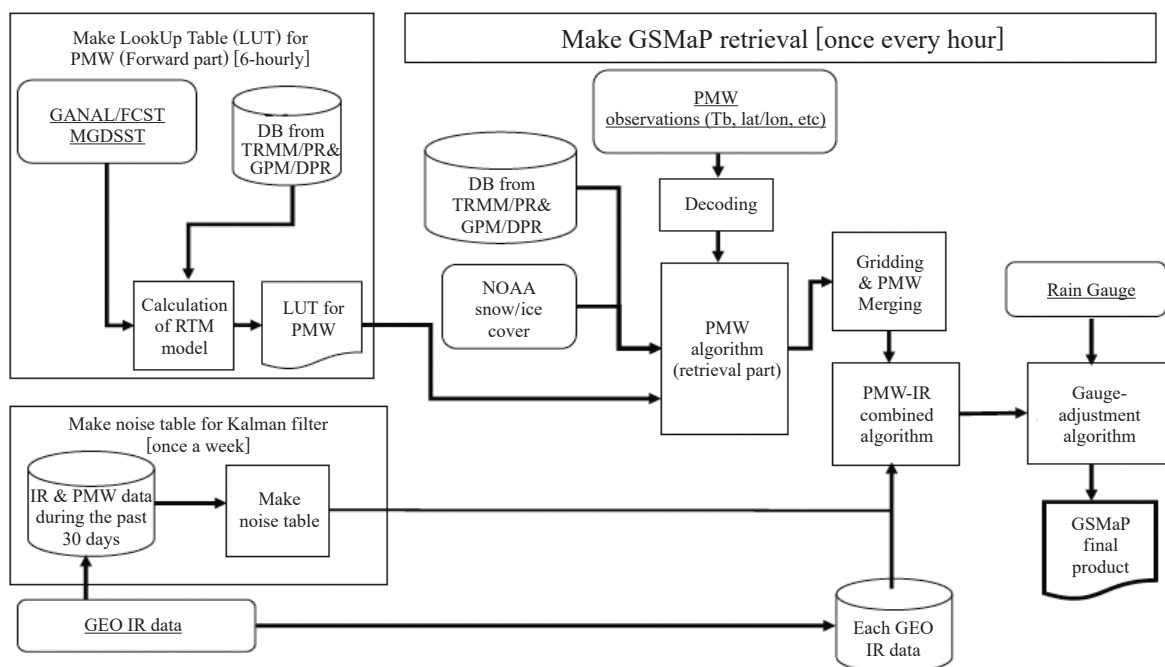


图2 GSMaP产品流程图
Fig. 2 Flow chart of GSMaP products

为大气条件的辅助数据来计算查找表 (lookup table, LUTs), 供PMW算法参考。

采用GANAL数据处理标准产品, 采用FCST数据处理近实时产品。在再分析产品中, 使用JRA-55数据 (6 h, TL319L60模型网格) 代替运行数据。利用JMA融合的卫星和全球每日海表温度 (MGDSST) 的观测数据 (位于0.25°网格) 作为辅助海表温度数据, 供PMW算法参考。NOAA CPC在0.5°网格上, 统一的基于雨量计的全球每日降水分析, 已被用作计算雨量计调整降雨量的输入。来自JAXA高级微波扫描辐射计 (AMSR-E) 产品的气象海冰值用于筛选V6中的海冰, 而没有使用地表雪的辅助数据。在V7中, 使用NOAA国家环境卫星、数据和信息服务 (NESDIS) 多传感器雪/冰覆盖图作为辅助数据来检测海冰和表面雪, 这些数据供PMW算法使用。

1.1.2.2 PMW算法

PMW算法从PMW传感器亮度温度 (Tbs) 中反演全球降水率。PMW算法的基本思想是找到提供Tb的降水率, 通过辐射传输模型计算最契合观测的Tbs。

PMW算法由前向计算部分和反演部分组成。在前向计算部分, 通过将GANAL或FCST数据的大气和地表变量以及基于星载降水雷达观测的降水物理模型纳入Liu^[22]的RTM程序, 计算均匀降水的LUT。PMW算法的反演部分利用陆地上的散射信号和海洋上的放射信号来检测降雨。采用Seto等^[23], Mega和Shige^[24]和Kida等^[25]等方法对陆地、沿海和海洋地区的降雨进行检测。此外, 通过考虑从37 GHz Tbs估计云液态水^[26], V7提高了对海洋的探测能力。

1.1.2.3 地形/非地形降雨的分类

在沿海山脉地区, 强降雨可能是由浅层地形降雨引起的, 这与PMW算法中的假设不一致, 即强降雨是由带有大量冰的深云产生的。因此, 开发了地形/非地

形降雨分类方案^[27]。地形降雨的LUT是根据 Shige 等人^[28]的方法计算的。此外, 还开发了一种适用于地形降雨LUTs的地形降雨探测方案。

1.1.2.4 降雪估算方法

在V6或更早的版本中, GSMaP产品中没有降雪估算。降雪估算方法可分为对降水相态 (雨/雪) 进行分类的方法和如果确定为雪则估算降雪强度的方法。这里, 雨/雪分类方法基于Sims和Liu^[29]的方法。该方法根据过去地面观测的结果, 确定降水相态是雨还是雪。基于Liu和Seo^[30]的方法, 采用CloudSat-GPM重合数据集开发降雪强度估计方法。

1.1.2.5 PMW-IR组合算法

PMW-IR组合算法将PMW数据与红外辐射计数据相结合, 以实现高时间 (1 h) 和空间 (0.1°) 分辨率的全球降水估算。该产品是基于卡尔曼滤波器模型生成的, 该模型基于两幅连续红外图像导出的大气运动矢量来细化降水速率传播^[18]。使用过去30 d的IR和PMW数据, 每周计算一次卡尔曼滤波器模型中的噪声和系数 (图2)。

1.1.2.6 雨量计修正算法

GA算法通过NOAA/CPC统一的全球日降水量分析来调整MVK估计值。估计值仅在陆地上进行了调整。GA和GA_NRT的海洋降雨率分别与MVK和NRT的相同。该算法使用光学估计方案, 其中通过最大化系统模型中定义的概率密度函数来求解^[31]。GA的每小时降雨率通过该算法进行调整, 使得GA的24 h降雨率总和与雨量计观测值大致相同。

1.2 区域高分辨率降水实况产品研究进展

雷达通过接收其发射电磁波经过降水区降水粒子反射回来的雷达回波信号来进行定量降水估测 (QPE)。在区域高分辨率降水检测领域雷达定量降水估测产品仍是主流 (表3)。雷达探测的是与降水直接

表3 国际主要高分辨率降水业务产品

Table 3 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°层亮带检测; 静态Z-R关系	累积降水量	美国本土	1994年	4 km, 1 h
		Stage IV	地面雨量计偏差订正、人工质量控制、卫星填补			2001年	
	NSSL	MRMS	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、累积降水量、误差		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	法国组网	1997年	1 km, 15 min
		业务雷达降水第2代	地物杂波抑制、VPR订正、波束阻挡订正			2007年	
		业务雷达降水第3代	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			2013年	
德国	德国气象局	RADOLAN	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	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	累积降水量	单部雷达		6 min

的结构信息,精度较卫星明显要高。从雷达QPE业务产品的时空属性来看,其分辨率已达到1 km、分钟级,空间覆盖一般为局地组网。由于Z-R关系不确定、地物遮挡、距离衰减、探测高度等原因造成雷达估测降水存在明显的系统性偏差,需要利用地面雨量计资料对其进行校准。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^[4],已在NCEP的Stage IV系统和美国国家强风暴实验室(NSSL)的多雷达多遥感(MRMS, Multi-Radar/Multi-Sensor System)分析系统中成熟应用。MRMS系统也是目前发展最为成熟和应用最广泛的业务化系统。

1.2.1 美国MRMS系统的雷达QPE产品Q3

Q3是美国最新业务化的MRMS系统研制的雷达QPE产品。MRMS系统中雷达QPE产品制作的输入数据包括:约180部雷达基数据, RAP模式数据、约10000站HADS地面雨量计数据、PRISM气候背景场数据等。输出降水产品包括:基于雷达QPE(Q3RAD)产品、基于雨量计QPE(Q3Gauge)产品、雨量计偏差订正后雷达QPE(Q3GC)产品、雨量计和降水气候场融合山区降水(Q3MM)产品等4类。

1.2.1.1 Q3产品中的关键技术

1) 无缝混合扫描反射率生成技术

无缝混合扫描反射率(Seamless HSR, SHSR)是根据地形对雷达对雷达波束的阻挡选择最低有效仰角而生成的,并进行了无缝处理,以解决高空间分辨率下的波束缝隙问题,同时进行了雷达反射率因子质量控制去除非气象回波,并利用波速阻挡补偿、垂直廓线订正方法提高回波的均一性。

2) 降水类型分类技术

MRMS系统中,利用来自模式的环境变量(地表温度、湿球温度、结冰层的高度)、强天气产品(-10℃的反射率、VIL、冰雹最大期望尺寸)、无缝混合扫描反射率、AVPR、暖雨概率等多源数据,基于决策树方法将降水分为7类:无雨、雪、雹、暖雨、冷雨、对流性雨等。

3) 降水率估测技术及Q3RAD产品

天气雷达间接测量降水率,需由Z-R经验公式将反射率因子(Z)反演为降水率(R)。不同类型降水粒子相态、大小不同,对雷达波散射能力不同,所以应采用不同Z-R关系式。MRMS系统中根据降水类型场,采用相应Z-R关系计算瞬时降水率^[32]。

4) 双偏振量的降水估测

关系在某些区域呈现出降水估测的优势^[32],但关

系对雷达标定的偏差比较敏感;和R对雷达标定偏差及由于波速阻挡造成的偏差不敏感,但对于不同降水类型的估测性能不稳定。因此,MRMS系统计划在业务系统中集成多种双偏振雷达QPE算法

5) 局地雨量计订正技术及Q3GC产品

由于Z-R经验公式的准确性、雷达扫描与地面降水的差别等问题,使得雷达QPE产品与地面观测降水之间存在偏差,一般使用地面雨量计进行订正。MRMS系统利用质控后HADS雨量计小时降水量订正Q3RAD产品。将CONUS分成多个子区域,每个子区域利用IDW方法进行雨量计订正,参数通过交叉检验方法选择。之后,将各子区域订正后的雷达QPE合并,得到局部偏差订正的Q3GC产品。

6) 山区降水产品生成技术及Q3MM产品

山区的地形遮挡影响了雷达QPE产品质量。为解决这一问题,MRMS提出Mountain Mapper方法^[33]。利用质控后的站点雨量计小时降水量和气候降水背景月值数据生成西部山区QPE产品,称为Q3MM产品。

7) 雨量计插值降水产品生成技术及Q3Gauge产品

小时雨量计插值降水产品(Q3Gauge)使用质控后的HADS雨量站数据,利用IDW插值方法而生成。

1.2.1.2 MRMS的未来发展

NSSL的工作人员在第100届AMS年会上介绍了关于MRMS系统正在进行的研究和工作,主要包括以下几个方面:

1) 基于雷达的降雪定量降水估算(QPE)由于雪晶类型、密度和降雪速度等因素的影响而变得复杂。研究表明,与传统的Z-S关系相比,利用双偏振变量和反射率可以提供更准确的雪QPE估计。采用关系计算积雪的QPE性能,通过准垂直剖面(QVP)分析,研究环境参数对关系的影响,并对此关系进行了修正。

2) 提出了一种结合比衰减(A)、反射率(Z)和比差相位(K_{DP})的多雷达多传感器(MRMS)双极化(Q3DP)定量降水估计(QPE)算法。Q3DP QPE在雷达观测低于融化层的区域使用R(A)关系。与其他雷达变量相比,A与R的线性关系更密切,对系统误差Z和 Z_{DR} (差分反射率)不敏感。因此,与其他雷达变量相比,R(A)提供的QPE具有较少的系统和随机误差,特别是在电磁能存在大量衰减的中雨或大雨中。所以,Q3DP的性能明显优于当前使用多重降水率(R)和Z关系的MRMS QPE。

3) 利用一种特定类型的深度学习模型——卷积神经网络,从天气雷达观测数据中定量估算降水量。初步结果显示,其性能优于传统的基于物理的雷达QPE

模型，具有高计算效率和低 I/O 使用率，适用于潜在的操作应用程序。将展示来自不同领域的几个示例，以展示卷积神经网络准确有效地估计降水量的能力。

2 降水融合的发展趋势

2.1 卫星反演降水技术的改进

GPM依靠被动测量和主动测量来测量降水的特性。GPM的双频降水雷达(DPR)等主动雷达发送和接收反射回雷达的信号。返回到雷达接收器的信号(称为雷达反射率)提供了云中多个垂直层雨雪滴的大小和数量的测量。另一方面，像GPM微波成像仪(GMI)这样的被动降水辐射计从包括雪、雨、云和地球表面在内的完整观测场景中测量自然热辐射(称为亮度温度)。

整个卫星反演降水过程，用到了许多算法将各种主动、被动探测信号转换为降水信息。以IMERG为例：1) 雷达算法，降水雷达的独特功能是提供降雨的三维结构，获得海洋和陆地上高质量的降雨估计数。雷达测量通常对地表不太敏感，在雷达反射率和云中雨雪的物理特性之间提供了一种几乎直接的关系。由于在太空中操作雷达的复杂性，仪器的信道(频率)是有限的。TRMM卫星在ku波段有一个单频雷达，对中雨率特别敏感。在单频率下，TRMM雷达能够获得雨滴粒径分布(PSD)的一个参数；垂直采样剖面(例如，云中垂直每500 m)的中值液滴大小或液滴数量。GPM双频降水雷达有两个频率，一个是像TRMM一样的ku波段，另一个是对小雨和降雪量敏感的ka波段；因此，液滴的大小和分布都可以得到。IMERG中的雷达算法需要假设和矫正来回降水结构，尤其是校正衰减。衰减是指雷达信号随着远离发射器而减弱，并被降水和其他大气粒子散射、反射和吸收。2) 辐射计算法，降水辐射计通过使用多个被动频率(TRMM为9个，GPM为13个)为解释云中的雨雪提供了额外的自由度。每个频率的亮度温度是测量视野内一切事物的标准。这些频率从低频(10 GHz)对液体雨滴很敏感，到中频(91 GHz)和高频(183 GHz)对冰雪颗粒很敏感。所以，化繁为简，当云柱中有液体雨时，低频通道就会响应；下雪时，高频通道会有反应；当空气清新时，亮度温度会对表面辐射做出反应。在小雨情况下，地表辐射可能会污染亮温，因此需要额外的信息来限制降水反演。具体来说，在陆地上，只有较高的频率对估算降水量有用。3) 组合算法，同时使用主动和被动微波传感器数据提供了关于降水云的宏观和微观物理过程的补充信息，可用于减少雷达/辐射计组合反演算法的不确定性。简单地说，组合算法

使用辐射计信号作为雷达看到的衰减的一个约束。综合反演产生了水文气象剖面、颗粒大小分布和表面参数，其亮度温度和反射率与实际卫星测量一致。这些组合产品可以重新包装，用作多个辐射计的检索贝叶斯数据库。4) 多卫星算法，除了TRMM和GPM卫星外，许多其他卫星已经并将继续携带与降水有关的传感器。多卫星算法的目标是利用从这一国际卫星星座计算出的“所有”准全球降水估计数，创造一种高分辨率降水产品，在选定的领域和记录期间(目前是准全球，2000年至今)具有完全覆盖范围。基于微波和组合雷达/辐射计输入数据的估计具有更高的质量，因为降水和卫星数据之间存在物理上的直接关系。由于红外和降水之间的间接关系，基于热红外传感器的估计质量较低，但由于传感器位于地球同步轨道，它们提供了更频繁的覆盖范围。其中一个较高质量的数据集，目前是上述的组合雷达+辐射计算法，被选为标准，然后所有其他降水数据集被校准到该标准。在组合中(目前每半小时在 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 纬度/经度网格上)，尽可能多地使用较高质量的数据，而较低质量的数据起次要作用。最后，在它们存在的地区，主要是陆地地区，每月的雨量计数据被用来控制卫星数据集可能表现出的偏差。多卫星算法在观测时间的几个小时内运行，然后在接收到包括月表在内的所有数据后再次运行。

这些繁杂的算法抓住了卫星信号与降水之间的主要关系，但是究其细节，仍有很多待完善的地方。正如IMERG V07所计划的，对于红外信息中包含的运动矢量和降水运动与地形之间复杂的相互作用还研究的并不透彻，这种相互作用如何影响运动矢量的精度尚不清楚。这对于进一步提高地形降水质量尤为重要。

第1.1.2节中对GSMaP产品算法的详细叙述中，也阐述了最新一代产品对各种算法的优化。对这些反演技术的不断优化和改进，可以进一步提高卫星反演降水产品质量。

2.2 雷达QPE技术的改进

地面雷达网络目前提供最高空间和时间分辨率的QPE，是山洪警报的关键输入。对于QPE质量的提高，需要从以下几个方面做出进一步改进。

2.2.1 雷达数据质量控制技术完善

雷达数据质量控制(QC)在确保高质量降水融合产品方面发挥着关键作用。在天气研究中，非气象雷达回波包括生物杂波(即鸟类和昆虫)、对发射机的电磁干扰(如太阳闪光灯)、地面/海面杂波、异常传播以及来自箔条或其他非天气目标的回波，有不同的

判别算法可将非降水回波与天气信息分开, 并利用双偏振雷达数据, 基于水凝物和非水凝物返回的相关系数(ρ_{HV})的明显不同特征, 进一步对不同的水凝物进行分类。但是仍有很多细节信息会对QC算法产生影响。针对MRMS中的雷达QC算法, NOAA也提出进一步的改进, 包括: 1) 融化层划分; 2) 清除风电场污染; 3) 减轻硬件问题造成的损坏数据; 4) 减轻残留杂波和太阳峰值; 5) 减少由旁瓣效应和AP引起的地面、河流、湖泊杂波残留^[34]。也有研究针对雷达QPE本身, 展开更严格的质量控制, 通过更准确的雷达质量指数(RQI), 明确哪些QPE质量是不好的, 需要进一步订正的^[35]。

Husnoo^[36]等则另辟蹊径, 提出将神经网络算法用于英国天气雷达质量控制。该算法从最低层可用的扫描数据中选择数据用以优化两个其他雷达数据校正算法的组合性能: 地面杂波缓解和垂直剖面反射率校正。与目前所使用的QC算法相比, 该算法获得的QPE产品评估显示了优越的性能。

2.2.2 双偏振雷达 QPE 技术改进

对于双偏振量的研究MRMS一直都在进行中。相比于多普勒雷达(WSR-88D)生产的QPE, 双偏振雷达的QPE(DPR QPE)收到的异常传播杂波和生物散射的污染更少。DPR QPE基于反射率 Z , 微分反射率和特定微分相位在一些冻结水平升高的暖季事件中, 提供了更好的降水估算(平均偏差较小)。但其对的误差高度敏感, 具有相对较大的随机误差^[37]。DPR QPE在融化层附近也受到不连续和偏差的影响。使用特定衰减 A 的DP雷达QPEs对 Z 和校准误差的敏感性较低^[38-40]。此外, A 不受部分光束阻塞的影响^[39]。虽然具有类似的优点, 但的估计需要沿径向进行平滑, 这会导致空间分辨率的下降。相反, 与不同, A 在更广泛的降雨强度范围内以原始雷达分辨率提供降雨率估计, 在小雨中会产生噪音^[41]。之前的 $R(A)$ 研究仅限于单一雷达框架, 仅应用于雷达波束低于融化层(ML)的区域。此外, 这些研究主要集中在雷达附近广泛传播的大雨。为了使 $R(A)$ 能够用于跨越较大的国家雷达网络的操作环境中, 需要另外两个步骤: 1) 将 $R(A)$ 与其他雷QPE技术相结合, 并建立一个适用于任何地方的综合方案, 以及2) 评估所有雨情的 $R(A)$ 性能, 包括轻度和零星雨情, 并确定 $R(A)$ 和其他雷达QPE关系的最佳组合。

基于此, MRMS进行了广泛研究开发了一种无缝DP合成QPE。但仍需要进一步的改进: 1) 在非常小和零星的雨中, 衰减信号太弱, $R(Z)$ 可能提供比 $R(A)$ 更

好的估计, 可能应该用于代替 $R(A)$; 2) 在大范围的轻层状雨中, 当前默认的 α (0.035)可能太低(α 是一个通常随液滴尺寸分布和温度而变化的参数); 3) 对于数据样本为单一地区的混合地区, 可能需要对 $R(A)$ 进行局部调整以获得更准确的降水估计。

2.2.3 改进地形降水估计

复杂的地形与丰富的水分相互作用会导致复杂的微物理过程, 在非常小的空间和时间尺度上产生大量的局部降雨和山洪暴发。山区高分辨率和高精度定量降水估计(QPE)对于山洪和泥石流的监测和预测至关重要。然而, 由于复杂微物理过程中许多影响因素的非线性相互作用, 获得这种QPE一直是一个挑战。

2.3 多源降水融合技术的改进

众多的降水产品各有优劣, 将其融合集各家之长是如今多源降水融合发展的趋势。如何将卫星反演降水产品、雷达QPE产品、站点观测降水和模式降水有效且合理的组合在一起, 一直是研究的重点。

Steven等^[42]是以订正后的雷达QPE产品为主, 再以分别计算权重的方式, 将多源数据融合起来。因为以雷达QPE产品为主, 因此对该产品的质量要求也较高, 权重计算也根据地形、降水类型等做了详细的归类和说明。降雨/无雨误差是区域和全球降水产品不确定性的一个关键来源, 这些产品会离线传播到水文和地面模拟模拟中。因此Song等^[43]针对有雨/无雨降水表达准确度, 提出采用一种加权融合算法(CTC-M)实现三种相互独立、互不相关的降水产品的融合, 通过将各数据源降水数据转化为二进制数据再进行融合的方式, 进一步提高准确度。Shunji^[44]则根据降水评分来计算权重, 进而将基于外推的临近预报和数值天气预报产品相融合, 得到全球降水预报产品。作者认为在区域范围内通常采用空间均匀的权重, 而对于全球范围, 最佳权重在空间上或有不同, 进而引入了空间上局地的评分用以优化空间权重。以加权的方式同时融合多源降水资料也是当下使用较多的方式, 更多的区别在于如何合理计算权重。

国家气象信息中心引进美国NOAA和CPC的“概率密度函数(PDF)+最优插值(OI)”两步融合法实现了卫星资料与地面观测资料的融合, 之后引入贝叶斯模式平均方法, 加入了雷达资料, 实现了三源降水融合。

多源降水融合还有很多未解决的问题, 该项技术也有待进一步的改进和发展, 在未来, 是否有更多方法如同化方法等用于多源数据融合技术, 也需要更深入的研究。

3 总结与展望

IMERG、GSMaP和Q3产品基于先进的算法和技术，成为全球或区域高分辨率降水融合产品中的主流。IMERG产品具有较高的时空分辨率，且覆盖范围从60°N—60°S扩展到全球，在完善数据覆盖区域的同时也因为网格扭曲引入了误差，需要考虑更公平的网格迁移方案。此外，在地形降水方面，该产品也有待研究。GSMaP产品采用了较成熟的降水反演算法、雨量计观测调整算法等方法，且针对地形/非地形降水也有合理的分类方案。目前该产品的覆盖范围为60°N—60°S。MRMS的Q3产品是美国主流的区域高分辨率降水实况产品，完善的降水类型分类技术和各种降水率估算技术使其具有较高的产品质量，在对双偏振雷达数据的使用方面，一直是该产品不断改进和攻克的重点。

这些国际的主流多源融合降水产品各有优劣，其中的许多关键技术对于我国进一步发展自己的降水融合产品有重要的启示作用。第一，在卫星融合降水方面，信息中心基于CMORPH产品，采用基于红外冷云移动矢量的微波降水时空内插技术，实现了以时间位移长度为权重系数的多卫星集成。虽然已经有一定的研究基础，但是在红外和微波的反演技术方面，仍是空白，初始的卫星反演降水产品依然需要依赖美国、日本等最新产品。因此，在卫星反演降水方面，还需要从基础的反演算法入手，生产我国自己的卫星反演降水产品，摆脱对国外产品的依赖。第二，美国利用长序列雷达QPE数据进行平均场偏差订正，降低不同雷达间不一致性问题，并利用局地偏差订正技术解决由于波束阻挡、异常传播、零度层亮带等引起的局部偏差问题。但是目前，我国还没有时间上均一的长序列、全国组网的雷达QPE历史产品。对该产品的研制也需提上日程；对于雷达组网的困难和降水相态识别问题也可参考MRMS系统，一方面实现对雷达的更新换代，便于采用类似无缝混合扫描反射率生成技术这类方法实现雷达组网，另一方面逐步引入双偏振雷达，提高对降水相态识别的准确率。第三，对于山区降水，首先可以参考MRMS系统针对山区地形的坡度变化针对性计算QPE产品；其次可以借鉴GSMaP产品将山区降水与地形合理融合的关键技术；最后从科研角度，还可以引入模式数据，通过权重系数融合多种数据，缓解山区地区观测稀疏等带来的问题。

精细化的实况产品为智能网格预报业务提供了有力的实况数据支撑，同时还能反作用于上游的观测环节。实况分析站在总览全局的角度可以使“污染”观

测显露原形，从而帮助观测系统改善数据质量。多源融合的实况产品能够大大提升卫星、雷达观测数据的利用率，深入挖掘这些实时观测数据的价值，与常规观测相结合，得到连续的、高时空分辨率的实况产品数据。中国区域实况产品对捕捉以强对流天气为代表的小尺度灾害性天气动向意义重大，使公路交通气象预报、山洪地质灾害预警、基于位置天气实况查询等更加精准、更加可靠。天气实况是全球的刚需，目前CMORPH、MRMS等已经是公认的高质量降水实况产品。在中国区域，或者也将利用风云卫星等中国特色资料，针对中国的天气气候特征，在现有多源融合降水实况产品的基础上，制作出更高时效和分辨率的降水实况产品。

未来现代化气象业务的需求对降水产品的时效和分辨率要求越来越高，我国对高质量降水实况业务产品、灾害天气监测预警、高频次滚动更新的智能预报、智慧气象服务业务的需求也越来越紧迫，在积极解决上述问题的同时，也要开拓思维，并不局限与传统的融合方法，在借鉴国际先进技术和经验的基础上，可以尝试同化技术或神经网络等机器学习方法的研究与应用。

参考文献

- [1] 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验. 气象学报, 2015, 73(1): 177-186.
- [2] Tan J, Huffman G J, Bolvin D T, et al. IMERG V06: Changes to the morphing algorithm. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2019, 36: 2471-2482.
- [3] Seo D J, Breidenbach J, Johnson E. Real-time estimation of mean field bias in radar rainfall data. Journal of Hydrology, 1999, 223(3-4): 131-147.
- [4] Seo D J, Breidenbach J P. Real-time Correction of spatially nonuniform bias in radar rainfall data using rain gauge measurements. Journal of Hydrometeorology, 2002, 3(2): 93-111.
- [5] Seo D J. Real-time estimation of rainfall fields using rain gauge data under fractional coverage conditions. Journal of Hydrology, 1998, 208(1-2): 25-36.
- [6] Kondragunta C C, Seo D J. Toward integration of satellite precipitation estimates into the multi-sensor precipitation estimator algorithm//18th Conference on Hydrology. Seattle: Amer Meteor Soc, 2004.
- [7] Xie P P, Xiong A Y. A conceptual model for constructing high-resolution gauge-satellite merged precipitation analyses. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116 (D21): D21106.
- [8] 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 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, 2012, 70(6): 1381-1389.
- [9] 宇婧婧, 沈艳, 潘旸, 等. 基于地面观测降水订正卫星反演降水系统误差(PDF)方法在中国地区的应用. 应用气象学报, 2013, 24(5): 544-553.
- [10] Shen, Y, Zhao P, Pan Y, et al. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119: 3063-3075
- [11] 潘旸, 谷军霞, 宇婧婧, 等. 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, 2018, 76(5): 755-766.
- [12] Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. The version-2 Global

- Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4: 1147–1167.
- [13] Adler. Global Precipitation Climatology Project (GPCP) climate data record (CDR), version 2.3 (monthly). NCEP, 2016. <https://doi.org/10.7289/v56971m6>.
- [14] Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5: 487–503, [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005,0487:CAMTPG.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005,0487:CAMTPG.2.0.CO;2).
- [15] Climate Prediction Center. NOAA CPC morphing technique (CMORPH) global precipitation analyses. NCAR Computational and Information Systems Laboratory, 27 June 2019, 2011, <https://doi.org/10.5065/d6cz356w>.
- [16] Joyce R J, Xie P. Kalman filter–based CMORPH. *Journal of Hydrometeorology*, 2011, 12: 1547–1563. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-022.1>.
- [17] Romanov P, Gutman G, Csiszar I. Automated monitoring of snow cover over North America with multispectral satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39: 1866–1880. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039,1866:AMOSCO.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039,1866:AMOSCO.2.0.CO;2).
- [18] Ushio T. A Kalman filter approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2009, 87A: 137–151.
- [19] Derin Y, Kirstetter P, Gourley J J. Evaluation of IMERG satellite precipitation over the land-coast-ocean continuum. Part I: Detection. *Journal of Hydrometeorology*, 2021, 22: 2843–2859, [doi:10.1175/JHM-D-21-0058.1](https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0058.1).
- [20] Yamamoto M K, Shige S. Implementation of an orographic/nonorographic rainfall classification scheme in the GSMaP algorithm for microwave radiometers. *Atmospheric Research*, 2015, 163: 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.07.024>.
- [21] Yamamoto M K, Shige S, Yu C K, et al. Further improvement of the heavy orographic rainfall retrievals in the GSMaP algorithm for microwave radiometers. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, 56: 2607–2619. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0332.1>.
- [22] Liu G. A fast and accurate model for microwave radiance calculation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1998, 76: 335–343. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.76.2_335.
- [23] Seto S, Kubota T, Shige S. Production of the rain/no-rain classification database for GPM microwave radiometer observations over land. MSJ spring meeting 2016, D405, Tokyo, Japan, May 2016.
- [24] Mega T, Shige S. Improvements of rain/no-rain classification methods for microwave radiometer over coasts by dynamic surface-type classification. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, 33: 1257–1270. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0127.1>.
- [25] Kida S, Shige S, Manabe T, et al. Cloud liquid water path for the rain/no-rain classification method over ocean in the GSMaP algorithm. *Transaction JSASS Aerospace Tech Japan*, August, 2010.
- [26] Aonashi K, Ohwada H, Okamoto K, et al. Development of the next-generation microwave imager precipitation retrieval algorithm (No. 4). MSJ spring meeting 2016, C154, Tokyo, Japan, May 2016.
- [27] Shige S, Kida S, Ashiwake H, et al. Improvement of TMI rain retrievals in mountainous areas. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52: 242–254. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-074.1>.
- [28] Shige S, Yamamoto M K, Taniguchi A. Improvement of TMI rain retrieval over the Indian subcontinent. In V. Lakshmi. *Remote sensing of the terrestrial water cycle*. Geophysical Monograph, 2014, 206: 27–42.
- [29] Sims E M, Liu G. A parameterization of the probability of snow–rain transition. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16: 1466–1477. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0211.1>.
- [30] Liu G, Seo E K. Detecting snowfall over land by satellite high-frequency microwave observations: The lack of scattering signature and a statistical approach. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118: 1376–1387. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50172>.
- [31] Mega T, Ushio T, Matsuda T, et al. Gauge-adjusted Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP_Gauge). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2870199>.
- [32] Zhang J, Howard K, Langston C, et al. Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) quantitative precipitation estimation: Initial operating capabilities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(4): 621–638.
- [33] Schaake J, Henkel A, Cong S. Application of PRISM climatologies for hydrologic modeling and forecasting in the western U.S. Preprints. 18th Conf on Hydrology, American Meteorological Society, 2004.
- [34] Tang L, Zhang J, Simpson M, et al. Updates on the radar data quality control in the MRMS quantitative precipitation estimation system. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2020, 37: 1521–1537. [doi:10.1175/JTECH-D-19-0165.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0165.1).
- [35] Martinaitis S M, Osborne A P, Simpson M J, et al. A physically based multisensor quantitative precipitation estimation approach for gap-filling radar coverage. *Journal of Hydrometeorology*, 2020, 21, 1485–1511.
- [36] Husnoo N, Darlington T, Torres S, et al. A Neural-Network Quality Control scheme for improved Quantitative Precipitation Estimation accuracy on the UK weather radar network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2021, [doi:10.1175/JTECH-D-20-0120.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0120.1).
- [37] Cocks S B, Zhang J, Martinaitis S, et al. MRMS QPE performance east of the Rockies during the 2014 warm season. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18: 761–775. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0179.1>.
- [38] Wang Y, Cocks S, Tang L, et al. A prototype quantitative precipitation estimation algorithm for operational S-band polarimetric radar utilizing specific attenuation and specific differential phase. Part I: Algorithm description. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20: 985–997. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0071.1>.
- [39] Cocks S B. A prototype quantitative precipitation estimation algorithm for operational S-Band polarimetric radar utilizing specific attenuation and specific differential phase. Part II: Performance verification and case study analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20: 999–1014. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0070.1>.
- [40] Ryzhkov A V, Zrníc D. *Radar Polarimetry for Weather Observations*. Springer, 2019.
- [41] Ryzhkov Z, Diederich M, Zhang P, et al. Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31: 599–619.
- [42] Martinaitis S M, Osborne A P, Simpson M J, et al. A Physically Based Multisensor Quantitative Precipitation Estimation Approach for Gap-Filling Radar Coverage. *Journal of Hydrometeorology*, 2021, 21(11): 1485–1511.
- [43] Song J J, Melissa I, Shin K, et al. Estimation of Precipitation Area Using S-Band Dual-Polarization Radar Measurements. *Remote Sensing*, 2021, 13(11): 2039, 2072–4292.
- [44] Kotsuki S, Kurosawa K, Otsuka S, et al. Global precipitation forecasts by merging extrapolation-based nowcast and numerical weather prediction with locally optimized weights. *Weather and Forecasting*, 2019, 34(3): 701–714.