

多源降水数据融合研究及应用进展

潘阳 谷军霞 徐宾 沈艳 韩帅 师春香

(国家气象信息中心, 北京 100081)

摘要: 融合降水产品结合了不同来源降水资料的优势, 在天气气候监测、气候变化研究、模式检验及水文预报领域得到了广泛应用。介绍了适用于不同需求的国际主流融合降水产品, 从产品应用的角度介绍了融合技术发展。重点介绍了国家气象信息中心在降水数据融合方面取得的一些研究进展。如基于“PDF(概率密度函数)+BMA(贝叶斯模式平均)+OI(最优插值)”和降尺度技术研制的高分辨率的地面-雷达-卫星三源降水融合产品, 采用红外冷云外推技术研制的东亚多卫星集成降水(EMSIP)产品, 采用多重网格三维变分(STMAS)方法制作的1 km陆面数据同化分析系统(HRCLDASv1.0)的降水驱动, 以及引进美国CFSR/Land降水驱动融合技术研制的全球融合降水产品等。其中, 基于中国多源降水融合分析业务化系统(CMPAS-Hourly V2.1)的高分辨率三源融合降水产品在智能网格预报、GPAPES检验评估等业务中发挥积极作用。计划未来还将在融合算法优化、分钟级降水产品研发、机器学习新方法应用等方面开展研究工作。

关键词: 降水产品, 偏差订正, 融合技术, 研究进展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.019

Advances in Multi-Source Precipitation Merging Research

Pan Yang, Gu Junxia, Xu Bin, Shen Yan, Han Shuai, Shi Chunxiang

(National Meteorological Information Center, Beijing 100081)

Abstract: The multi-source precipitation products take the advantages of every single source precipitation data, and they have been applied in many respects such as weather and climate monitoring, climate change research, model evaluation, and hydrological prediction. For those applications, there are many prevailing products. CMA/NMIC also developed many multi-source precipitation merging techniques and products, such as the high resolution radar-satellite-gauge merged precipitations based on the “PDF (Probability Density Function) + BMA (Bayesian Model Averaging) + OI (Optimal Interpolation)” and downscaling technique, the East-Asia multi-satellite integrated precipitation (EMSIP) using IR moving vector extrapolating technique, the hourly/0.01° merged forcing data for the high-resolution CMA land data assimilation system (HRCLDASv1.0) using STMAS (Space Time Multiscale Analysis System) technique, and a global merged precipitation based on the advanced satellite-retrial precipitation and merging algorithm, in research of CRA-Land reanalysis. At present, the operational CMA multi-source precipitation analysis system (CMPAS-Hourly V2.1) was constructed to produce the real-time high-resolution and high-quality merged precipitation, and well applied in GRAPES model evaluation. In future, the merging algorithm optimization, the minute precipitation products development, and ML (Machine Learning) technique application will be conducted.

Keywords: precipitation product, bias correction, merging technique, research advances

0 引言

降水的潜热释放是大气最主要的能量来源^[1], 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, 降水的极端天气及气候事件(洪涝、干旱)对人类生产和生活造成重要

影响。降水落至陆地, 一方面会引起土壤湿度变化, 从而引起土壤热容量、热传导和热扩散变化, 这些变量控制着不同土壤层间的热量传输过程, 进而影响土壤温度和近地层的气温, 最终对陆气间能量和水的交换产生影响。另一方面, 落至陆表的降水会通过蒸发、下渗和径流回到水循环中, 对陆表水循环产生重要影响^[2]。另外, 在运用数值模式模拟和预测天气及气候系统变化时, 亦需要高质量的降水观测产品来做比对和检验。因此, 降水的时空分布对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

收稿日期: 2017年6月30日; 修回日期: 2017年12月16日

第一作者: 潘阳(1980—), Email: pany@cma.gov.cn

资助信息: 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

和预报都至关重要。

获取降水观测信息的途径主要有三种：地面雨量计、地基雷达和卫星遥感探测信息。一方面，地面雨量计和地基雷达的降水资料相对准确，但其空间分布不均匀，适合观测局地区域性的降水，很难获得较准确的大区域或全球的降水信息。另一方面，卫星遥感可进行大范围空间连续的探测，对某些特定目标区的观测时间分辨率也很高，但是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较低。由于缺乏时空连续覆盖广泛的综合观测系统，要得到长期的精准的高分辨率的全球降水分布非常困难，数值模式输出的降水产品可以弥补观测系统时空不连续造成的问题，但模式降水本身亦存在严重的系统偏差。综上所述，基于单一来源的降水资料都各有利弊，如何有效结合不同来源降水资料的优势，发展多源降水融合技术，成为近年来国际上在高质量降水产品研发中的主流趋势。

本文介绍了国内外主流的降水融合技术和产品的发展与现状，重点阐述了国家气象信息中心在降水融合领域的研究进展和成果，并探讨了融合降水产品中存在的问题以及未来的工作计划和展望。

1 降水融合的发展现状

1.1 卫星反演降水及融合技术的发展

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^[1, 3]，适用于对流性降水为主的区域，相对精度在30%~300%^[4]。而极轨卫星探测的是大气中降水粒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^[5-6]。但微波降水对海陆下垫面较敏感，且受极轨卫星过境次数和轨道的限制，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。早期研发的融合产品主要有美国气候预测中心融合分析降水（CMAP）、全球降水气候计划（GPCP）产品等（表1），融合思路是：先用地面观测对各种红外、微波降水估计产品进行偏差订正，再依据不同资料的误差采用泊松松弛法^[3, 7]、误差反比加权^[8]等方法整合在一起。这类降水产品虽然只有逐月（候）/2.5°的分辨率，但资料时间覆盖从1979年至今，一定程度上满足了降水季节性、年际和年代际变化等气候方面的研究和应用。

表1 全球主要的降水融合产品列表
Table 1 List of global merged precipitation products

产品名称	来源	时间分辨率	空间分辨率	区域覆盖	起始时间	输入数据
CMAP	US/NOAA/NWS CPC	月	2.5°	全球	1979年至今	OPI/SSMI/SSMIS/GPI/MSU/雨量计/模式
	US/NOAA/NWS CPC	候	2.5°	全球	1979年至今	OPI/SSMI/GPI/MSU/雨量计/模式
	US/NOAA/NWS CPC	候	2.5°	全球	2000年至今	OPI/SSMI/GPI/雨量计
GPCP (v2.2)	US/NASA/GFSC	月	2.5°	全球	1979年至今	OPI/SSMI/GPI/MSU/雨量计
GPCP pentad (v1.1)	US/NOAA/NWS CPC	候	2.5°	全球	1979年至今	OPI/SSMI/GPI/MSU/雨量计/GPCP月值
GPCP_1DD (v1.2)	US/NASA/GFSC	日	1°	50°N—50°S	1997年至今	SSMI-&SSMIS- TMI(IR)/TOVS/AIRS/GPCP月值
TRMM_3B43 (v7)	US/NASA/GFSC PPS	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
TRMM_3B42 (v7)	US/NASA/GFSC PPS	3 h	0.25°	50°N—50°S	1998年至今	TCI/TMI/SSMI/SSMIS/AMSR-E/AMSU/MHS/MW-VAR (IR) /v73B43
CMORPH Bias-corrected (v1.0)	US/NOAA/CPC	3 h	0.25°	50°N—50°S	1998—2015年	IR: GOES/Meteosat/ GMS; PMW: AMSU-B/ SSMI/TMI; 雨量计
CMORPH Blended (v1.0)	US/NOAA/CPC	日	0.25°	50°N—50°S	1998—2015年	IR: GOES/Meteosat/ GMS; PMW: AMSU-B/ SSMI/TMI; 雨量计
GSMaP-MVK	JP/JMA	1 h	0.1°	60°N—60°S	2000年至今	IR: GOES/Meteosat/ GMS; PMW: AMSU-B/ SSMI/TMI; 雨量计
MSWEP	EC/JRC	3 h	0.25°	全球	1979—2015年	GPCC, CPCU, JRA-55, ERA-Interim, CMORPH, PERSIANN, TRMM3B42

20世纪90年代末，热带降雨测量任务（TRMM）卫星上搭载了专门监测降水的主动式微波传感器（PR），能够获得海洋和陆地上空降水的三维结构，消除了下垫面的影响，其反演精度达到地基雷达的水

平，因此TRMM的微波辐射计（TMI）和PR常被用来评价和校正其他卫星反演降水数据。此时，针对高时空分辨率卫星集成产品的研制算法有了进一步发展，代表性的有两类：一类是美国国家环境预报中心

(NCEP) 采用的TRMM多卫星降水分析 (TMPA) 算法^[8], 它先利用TMI降水校正多颗极轨卫星的PMW降水, 再用订正后PMW降水与静止卫星IR观测的匹配样本建立基于红外亮温的降水反演系数; 另一类是美国国家海洋大气局 (NOAA) 气候预测中心 (CPC) 的Morphing (CMORPH) 技术^[9], 它利用IR数据来计算云的移动矢量, 依此对PMW降水进行向前向后的外推插值, 得到全球30 min/8 km的CMORPH降水产品 (表1)。近年来, 鉴于CMORPH在微波降水较少时精度下降的不足, Joyce等^[10]研发了基于卡尔曼滤波 (KF) 的新一代CMORPH算法, 充分发挥了红外反演降水的作用。日本气象厅 (JMA) 也采用了与新一代CMORPH类似的技术^[11], 制作了逐小时/0.1°时空分辨率的全球降水图 (GSMaP) (表1)。这些高分辨率的卫星降水资料虽然时序列多从1998年开始, 但对全球范围的强降水天气监测、极端天气和降水日变化研究提供了数据支撑。

单纯的卫星反演降水资料存在很大的系统性偏差和随机误差, 经过地面观测资料订正后, 其精度可以大幅提高, 从而大大提升卫星资料的应用潜力^[12]。早期用于订正卫星的地面观测多采用月值降水数据, 例如GPCP、CMAP、GPCP-1DD (GPCP 1 degree daily)、TMPA等降水产品均采用德国气象局全球降水气候中心 (GPCC) 研制的地面雨量计月值降水数据进行比例偏差订正 (表1)。近年来, NOAA/CPC研制了逐日/0.5°的全球陆地日值降水格点分析场 (CPCU), CPC利用此数据集采用“概率密度 (PDF, Probability Density Function) 匹配法+最优插值 (OI, Optimal Interpolation)”的两步融合法研制了逐日/0.25°的CMORPH Blended产品, 这为高时空分辨率卫星资料的偏差订正和融合开阔了思路。

总的来说, 这些卫星反演及融合降水产品虽然应用广泛, 但还是存在卫星反演降水技术带来的固有缺陷, 如: 固态降水的辨识、复杂地形的影响等, 仍需要不断地完善和改进。近年来, 针对TRMM降水雷达时空分辨率不够、对小雨和强降水观测不敏感的问题, 美国国家航空航天局 (NASA) 和日本宇宙航空开发机构 (JAXA) 合作开展了全球降水观测计划合作项目 (GPM)。2014年2月发射的GPM卫星所搭载的双频降雨雷达 (DPR) 和GPM微波成像仪 (GMI) 能够识别固态降水和微量降水, 有望提高全球范围降水观测的质量。

1.2 雷达 QPE 产品中的多源数据融合

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)。由于Z-R关系不确定、地形遮挡、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进行校准。目前, 美国NOAA国家强风暴实验室 (NSSL) 研发的Stage IV系统和国家气象局 (NWS) 水文发展办公室 (OHD) 研发的多雷达多遥感 (MRMS) 分析系统是发展最为成熟和应用最广泛的业务化系统。

其中, Stage IV基于混合体扫的雷达估测基数据, 采用业务员选择的Z-R关系 (包括对流、热带气旋、夏季层云降水、美国大陆东部冬季层云降水和西部冷季降水五种可选类型)^[13]生成1 h/4 km高分辨率的数字化降水阵列 (DPA, Digital Precipitation Array) 数据, 结合地球静止业务环境卫星 (GOES) 红外降水估计数据, 和来自NWS的水文气象自动数据系统 (HADS) 和NOAA的气象同化数据获取系统 (MADIS) 系统的雨量计观测数据, 再经过一系列多遥感降水估计 (MPE) 技术应用套件, 生成相应的MPE降水产品^[14] (图1)。其中的卫星多传感融合产品还涉及了卫星、雷达、地面三源降水的融合技术的应用^[15]。而MRMS系统的特色是高分辨率、高时效, 其实时发布的雷达QPE产品的空间分辨率为1 km, 能达到每2 min更新, 包括瞬时降水率、小时累积降水量以及误差等, 该系统的输入数据源除了雷达基数据和用于对雷达反演降水进行局地偏差订正的约10000个HADS雨量计小时降水数据外, 还用到了NOAA/NCEP的快速更新模式 (RAP) 输出的地表温度、3D温度、湿球温度、结冰层高度等环境变量进行降水类型的判断, 还采用了山地制图 (Mountain Mapper) 技术, 利用基于坡面回归模型 (PRISM) 的降水气候月值产品进行山区降水产品的制作等^[16-17]。这两套系统中所应用的地面、雷达观测资料的质量控制以及多源降水融合等技术, 对于我国高时空分辨率融合降水产品的研制具有重要借鉴意义。

1.3 多源降水产品及融合在陆面模拟中的应用

全球长期的降水数据对研究陆表水和能量收支非常重要, 陆面模拟的空间性差异非常大, 日尺度以下的降水频率变化对陆表的蒸发和径流都产生影响^[18-19], 因此陆面模拟和再分析对降水驱动的时空分辨率要求较高。再分析 (模式) 降水产品的优势是资料时空连续、一致性好、分辨率相对较高, 缺点是误差大, 单以此作为陆面过程的驱动会逐步影响蒸发、径流和土壤湿度, 形成“气候漂移”^[20-21], 融合观测降水信息进行订正是消除“气候偏移”

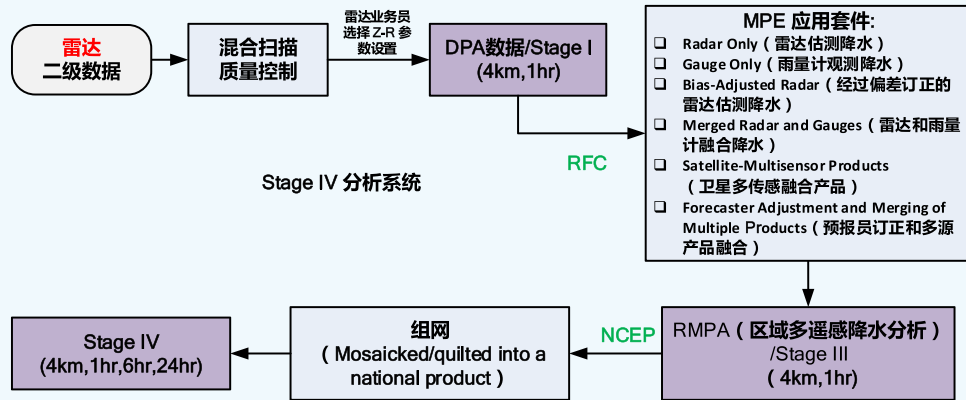


图1 Stage IV系统流程图
Fig. 1 Flow chart of Stage IV system

的有效途径。如美国NASA的新一代研究与应用回溯分析系统(MERRA)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的中期再分析系统(ERA-Interim)等陆面再分析(MERRA/Land、ERA-Interim/Land)的降水驱动,多采用了GPCP、CMAP等候值/月值卫星降水产品对模式降水进行偏差订正的思路。随着较高分辨率的地面观测降水产品(如CPCU)的出现,美国NCEP的气候预测系统再分析(CFSR)的陆面再分析(CFSR/Land)的降水驱动设计了动力降尺度和线性加权融合相结合的方法^[22]:先采用高分辨率的全球数据同化系统(GDAS)模式降水对质量较好但分辨率较低的CMAP、CPCU资料进行时空分解,再采用与纬度分布有关的线性加权平均的方法融合CMAP、CPCU和GDAS降水,充分发挥卫星、雨量计和模式降水分别在赤道、中纬度、高纬度等陆地区域的优势,尤其是在美国本土、欧洲、澳大利亚等雨量计密集地区给予了雨量计分析场最大的权重,使得降水驱动的精度明显提高。近期,MERRA第二代(MERRA2)的观测订正降水也采用了与CFSR/Land降水驱动类似的思路,明显改进了水循环的模拟^[23]。另外,欧盟联合研究中心(EU/JRC)研制了一套1979—2015年逐3 h/0.25°分辨率的多源集合权重降水(MSWEP)产品,不仅考虑了气候上地形和风效应的低估,还融合了CMORPH、TRMA 3B42、GsMAP-MVK、ERA-Interim、日本气象厅55年再分析(JRA-55)、CPCU、GPCC等更多源、多尺度的降水数据,有效提高了水文模拟的精度^[24]。

2 国家气象信息中心降水融合技术和产品的发展

2.1 降水二源融合到三源融合的发展

国内降水融合的产品多集中在满足气象业务对区域高分辨率降水产品的需求上,且多是模式预报或卫

星与地面自动站观测的融合。早期产品分辨率多在逐小时/5~10 km,例如:国家卫星气象中心研制的风云(FY)系列卫星降水产品^[25]、气象中的降水实况分析产品、信息中心的地面与FY(或CMORPH)二元融合产品等。近年来,随着气象预报和服务业务对降水实况产品分辨率需求和精度的提高,气象公共服务中心采用信任传播模型算法制作了10 min葵花8卫星和地面融合的快速降水格点实况产品,国家气象信息中心则引入气象探测中心的1 km雷达降水研制了质量较高的地面-雷达-卫星三源融合降水产品。

国家气象信息中心在降水融合方面的研究起步相对较早,2010年引进美国CPC研制的“PDF+OI”两步融合法^[26]研制了中国区域逐小时、0.1°的地面和卫星二源融合降水产品^[27-29]。其融合思路是:先采用PDF匹配法订正卫星降水的非独立性系统误差,再采用OI技术融入地面观测信息。对原来适用于逐日、0.25°的方案做了两点改进:其一,根据逐小时降水误差存在日变化和零值样本偏多的概率分布特征,调整了PDF的时空样本匹配窗口和选取策略,有效降低了由PDF曲线不稳定造成“过度订正”的大值出现的概率^[30]。其二,在逐小时、0.1°上进行样本统计,拟合误差及误差空间相关的变化曲线(图2),误差估计更加准确^[30]。新方案有效提高了融合降水的量值,特别是对强降水的把握能力。

2014年,为了进一步提高产品空间分辨率而不降低精度,国家气象信息中心在二源融合技术的基础上,引入雷达降水高分辨的空间结构信息,发展了三源融合的思路:先采用PDF技术订正雷达和卫星降水的系统误差,再采用BMA方法融合雷达和卫星降水形成最优初始场,最后采用OI融入地面观测。在PDF匹配订正时,根据0.05°雷达降水偏差局地性强的特征对

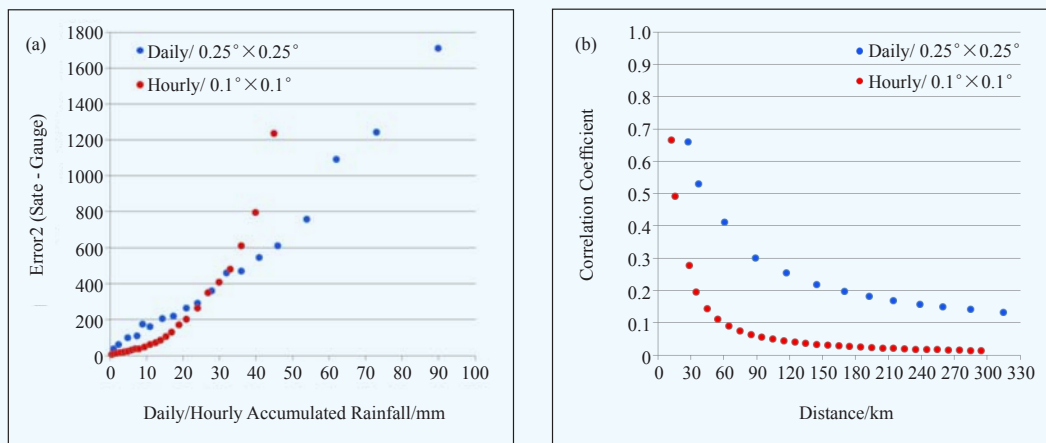


图2 不同时空分辨率上背景场误差的统计关系：(a) 均方误差与累积降水量值；(b) 网格上任意两点的误差相关系数与距离
Fig. 2 The statistic relation of first guess error at different temporal-spatial resolution: (a) Error2 vs. accumulated rainfall; (b) correlation coefficient vs. distance

样本时空匹配窗口做了适当调整^[30]。在联合雷达和卫星降水时，采用了贝叶斯模式平均（BMA, Bayesian Model Averaging）方法，其特点是：各种资料的误差是根据不同时空窗口的样本动态计算的，不同时刻不同区域内资料分配的权重是不同的，使得权重的分配在局地范围内更准确。在应用OI方法融合地面观测时，背景场由单一来源的卫星降水替换成了雷达卫星

联合降水，并在0.05°分辨率上重新定义了地面观测和背景场的误差。最终的三源融合降水在中国区域覆盖完整，保留了雷达高分辨率的降水特征，量值与地面观测降水接近（图3），经过2380个国家自动站的独立样本检验（表2），结果表明：三源融合降水的精度优于任何单一来源的降水产品，同时也要优于原来的二源融合降水产品。

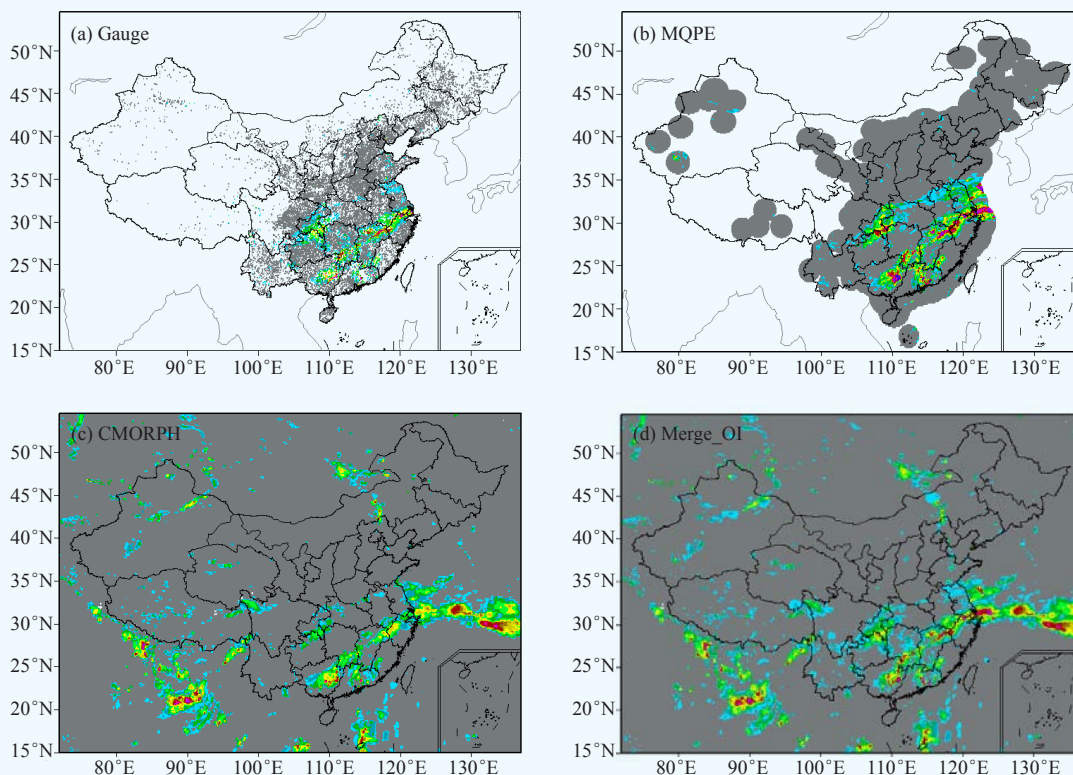


图3 2014年6月21日01时（UTC）5 km分辨率上不同降水产品的降水空间分布（mm/h）：(a) Gauge, 地面观测；(b) MQPE, 探测中心雷达QPE产品；(c) CMORPH, CMORPH卫星降水产品；(d) Merge_OI, 三源融合降水
Fig. 3 Precipitation distribution of different products on 5km resolution at 01UTC 21 Jun, 2014: (a) Gauge, from gauge; (b) MQPE, Radar QPE; (c) CMORPH, satellite retrieved products; (d) Merge_OI, gauge-radar-satellite merged precipitation

表2 不同类型降水产品的误差 (2015年5—10月2380站独立样本检验)

Table 2 The statistical errors of different precipitation products (Based on independent validation samples for May–October in 2015)

降水产品	统计量	CC	RMSE (mm/h)	Bias (mm/h)	Mean Prec (mm/h)
地面插值		0.788	0.806	-0.0156	0.1590
雷达估测降水		0.563	1.087	-0.0426	0.1318
CMORPH		0.438	1.237	-0.0199	0.1547
三源融合		0.813	0.763	-0.0086	0.1656

2016年, 为满足气象服务对降水产品更高分辨率的需求, 国家气象信息中心在5 km三源融合技术的

基础上又发展了“PDF+BMA+DS+OI”1 km三源融合技术方案: 利用雷达1 km的空间结构信息, 对5 km上经过PDF系统偏差订正和BMA融合的雷达-卫星联合降水进行空间降尺度(DS, Downscaling), 得到一个既含有1 km高分辨的信息又保证5 km上无偏的背景场, 然后采用OI融入观测信息。该方法在满足业务产品时效的基础上优化背景场, 最终达到了1 km三源融合产品的精度优于单一来源降水产品的融合效果(图4和图5), 并且在强降水的监测上1 km要优于5 km的三源融合产品(图6), 更加适用于强天气的监测和模式预报检验。

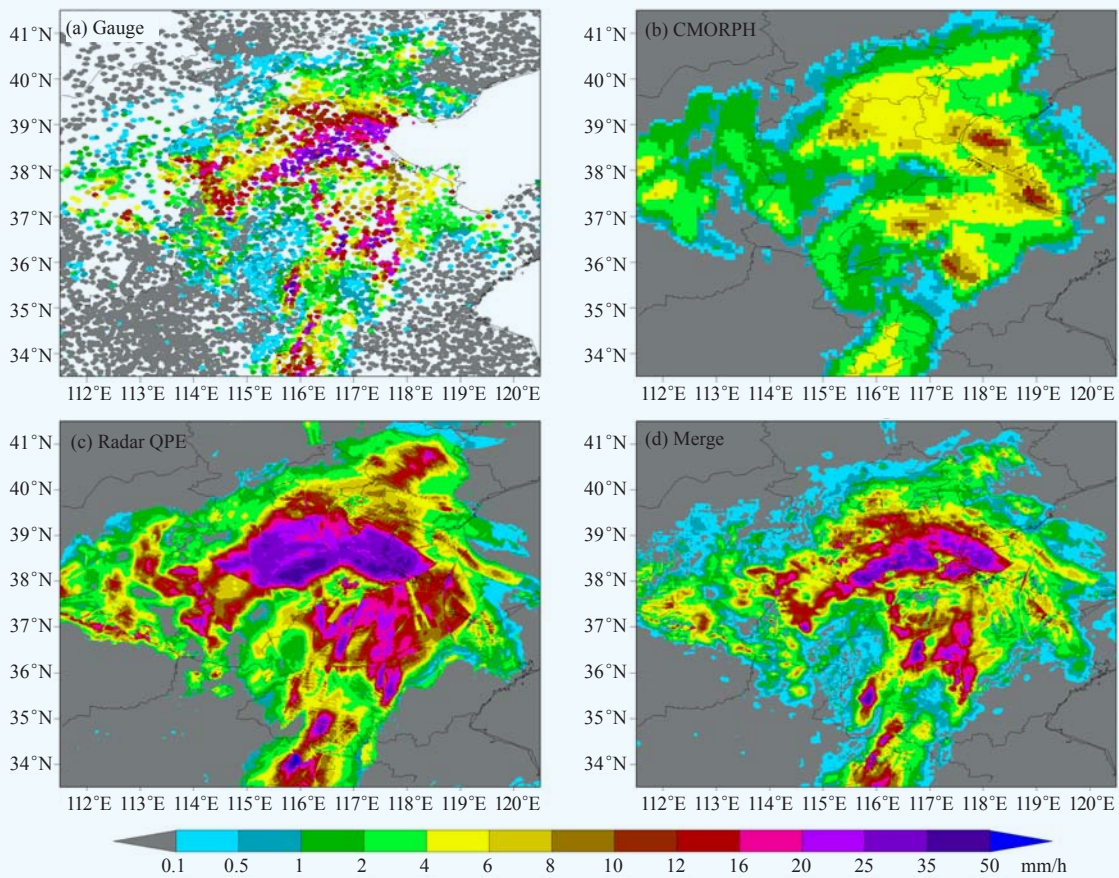


图4 2016年7月19日22时(UTC)1 km分辨率上降水量(mm/h)的空间分布: (a) Gauge, 地面观测; (b); CMORPH, 卫星反演降水 (c) Radar QPE, 雷达估测降水; (d) Merge, 三源融合降水

Fig. 4 Precipitation distribution of different products on 1 km resolution at 22UTC 19 July 2016: (a) Gauge, from gauge; MQPE, (b) CMORPH, satellite retrieved products; (c) Radar QPE; (d) Merge, gauge–radar–satellite merged precipitation.

2.2 多源降水融合系统建设

为了满足多种气象预报、监测及公众服务等实时业务的需求, 国家气象信息中心非常注重及时将融合技术的研究成果转向业务应用。2011年11月基于改进的“PDF+OI”技术研制的中国区域地面自动站与卫星反演降水产品融合系统1.0版本(CMPA_Hourly

V1.0)投入业务试运行, 实时发布1 h、10 km分辨率的地面、卫星二源降水融合产品。2015年7月, 基于“PDF+BMA+OI”方法研制的中国区域地面自动站、卫星、雷达三源降水融合系统(CMPA_Hourly V2.0)投入实时运行, 通过中国气象数据网、国家气象数据内网和中国气象局卫星广播系统(CMACast)实时发

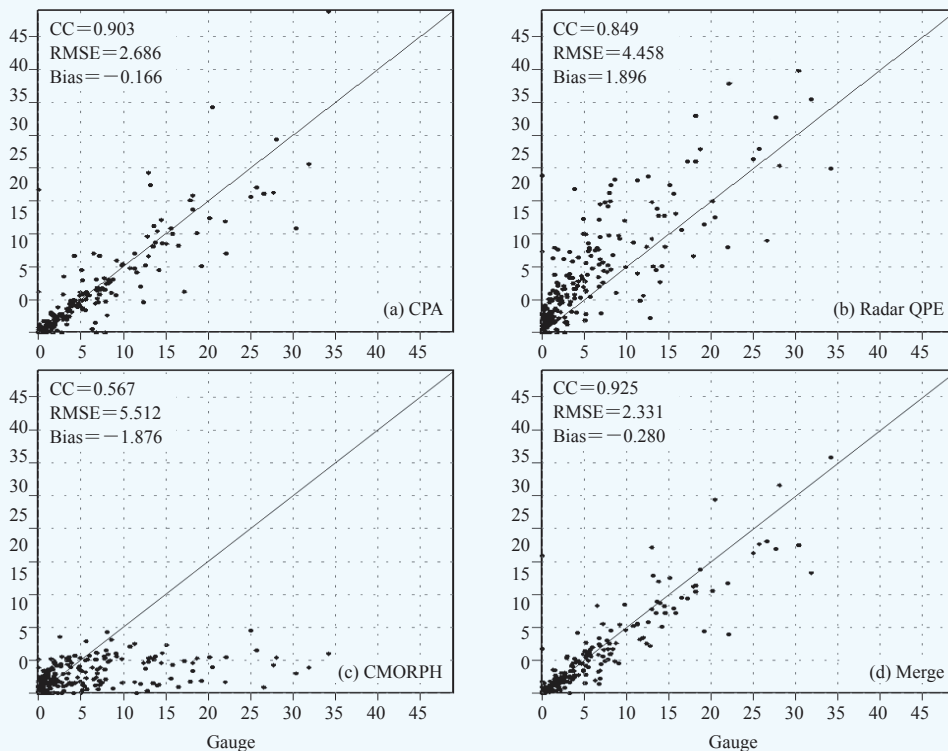


图5 2016年7月19日22时 (UTC) 华北区域 (110.5°—120.5°E, 33.5°—41.5°N) 内检验站降水量 (mm/h) 的散点分布: Gauge, 地面观测; (a) CPA, 地面插值降水产品; (b) Radar QPE, 雷达估测降水; (c) CMORPH, 卫星反演降水; (d) Merge, 1 km三源融合降水

Fig. 5 The scatter chart of different precipitation products vs. Gauged precipitation at 22UTC 19 July 2016 over area of 110.5°–120.5°E, 33.5°–41.5°N : (a) CPA, grid analysis from gauge; MQPE, (b) Radar QPE; (c) CMORPH, satellite retrieved products; (d) Merge, gauge–radar–satellite merged precipitation at 1 km grids.

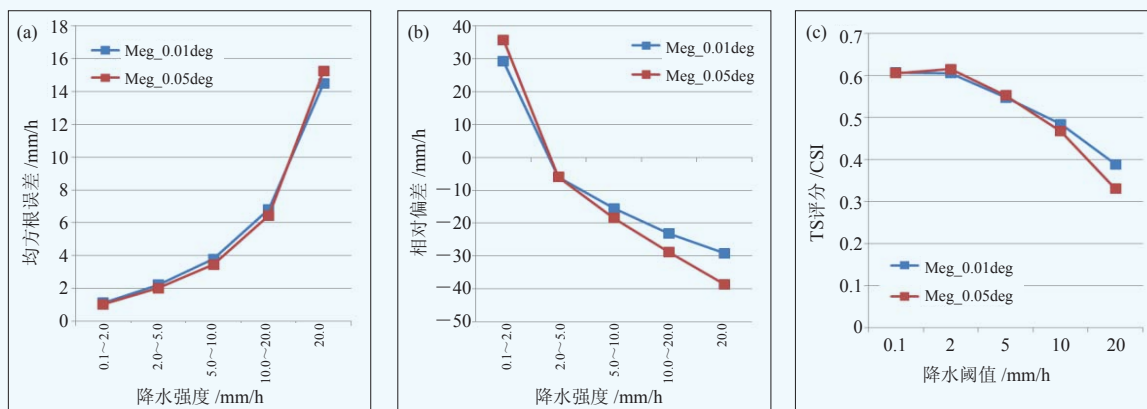


图6 不同降水强度下1 km (Meg_0.01 deg) 和5 km (Meg_0.05 deg) 融合产品的 (a) 均方根误差、 (b) 相对偏差和 (c) TS评分 (2016年6—8月独立样本统计)

Fig. 6 (a) RMSE, (b) relative Bias, and (c) TS scores of merged products with intensity of rainfall at 1 km (Meg_0.01 deg) and 5 km (Meg_0.05 deg) grids (Based on independent validation samples for Jun–Aug in 2016)

布1 h、5 km分辨率且质量更高的地面、卫星、雷达三源降水融合产品。2016年12月, CMPA-Hourly V2.0升级成中国多源降水融合系统2.1版本 (CMPAS-Hourly V2.1), 进入业务试运行, 产品分辨率由5 km提高到1 km。

CMPAS-Hourly V2.1系统包括数据获取、数据预

处理、融合、产品生成、产品评估、产品分发、系统监视、数据管理、运行调度9个部分 (图7), 可以按照产品生成时效需求依次推出5 km和1 km的多种降水融合的数据和图形产品, 以及实时的质量评估结果, 各种降水产品的整体质量随滞后时间而逐步提高, 最快速的地面和雷达二源融合产品时效是整点滞后

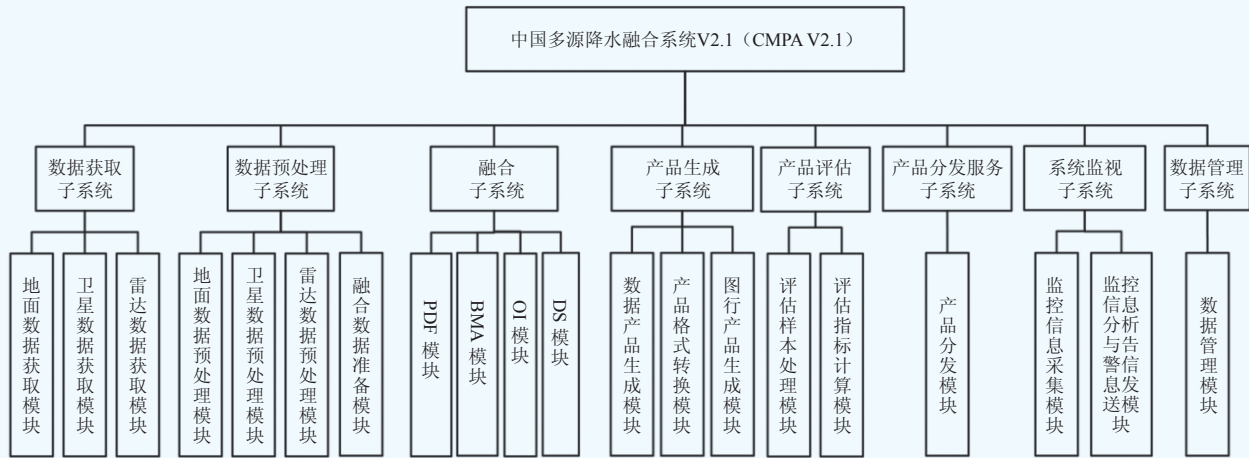


图7 CMPAS-Hourly V2.1业务系统架构
Fig. 7 Flow chart of CMPAS-Hourly V2.1 system

12 min, 而质量较高5 km三源融合产品滞后45 min, 1 km的三源融合产品则滞后55 min。目前, CMPAS系统的三源融合降水产品在智能网格预报、气象灾害预警业务监测及产品检验、GPAPES检验评估等业务中发挥积极作用。

2.3 其他融合降水产品的研制与应用

基于地面自动站、CMORPH卫星、雷达QPE等数据生成的二源、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:

第一, CMORPH没有用到FY3的微波降水资料, 限制了卫星集成降水产品在中国地区质量的提高。国家气象信息中心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, 研制了东亚多卫星集成降水(EMSIP)产品^[31-32]。与类似的CMORPH、GsMAP产品相比, EMSIP有效改进了中国地区降水日变化的特征(图8), 还能防止CMORPH“断供”, 为二源和三源融合产品提供较高质量的卫星输入源。

第二, 雷达QPE产品还存在雷达放射状波束结

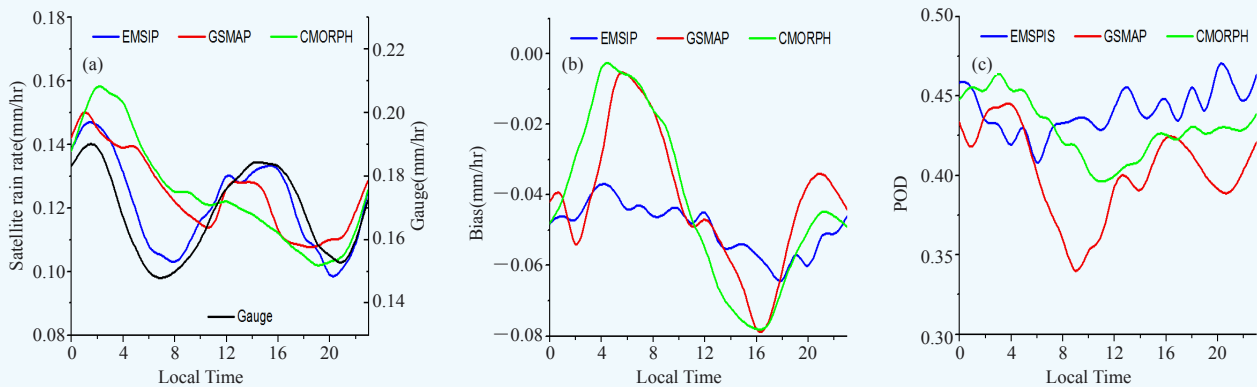


图8 2012年6月—2013年8月EMSIP、GSMaP、CMORPH与地面观测降水的 (a) 降水量日变化, 以及三个卫星产品的 (b) 偏差和 (c) 命中率的日变化

Fig. 8 The diurnal cycles of three satellite retrieved products, EMSIP, GSMaP, CMORPH, and observations: (a) for precipitation, (b) for bias, (c) for detected probability (Based on the samples for July 2012 – August 2013)

构, 以及不同部雷达的系统偏差拼接后造成降水空间结构的不连续等质量问题, 会带入三源融合降水产品中。若以此作为驱动数据, 这种偏差会在土壤湿度中随时间不断累积放大。因此国家气象信息中心专门针对1 km陆面数据同化分析系统(HRCLDASv1.0),

采用多重网格三维变分(STMAS)方法^[33-34]研制了一套1 km分辨率的EMSIP卫星和地面二源融合降水驱动数据, 详细内容可参考“CMA高分辨率陆面数据同化系统(HRCLDAS-V1.0)研发及进展”一文^[35]。

第三, 国内发展的适用于陆面气候模拟的融

合降水产品较少，例如：国家气象信息中心采用“PDF+OI”技术研制的1998年以来逐日/0.25°中国区域卫星、地面融合降水产品^[36]，国家气候中心采用HL-OI方法研制的2003年以来逐日/1°中国和全球区域模式、卫星和地面三源融合降水数据^[37-38]等，但无论是资料时空覆盖范围还是时空分辨率都有待提高。2015年，“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”创新攻关任务要求研制1979年以来逐3 h、25 km分辨率的全球融合降水产品，以满足中国气象局再分析（CRA-40/Land）降水驱动的需要。信息中心在引

进美国CFSR/Land降水驱动融合技术的基础上，采用GPCPv2.2月值降水进行气候态的偏差订正，并融合中国区域高质量的地面观测格点分析资料，以改进全球降水在中国地区的质量。目前，已完成了全球降水融合原型系统和1979—2016年的试验产品（CMPAS-global）制作。初步评估表明，与CFSR/Land融合降水驱动数据相比，CMPAS-global产品与GPCPv2.3的气候态偏差明显减小（图9），在中国地区的质量也明显提高，整体质量更优。

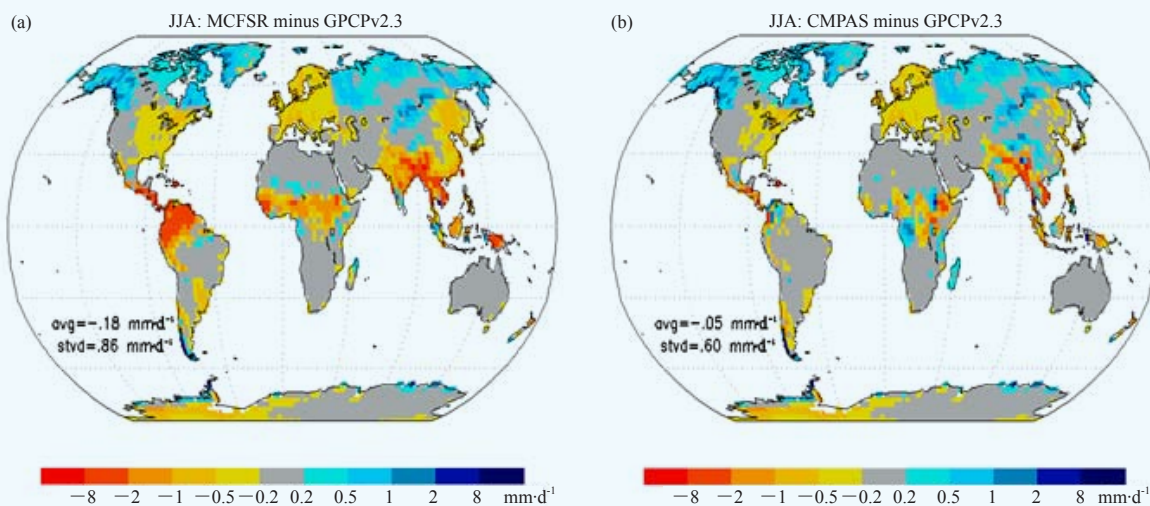


图9 不同降水产品与GPCPv2.3的北半球夏季（JJA）气候态（1980—2010年）的差异：（a）CFSR融合降水驱动数据（MCFSR）；（b）CMPAS-global产品（CMPAS）

Fig. 9 Climatological difference between GPCPv2.3 and (a) CFSR/Land Merged precipitation forcing(MCFSR), (b) CMPAS-global(CMPAS) for Northern Hemispheric summer (JJA)

3 总结与展望

中国的多源降水融合产品的研发始终紧密面向气象业务发展的需求，从引进国际先进融合技术到吸收创新，产品分辨率和精度不断提高，范围从中国逐步拓展到全球，时间序列也从实时逐渐向历史延伸，为智能网格预报业务提供了高质量的降水实况分析产品，满足了陆面模拟、干旱监测和气候分析的需求。但仍有一些尚未解决的问题，需要在今后的工作中考虑：加强融合方法在站点稀疏地区和青藏高原的优化；加强模式降水的评估与应用，改进冬季北方地面自动站停测和卫星固态降水反演能力不足的缺陷；改进雷达偏差订正方法，解决雷达空间结构不连续问题。同时，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，除了常规地面观测降水资料，还需要高效融合更多分钟级的雷达多层次探测资料，多通道卫星遥感以及闪电定位资料、三维云、

模式分析资料等，同时给出降水相态信息，针对海量观测数据，传统的融合方法可能并不适用，可以尝试开展神经网络等机器学习方法的研究与应用。

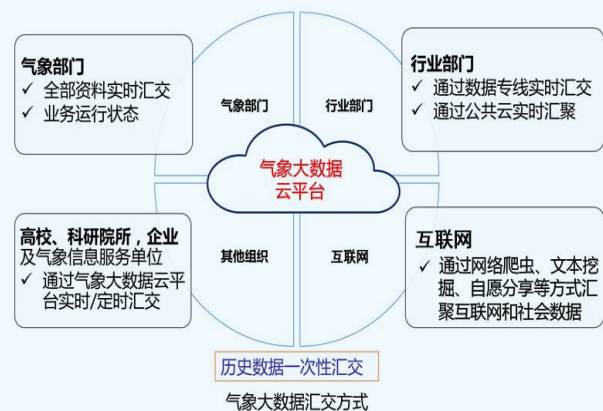
参考文献

- [1] Arkin P, Meisner B. The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud over the western hemisphere during 1982-84. *Monthly Weather Review*, 1987, 115: 51-74.
- [2] Syed T H, Lakshmi V, Paleologos E, et al. Analysis of process controls in land surface hydrological cycle over the continental United States, *J Geophys Res*, 2004, 109, D22105.
- [3] Xie P, Arkin P A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78(11): 2539-2558.
- [4] Ebert E E, Manton M J. Performance of satellite rainfall estimation algorithms during TOGA COARE. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, 55(9): 1537-1557.
- [5] Berg W, Chase R. Determination of mean rainfall from the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) using a mixed lognormal distribution. *Journal of Atmospheric and Oceanic*, 1992, 9: 129-141.
- [6] Ferraro R R, Marks G F. The development of SSM/I rain-rate retrieval algorithms using ground-based radar measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, 12(4): 755-770.

- [7] Reynolds R W. A real-time global sea surface temperature analysis. *J Clim*, 1988, 1: 75-86
- [8] Huffman G J, R F Adler, P Arkin, et al. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78: 5-20.
- [9] Joyce R J, Xie P. Kalman filter-based CMORPH. *J of Hydro*, 2011, 12(6): 1547-1563.
- [10] 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. *J of Hydro*, 2004, 5: 487-503.
- [11] Okamoto K, Iguchi T, Takahashi N, et al. The global satellite mapping of precipitation (GSMaP) project. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS Proceedings, 2005 IEEE International*.
- [12] Michaelides S, Levizzani V, Anagnostou E, et al.: Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling. *Atmospheric Research*, 2009, 94(4): 512-533.
- [13] Fulton R, Breidenbach J, Seo D J, et al. The WSR-88D rainfall algorithm. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 377-395.
- [14] Kitzmiller D, Miller D, Fulton R, et al. Radar and multisensor precipitation estimation techniques in national weather service hydrologic operations. *J Hydrol Eng*, 2013, 18(2): 133-142.
- [15] Kondragunta C R, Kitzmiller D, Seo D J, et al. Objective integration of satellite, rain gauge, and radar precipitation estimates in the multisensor precipitation estimator algorithm. *Proc, 19th Hydrology Conf, American Meteorological Society, Boston, 2005*.
- [16] Zhang J, Howard K, Langston C, et al. National mosaic and multi-sensor QOE(NMQ) system. *Bull Amer Meteor Soc*, 2011, DOI:10.1175/2011BAMS-D-11-00047.1.
- [17] Zhang J, Howard K, Langston C, et al. Multi-Radar Multi-Sensor(MRMS) quantitative precipitation estimation: Initial operating capabilities. *Bull Amer Meteor Soc*, 2016, DOI:10.1175/BAMS-D-14-00174.1621-637.
- [18] Sheffield J, Ziegler A D, Wood E F, et al. Correction of the high-latitude rain day anomaly in the NCEP-NCAR reanalysis for land surface hydrological modeling. *J Clim*, 2004, 17: 3814-3828.
- [19] Qian T, Dai A, Trenberth K E, et al. Simulation of global land surface conditions from 1948-2004. Part I. Forcing data and evaluation. *J Hydrometeorology*, 2006, 7: 953-975.
- [20] Lenters J D, Coe M T, Foley J A. Surface water balance of continental United States, 1963-1995: Regional evaluation of a terrestrial biosphere model and the NCEP/NCAR reanalysis. *J Geophys Res*, 2000, 105(D17): 22393-22425.
- [21] Maurer E P, O'Donnell G M, Lettenmair D P, et al. Evaluation of the land surface water budget in NCEP/NCAR and NCEP/DOE Reanalyses using an off-line hydrological model. *J Geophys Res*, 2001, 106(D16): 17841-17862.
- [22] Meng J, Yang R, Wei H, et al. The land surface analysis in the NCEP climate forecast system reanalysis. *J of Hydro*, 2012, 13: 1621-1630.
- [23] Reichle H R, Liu Q, Randal D K, et al. Land surface precipitation in MERRA-2. *J Clim*, 2017, 30: 1643-1664.
- [24] Beck H E, Albert I J M, Levizzani V, et al. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2017, 21: 589-615.
- [25] Lu N, You R, Zhang W. A fusing technique with satellite precipitation estimate and rain gauge data. *Acta Meteor Sinica*, 2004, 18(2): 141-146.
- [26] Xie P, Xiong A. A conceptual model for constructing high-resolution gauge - satellite merged precipitation analyses. *J Geophys Res*, 2011, 116: D21106.
- [27] 潘昶, 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.
- [28] 宇婧婧, 沈艳, 潘昶, 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.
- [29] Shen, Y, Zhao P, Pan Y, et al. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China. *J Geophys Res*, 2014, 119: 3063-3075
- [30] 潘昶, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面一卫星一雷达三源降水融合试验. *气象学报*, 2015, 73(1): 177-186.
- [31] Xu B, Xie P, Xu M, et al. A validation of passive microwave rain-rate retrievals from the Chinese FengYun-3B satellite. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16: 1886-1905.
- [32] 徐宾, 师春香, 姜立鹏, 等. 东亚多卫星集成降水业务系统. *气象科技*, 2015, 43(6): 1007-1014.
- [33] Xie Y, Koch S, McGinley J, et al. A space-time multiscale analysis system: A sequential variational analysis approach. *Mon Weather Rev*, 2011, 139: 1224-1240.
- [34] 张涛, 苗春生, 王新. LAPS与STMAS地面气温融合效果对比试验. *高原气象*, 2014, 33(3): 743-752.
- [35] 韩帅, 师春香, 姜志伟, 等. 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*, 2018, 8(1): 102-108, 116.
- [36] 宇婧婧, 沈艳, 潘昶, 等. 中国区域逐日融合降水数据集与国际降水产品的对比评估. *气象学报*, 2015, 73(2): 394-410.
- [37] Nie S, Luo Y, Wu T, et al. A merging scheme for constructing daily precipitation analyses based on objective bias-correction and error estimation techniques. *J Geophys Res: Atmos*, 2015, 120, doi:10.1002/2015JD023347.
- [38] Nie S, Wu T, Luo Y, et al. A strategy for merging objective estimates of global daily precipitation from gauge observations, satellites estimates, and numerical predictions. *Adv Atmos Sci*, 2016, 33: 889-904.

气象大数据采集与汇交

依托气象大数据核心技术系统, 实时接入气象观测资料、数值模式产品、气象服务产品等气象数据; 探索通过文本挖掘、网络爬虫、自愿分享以及第三方合作购买数据等方式汇聚行业数据、社会公共数据等, 逐步建立起适用全国的规范统一的社会数据收集流程; 充分利用先进传感器、物联网、数据关联分析技术, 实现信息的自我发现和智能化接入(包括观测设备、人影装备等), 增强与气象相关数据的收集能力, 以及与业务系统的应用对接能力。业务职能部门组织研究基于物联技术改革我国探测资料实时采集传输流程的实施计划。



——摘自《气象大数据行动计划(2017-2020年)》, 2017年9月