

# 卫星遥感反演降水研究进展简述

刘少军 蔡大鑫 韩静 甘业星

(海南省气象科学研究所/海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203)

**摘要:** 高质量的降水数据是开展天气、气候、水文、生态等研究的重要基础。由于传统地面雨量计站观测和地基雷达观测受站点数量和地形条件的限制, 很难实现大范围降水的均匀观测, 而卫星反演降水能有效弥补传统观测站网的缺点。根据卫星反演降水的原理, 简要概述了可见光、红外、微波、多种传感器组合的卫星降水反演算法、总结了5种不同卫星数据反演产品的优点和适用性。改进降水反演算法和加强多种传感器反演降水产品的融合, 才能获得更高精度和更大覆盖范围的降水产品, 这也是未来一段时间内卫星遥感反演降水的趋势。

**关键词:** 卫星遥感, 降水反演, 产品适用性, 进展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.005

## Progress of the Satellite Remote Sensing Retrieval of Precipitation

Liu Shaojun, Cai Daxin, Han Jing, Gan Yexing

(Hainan Institute of Meteorological Science/ Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203)

**Abstract:** High quality precipitation data are an important basis for meteorological, hydrological and ecological research. It is difficult to realize the uniform distribution observation of precipitation over a large area due to the limitation of the number of stations and topographic conditions. Fortunately, satellite retrieval of precipitation can effectively remedy the shortcomings of the traditional observation network. Based on the principle of satellite retrieval of precipitation, this paper briefly summarized the algorithms of satellite retrieval of precipitation using visible light, infrared, microwave and multi-sensor combination, and the applicability of five satellite precipitation products. Improving the algorithms of satellite retrieval of precipitation and enhancing the integration of precipitation products from multiple sensors to obtain higher precision and wider coverage of precipitation products are a trend of precipitation retrieval from satellite remote sensing in the future.

**Keywords:** satellite remote sensing, retrieval of precipitation, applicability of products, progress

### 0 引言

在灾害性天气过程的监测中, 及时了解降水空间分布情况具有十分重要的意义<sup>[1-2]</sup>。传统的地面雨量计站观测可以提供准确和直接的站点观测降水, 但由于分布不均和地形的影响, 不能准确反映大尺度降水的时空特征; 地基雷达观测虽然能给出一定范围内降水的空间分布, 但降水反演的精度并不高<sup>[3]</sup>。由于降水在时间和空间上有较大的不确定性, 而常规使用的雨量计和地基雷达在陆地上分布不均, 且在海洋、无人区分布更加稀少, 采用空间插值一般也难以反映真

实的降水时空分布状况<sup>[4]</sup>。气象卫星在地球的上空观测地球, 不受地理和自然条件限制, 可实现大范围、全过程监测云系的发展、演变, 能有效克服观测站网观测降水的缺陷<sup>[5-6]</sup>, 利用卫星所搭载的各种探测器对降水进行监测、反演和融合, 可以得到多种类型的卫星反演降水产品。卫星观测的降水数据具有覆盖范围广、时间和空间分辨率高的特点, 但卫星降水产品大多通过探测的云层温度或云中粒子信息来间接推算降水量, 其并不等同于直接观测到的降水量<sup>[7]</sup>。因此, 基于卫星遥感技术准确获取区域及全球降水的时空分布一直以来都是一个颇具挑战性的科学难题<sup>[8]</sup>。

### 1 卫星估计降水原理及算法

云降水是大气动力作用和热力作用的综合结果, 这种作用决定了云中的降水和降水云的外在形态。因此, 利用卫星反演的云参数, 可以得到云中热力学相态变化和微物理演变的规律<sup>[9]</sup>。卫星遥感降水反演评

收稿日期: 2019年9月3日; 修回日期: 2019年9月15日  
第一作者: 刘少军(1980—), Email: cdutlsj@163.com  
通信作者: 蔡大鑫(1978—), Email: cdxxxhyn@126.com  
资助信息: 国家自然科学基金项目(41765007); 海南省自然科学基金项目(419QN330; 2019RC359)

估计划最早由世界气象组织在2007年提出<sup>[10]</sup>, 随着卫星遥感技术的发展, 越来越多的卫星反演降水产品开始得到广泛的应用。由于卫星是通过观测云顶温度、云后向散射等信息来反演降水量, 加上算法上存在一定的误差, 导致卫星反演的降水产品中存在大量的空报和漏报现象<sup>[3]</sup>。而且, 不同的卫星资料和反演算法得到的卫星降水产品在精度也存在一定的差别<sup>[5]</sup>。目前, 针对卫星上不同传感器研发的降水反演算法已达上百种, 并已逐渐转向将多种传感器反演的降水产品进行融合以获取更加精准的降水信息。这些高质量的卫星降水反演数据在天气、气候、水文和农业等不同领域中发挥了至关重要的作用<sup>[11]</sup>。卫星遥感降水反演(表1)主要依赖可见光、红外和主/被动微波传感器、多传感器组合反演<sup>[8, 12]</sup>。

表1 遥感反演降水方法分类  
Table 1 Classification of remote sensing algorithms of precipitation

传感器类型	主要反演算法	特点
可见光、红外	基于像素、基于窗格、基于云块的算法	时空分辨率较高, 属于间接估算
微波	辐射类算法、散射类算法、多波段反演类算法	能穿透非降水云, 可探测到强降水以外各种天气条件下的温、湿信息, 扫描宽度窄
多传感器组合	NCEP/CPC形变算法(CMORPH)、多卫星降水分析算法、GSMaP降水反演算法 <sup>[8]</sup>	弥补单一传感器算法存在的不足, 提高准确性、覆盖范围和分辨率

### 1.1 可见光、红外反演降水

红外降水反演算法可以划分为3个主要类型, 分别是基于像素、基于窗格和基于云块的算法<sup>[13]</sup>。红外降水估算的主要理论依据是: 当某个云区的云顶温度低于一定的阈值, 并且区域的范围有继续扩大, 或当云区温度有下降趋势或者云顶核心区域与周围云区的温度梯度差较大时, 均预示着强对流有进一步发展的可能, 将产生降水。因此, 可以利用云顶辐射和反射信息来判断降水发生的可能, 并从云厚度和云顶温度等信息确定降水概率及降水持续时间, 进而估算出降水量<sup>[14]</sup>。如, PERSIANN降水产品正是根据这一原理, 利用静止卫星红外(IR)亮温及地面信息, 采用自适应人工神经网络方法反演降水<sup>[15]</sup>。熊秋芬等<sup>[16]</sup>以GMS卫星4个通道(远红外、近红外、水汽通道和可见光通道)的资料作为输入层, 利用人工神经网络算法, 提高了降水的单站和面雨量的估算精度。夏双等<sup>[17]</sup>同样利用红外波段及人工神经网络, 通过对长时间序列FY-2C卫星影像光谱特征的分析, 构建了基于三层前向型反向传播神经网络的卫星降水估算模型, 展现了卫星反演降水的非线性规律。岳彩军等<sup>[18]</sup>总结

了卫星资料预测热带气旋降水的方法, 运用云团运动外推的办法, 预测短时对流降雨强度。Zhang等<sup>[19]</sup>利用GMS-5红外1通道的亮度温度和水汽通道的亮度温度, 通过与未来1~3 h的降水量开展相关分析, 建立了卫星定量估计短时降水模型。王彦磊等<sup>[20]</sup>利用GMS-5不同降水强度的红外和可见光通道样本云图资料, 建立了云图降水的模糊推理模型。

### 1.2 微波反演降水

与红外、可见光等相比, 微波能穿透非降水云, 可探测到强降水以外各种天气条件下的温、湿信息<sup>[21]</sup>。微波降水反演算法主要可以分为三大类: 辐射类算法、散射类算法、多波段反演类算法<sup>[22-24]</sup>。Grody<sup>[25]</sup>较早建立了基于微波反演陆面降水的方法, 并建立了一个基于SSM/I中85 GHz频率段的全球散射指数。李万彪等<sup>[26]</sup>在散射理论的基础上, 采用动态聚类法将TRMM/TMI的9个微波通道亮温及其组合, 划分为水面、湿土壤、干土壤、层状云降雨和对流云降雨等5类, 对雨区进行判别, 建立了以散射指数和极化订正温度为参数的雨强反演算法, 通过试验并与日本地球观测中心(NASDA)的产品比较, 显示对雨强的分布和降水落区的模拟效果较好。何文英等<sup>[27]</sup>综合已有研究成果, 利用统计方法反演降水强度。选用两个反映中低频通道极化亮温差的信息参量 $D_{V1937}$ 、 $D_{H1910}$ 结合TMI的9个通道亮温, 以及85 GHz亮温的极化订正温度、综合微波指数<sup>[28]</sup>、洪涝指数<sup>[29]</sup>、散射指数<sup>[26, 30]</sup>, 分别组合进行逐步回归获取降水强度。张淼等<sup>[31]</sup>基于微波辐射传输模式对风云三号微波探测仪反演降水的能力进行了分析, 表明50~60 GHz和118.75 GHz对应的通道对水凝物粒子均反应敏感, 采用UWNMS的云结构廓线库, 建立云-辐射数据集, 根据贝叶斯方法对廓线进行加权平均, 得到反演的物理量。李小青等<sup>[32]</sup>基于TRMM/TMI的戈达德廓线算法(GPROF)和FY-3B的MWRI数据, 生成可以描述MWRI观测特征的云-辐射数据集来反演地面雨强。

### 1.3 多传感器组合反演

过去30年, 研究人员已经开始依赖各种卫星上的传感器, 用以获取估算全球降水量的信息。虽然单一类型的传感器也可以进行估算, 但研究人员越来越多地尝试使用传感器组合来提高准确性, 覆盖范围和分辨率。常见的组合算法有气候预测中心形变算法(CMORPH)、多卫星降水分析算法、GSMaP降水反演算法等<sup>[8]</sup>。Vincente<sup>[33]</sup>将被动微波观测数据与地球同步环境卫星(GOES)观测的红外数据和雷达数据相结合进行降水估计。Haddad等<sup>[34]</sup>将TRMM测雨雷

达资料和TRMM微波资料联合反演的瞬时降水产品，充分利用了微波与雷达测雨的优势<sup>[35]</sup>。Miller等<sup>[36]</sup>将被动微波产生的降水估计与红外亮温进行回归，生成的降水估计值用于无法利用微波数据的区域。Todd等<sup>[37]</sup>在前人研究的基础上提出了红外和微波联合反演降水的新算法MIRA (Microwave/Infrared Rainfall Algorithm)，该算法可以提供对瞬时雨强的准确估计，并且该信息可用于校准红外参数，以改善高时间频率下IR数据的降雨估计。应用概率匹配方法优化红外亮温与雨强的关系，通过对比同时空的微波雨强估计与红外亮温观测值的直方图，使得前者分布高于一个特定雨强的比例与后者分布低于相关阈值的比例相等，依据这个关系可以得到红外降水估计。闵爱荣等<sup>[22]</sup>利用TRMM卫星上微波降水雷达、微波辐射计

资料 and 自记降水记录，采用逐步回归方法反演陆面降水。基于集合Kalman滤波与变分的混合方法是目前主被动联合反演的常用算法<sup>[24]</sup>，如FY-3气象卫星采用联合主动双频雷达和被动多通道微波辐射计的探测信息来开展降水的估算<sup>[1]</sup>。

## 2 降水反演产品及适用性分析

随着卫星遥感数据量的增加，出现了一系列具有高时空分辨率的卫星降水反演数据产品(表2)，如TRMM、GPM、PERSIANN、CMORPH等。卫星降水反演数据产品一定程度上能弥补降水资料的不足，但卫星收集数据以及数据反演的过程中存在较多的干扰因素<sup>[38]</sup>，导致产品的反演精度与实际降水存在一定的误差，因此在使用不同降水反演数据集时需对其适用性开展评估。

表2 降水反演产品特点  
Table 2 Characteristics of five remote sensing precipitation products

类型	空间分辨率	覆盖范围	应用范围	下载网站
TRMM降水数据集	0.25°×0.25°	50°S—50°N	降水强度、极端降水、洪涝灾害、水文预测、大尺度气象干旱监测等	<a href="https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm">https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm</a>
GPM数据集	0.1°×0.1°	60°S—60°N	瞬时降水估计、轻度降水事件、水文模拟和水资源评价等	<a href="https://disc.gsfc.nasa.gov/SSW/">https://disc.gsfc.nasa.gov/SSW/</a>
CMORPH数据集	0.25°×0.25°	60°S—60°N	对短的降水事件捕捉能力差	<a href="http://www.cpc.ncep.noaa.gov/">http://www.cpc.ncep.noaa.gov/</a>
PERSIANN数据集	0.25°×0.25°	60°S—60°N	易高估弱降水，低估强降水	<a href="http://precip.gsfc.nasa.gov">http://precip.gsfc.nasa.gov</a>
FY-2卫星降水估计数据集	0.1°×0.1°	除极区外约1/3地球面积	大暴雨以上强降水	<a href="http://satellite.nsmc.org.cn">http://satellite.nsmc.org.cn</a>

### 2.1 TRMM 数据集适用性分析

TRMM是美国国家航空航天局(NASA)和日本宇航研究开发机构(JAXA)联合研发的降水的卫星，其搭载的降雨雷达(PR)为全球第一个星载测雨雷达，可以提供暴雨的三维结构<sup>[39-40]</sup>；TRMM上的微波成像仪(TMI)、微波成像专用传感器(SSMI)、改进的微波扫描辐射计(AMSR)和高级微波探测器(AMSU)等具有高质量的微波估算降水方法<sup>[7]</sup>。TRMM降水产品算法采用微波和红外卫星信号相结合的方法，其降水产品生成的过程：校准及融合微波降水估计；使用校准过的微波降水生成可见光/红外降水估计；融合微波和可见光/红外降水估计；融入雨量计降水数据<sup>[41]</sup>。其中，TRMM3B42卫星降水反演数据产品是在国际上应用最广泛的产品之一，广泛应用于降水强度时空分布<sup>[42]</sup>、极端降水预测<sup>[43]</sup>、洪涝灾害预测<sup>[44]</sup>、水文过程模拟等<sup>[45]</sup>方面，其覆盖范围为50°S—50°N，具有精确到经纬度0.25°×0.25°的空间分辨率以及最高精确到3 h的时间分辨率，使用最新校正算法的V7版，较V6版数据降低了随机误差，精度上有了显著提高<sup>[46-49]</sup>。通过以往在长江、黄河、淮河、珠江等流域以及西南等区域的研究应用<sup>[38, 50-54]</sup>，

探究该产品的精度和适用性，发现该数据具有一定的缺陷性。如，Prakash等<sup>[52]</sup>进行了TRMM 3B42-V7产品在印度对于不同季节的误差分析，发现其误差具有较大的年际变化；刘俊峰等<sup>[53]</sup>对TRMM 3B42产品在中国大陆区域内的适用性进行了评估，发现其精度具有时空不稳定性，在降雨量较大的地区精度较高；Yong等<sup>[49]</sup>评价了TRMM 3B42实时和非实时卫星产品的时空变化特征；王兆礼等<sup>[38]</sup>对TRMM 3B42-V7产品在中国大陆干旱区进行干旱事件的监测和识别，表明其适用于大尺度气象干旱的监测与评估。Sahoo等<sup>[54]</sup>通过发生于美国、欧洲等地区的4场典型干旱事件进行验证，证实3B42-V7产品能够在时间和空间上准确地识别干旱。

### 2.2 GPM 数据集适用性分析

GPM是继TRMM之后新一代的全球卫星降水产品，为全球气候变化、洪旱监测等研究工作提供了有力的数据支持<sup>[55]</sup>。GPM作为TRMM卫星的继任者，其核心卫星于2014年2月27日成功发射，GPM携带了全球首个Ku/Ka波段双频测雨雷达(DPR)<sup>[56]</sup>。GPM降水产品对瞬时降水估计更加准确，特别是冷季固态降水和微量降水；其在统一框架内对卫星辐射计获取的

亮温数据进行交互校准,建立了统一基础条件下的各类微波探测仪的降水反演算法<sup>[41]</sup>。GPM降水产品算法有DPR算法、DPR与GMI融合算法以及雷达增强辐射计算法<sup>[41]</sup>。GPM能够提供全球范围基于微波反演的3h降水数据产品和基于微波红外多星融合算法IMERG的0.5 h雨雪数据产品<sup>[41]</sup>,其空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ,时间分辨率为0.5 h。相比上一代TRMM产品,GPM产品有着更大的覆盖范围(拓展至 $60^{\circ}\text{S}—60^{\circ}\text{N}$ )、更高的时间和空间分辨率,能够更加精确地捕捉微量降水( $<0.5\text{ mm/h}$ )和固态降水,从而有效地提高了探测精度<sup>[11]</sup>。

已有研究<sup>[39, 55, 57-59]</sup>表明,受海拔高度和地理位置等因素的影响,GPM IMERG降水产品的精度和性能在不同地区差异较大。如,Tan等<sup>[57]</sup>发现GPM IMERG产品在马来西亚对于轻度降水事件具有更好的探测能力;Caracciolo等<sup>[58]</sup>在地中海岛屿开展了GPM IMERG降水产品检验工作,发现产品降水量高于观测站点实测降水量;孔宇<sup>[59]</sup>开展了GPM IMERG降水产品在中国大陆地区的精度验证工作,发现其能很好展现中国降水的空间分布规律;许凤林等<sup>[55]</sup>通过对GPM IMERG卫星降水产品在黄淮海平原的适用性研究发现,GPM IMERG卫星降水产品与气象站点数据表现出较好的相关性,虽然存在轻微的高估现象,但能够以较高的精度和较小的误差估测降水;王蕊等<sup>[39]</sup>评估了淮河流域上游区GPM IMERG卫星产品在逐日和小时尺度上的监测精度,发现在降水探测能力方面,GPM与实测降水的一致性较高,尤其表现在小雨和中雨降水事件上,可用于日尺度的水文模拟和水资源评价等研究,但GPM对不同的极端降水事件监测能力不一,可靠性相对较低。

### 2.3 CMORPH 数据集适用性分析

CMORPH卫星数据是在多种微波降水数据和红外数据的基础上研制全球降水数据。分别采用TMI、SSMI、AMSU-B和AMSR-E等四种类型的微波传感器,首先利用时空间分辨率相对更高的红外降水估算量,进而对微波反演数据进行插值,获取的降水时空分布完全取决于微波反演数据。该算法充分利用了微波降水数据精度高和红外数据时空分辨率高的优势<sup>[7]</sup>,时间分辨率最高可达0.5 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,空间覆盖范围为 $60^{\circ}\text{S}—60^{\circ}\text{N}$ <sup>[3]</sup>。

由于卫星降水反演算法是通过观测降水的相关参数(如云顶温度、云后向散射等)与降水之间的对应关系而建立的,反演算法本身会有一些的误差,导致降水反演产品存在大量的空报数据和漏报数据。根据

许时光等<sup>[3]</sup>的研究,当降水量小于5 mm时,CMORPH的空报率随着降水量的升高呈现出非线性的下降趋势;在中国中西部干旱地区,CMORPH的降水空报率在80%以上。Shen等<sup>[60]</sup>对3、6、12、24 h的CMORPH产品进行了误差分析,发现该产品均方根误差在中国区域内呈现明显的递减趋势。针对CMORPH资料的系统性偏差,潘旸等<sup>[61]</sup>基于最优插值方法,最终形成一套覆盖中国区域的高时空分辨率的降水场。在对陆地的降水进行反演时,由于地表的发射率与降水云团的发射率非常相近,所以利用微波数据判定降水往往存在较大的误差<sup>[24]</sup>。Gosset等<sup>[62]</sup>对CMORPH在西非热带干旱半干旱气候区的估算精度进行检验,发现CMORPH产品对降水的估算精度相对较高,但对降水稀少、降水历时短的降水事件捕捉能力相对较差。Li等<sup>[63]</sup>评价了CMORPH在长江流域的适用性,发现该产品过低估算了降水量,不能有效捕捉冬季降水量。Xu等<sup>[64]</sup>在分析CMORPH误差的基础上,采用最优插值方法融合卫星反演降水和地面观测降水。Joyce等<sup>[65]</sup>采用最优插值方法,实现地面气象站的站点观测降水资料和CMORPH卫星反演降水产品的融合,提高降水产品精度。

### 2.4 PERSIANN 数据集适用性分析

PERSIANN数据是采用神经网络算法,通过对TMI、SSMI和AMSU数据进行模型率定,以红外数据作为模型输入,构建出的降水数据集。该数据时间分辨率为3 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,空间覆盖范围为 $60^{\circ}\text{S}—60^{\circ}\text{N}$ 。程开宇等<sup>[7]</sup>对PERSIANN在浙江省南部的瓯江流域对该数据集的适用性分析表明,该数据精度较低,对降水量级存在低估现象。刘江涛等<sup>[66]</sup>对PERSIANN对卫星数据在雅鲁藏布江流域使用的适用性进行评价表明,该数据存在高估弱降水,低估强降水现象,但对降水事件和降水量的反演精度较高,具备捕捉高寒地区地面降水特征的能力。李瑞泽等<sup>[67]</sup>对PERSIANN在环渤海地区的精度评价表明,该数据对日降水量的估算精度较低,存在明显低估暴雨事件的实际降水量等现象。

### 2.5 FY-2 卫星降水估计数据集适用性分析

风云FY-2是中国的第一代静止气象卫星,包含从FY-2A到FY-2F的6颗地球同步轨道卫星。FY-2降水产品以卫星搭载的可见光和红外自旋扫描辐射计遥感探测的红外资料为主,选用云顶温度梯度、云体相对于云团中心的偏移量、云团移动速度作为影响因子回归得到卫星降水估计产品,提供1、3、6、24 h的降水估计产品,空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ <sup>[68]</sup>。对FY-2C/FY-

2D /FY-2E降水产品检验表明, 降水累计的时间越长, 误差越小, 1 h降水估计结果的相对偏差要大于50%, 而24 h累计的降水结果相对误差小于50%<sup>[69]</sup>。林建兴等<sup>[70]</sup>研究表明, FY-2D降水产品对海南岛热带气旋降水的估计都显示出空报率大于漏报率的特征, 同时具有估测大暴雨以上强降水的优势。雷坤江等<sup>[71]</sup>研究表明FY-2E降水资料能很好地反映西藏降水量的相对强弱和降水过程。

### 3 展望

遥感技术的快速发展使得降水估计具备更高的精度和更大的覆盖范围, 卫星降水产品促进了人们对全球水和能量循环的认知<sup>[13]</sup>。目前各类卫星降水反演的方法和数据集都有自身的优缺点, 需要不断提高和完善。从以上5种降水反演产品及适用性分析可以看出, TRMM数据集虽然在空间分辨率低于GPM数据集和FY-2卫星降水估计数据集, 但由于数据集的反演算法和质量高的优势, 被广泛应用于降水强度、极端降水、洪涝灾害、水文预测、大尺度气象干旱监测等领域, 该数据集也有一定的缺陷, 如误差具有较大的年际变化、精度具有时空不稳定性等特点。GPM数据集有着更高的时间和空间分辨率, 也能更加精确地捕捉微量降水和固态降水, 科应用于瞬时降水估计、轻度降水事件、水文模拟和水资源评价等领域; 但对不同区域的极端降水事件监测存在较大误差。CMORPH数据集由于反演算法本身存在误差, 导致降水反演产品存在大量的空报和漏报数据, 因此使用时要尽量采用与其卫星反演降水资料的融合, 以提高精度; PERSIANN数据集整体上存在精度较低, 易出现高估弱降水, 低估强降水。FY-2卫星降水估计数据集中的1、3、6、24 h的降水估计产品空间分辨率较高, 但降水产品误差也较大。

由于卫星是通过观测降水的相关参数建立的算法对降雨进行反演, 导致高时空分辨率的卫星降雨数据中存在大量的空报和漏报数据<sup>[3]</sup>。需要在卫星降水原理上针对反演模型的误差进行更加细致的分析<sup>[72]</sup>。如何利用空报率与降水量之间的数学关系以及空报降水面积与总降水面积之间的关系建立相应的模型以及如何将下垫面信息加入到降水反演模型中, 降低卫星降水反演数据的空报率<sup>[3]</sup>等, 都是提高卫星反演降水产品精度必须考虑的问题。因此, 加强改进降水反演算法研究是今后研究的重点之一。

各类多源降水融合产品也存在一定缺陷, 主要集中在不同区域降水监测能力存在差异、反演降水产品的质量依赖于地面监测降水量、产品精度存在季节特

征差异、产品误差大等特点<sup>[6]</sup>。因此, 需加强多传感器联合反演算法等方面的关键性和基础性研究, 以提高卫星降水融合产品的质量。同时, 在降水产品选择应用方面, 首先要结合当地气候背景条件, 开展不同降水产品在该区域的适用性分析, 以确定最理想的降水产品。建议尽量利用国产卫星反演的降水产品开展产品的试用, 以提高国产卫星资料应用的比例。

### 参考文献

- [1] 尹红刚, 吴琼, 谷松岩, 等. 风云三号(03)批降水测量卫星探测能力及应用. 气象科技进展, 2016, 6(3): 55-61.
- [2] Tang G Q, Ma YZ, Long D, et al. Evaluation of GPM Day -1 IMERG and TMPA Version 7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales. Journal of Hydrology, 2016, 533: 152-167.
- [3] 许时光, 牛铮, 沈艳, 等. CMORPH卫星降水数据在中国区域的误差特征研究. 遥感技术与应用, 2014, 29(2): 189-194.
- [4] Castro L M, Gironás J, Fernández B. Spatial estimation of daily precipitation in regions with complex relief and scarce data using terrain orography. Journal of Hydrology, 2014, 517(5): 481-492.
- [5] 刘瑜, 吴裕珍, 冯志州, 等. 多种卫星降水产品对中国极端降雨反演效果评估. 热带地理, 2017, 37(3): 417-433.
- [6] 廖捷, 徐宾, 张洪政. 地面站点观测降水资料与CMORPH卫星反演降水产品融合的实验效果评估. 热带气象学报, 2013, 29(5): 865-873.
- [7] 程开宇, 张磊磊, 康颖, 等. 多源卫星降水数据在瓯江流域的适用性分析. 水电能源科学, 2016, 34(12): 15-19.
- [8] 刘元波, 傅巧妮, 宋平, 等. 卫星遥感反演降水研究综述. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1162-1172.
- [9] 师春香, 卢乃锰, 张文建. 卫星面降水估计人工神经网络方法. 气候与环境研究, 2001, 6(4): 467-472.
- [10] Turk F J, Arkin P, Ebert E, et al. Evaluating high resolution precipitation products. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 89: 1911-1916.
- [11] 陈晓宏, 钟睿达, 王兆礼, 等. 新一代GPM IMERG卫星遥感降水数据在中国南方地区的精度及水文效用评估. 水利学报, 2017, 48(10): 1147-1156.
- [12] Prigent C. Precipitation retrieval from space: An overview. Comptes Rendus Geoscience, 2010, 342(4/5): 380-389.
- [13] 王存光, 洪阳. 卫星遥感降水的反演、验证与应用综述. 水利水电技术, 2018, 49(8): 1-9.
- [14] 李小青, 杨虎, 游然, 等. 利用风云三号微波成像仪资料遥感“桑达”台风降雨云结构. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2843-2853.
- [15] Hsu K L, Gao X G, Sorooshian S, et al. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1997, 36(9): 1176-1190.
- [16] 熊秋芬, 胡江林, 夏军. 神经网络方法在静止卫星多通道资料估算降水中的应用. 气象, 2002, 28(9): 17-21.
- [17] 夏双, 阮仁宗, 周义, 等. 基于FY-2C卫星数据的藏北高原降水估算研究. 长江流域资源与环境, 2013, 22(6): 786-792.
- [18] 岳彩军, 端义宏, 雷小途, 等. 卫星资料在登陆热带气旋降水研究中的应用. 气象科学, 2005, 25(4): 433-439.
- [19] Zhang M X, Luo C R, Zou Y, et al. A model for quantitatively estimating short-range precipitation based on GMS digitalized cloud maps-part I: analysis quantitative cloud-precipitation relations and model design. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 17(2): 230-244.
- [20] 王彦磊, 江海英, 赵中军, 等. 多光谱卫星云图降水区域与强度估计的模糊推理模型. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(2): 198-204.
- [21] 于晓晶, 韩威, 马秀梅, 等. 卫星微波辐射资料同化在新疆降水预报中的应用初探. 暴雨灾害, 2018, 37(4): 337-346.
- [22] 闵爱荣, 游然, 卢乃锰, 等. TRMM卫星微波成像仪资料的陆面降水反演. 热带气象学报, 2008, 24(3): 265-272.

- [23] Kidd C, Levizzani V. Status of satellite precipitation retrievals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15: 1109-1116.
- [24] Michaellides S, Levizzani V, Anagnostou E, et al. Precipitation: measurement, remote sensing, climatology and modeling. *Atmospheric Research*, 2009, 94(4): 512-533.
- [25] Grody N C. Classification of Snow Cover and Precipitation Using the Special Sensor Microwave / Imager (SSM/I). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1991, 96: 7423-7435.
- [26] 李万彪, 陈勇, 朱元竟, 等. 利用热带降雨测量卫星的微波成像仪观测资料反演陆地降水. *气象学报*, 2001, 59(5): 591-601.
- [27] 何文英, 陈洪滨, 周毓莹. 微波被动遥感地面降水统计反演算法的比较. *遥感技术与应用*, 2005, 20(2): 221-227.
- [28] 李莉, 朱元竟, 赵柏林. 卫星微波(SSM/I)遥感陆地降水. *科学通报*, 1998, 43(17): 1877-1880.
- [29] 陈轶, 郑福海, 金亚秋. 星载微波遥感对中国1998年洪涝的观测统计研究. *电波科学学报*, 1999, 14(3): 241-246.
- [30] Ferraro R R, Grody N C, Marks G F. Effects of surface conditions on rain identification using the DMSP-SSM/I. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 11: 195-209.
- [31] 张森, 乃锰, 谷松岩, 等. 风云三号(02)批卫星微波氧气吸收通道降水特性. *应用气象学报*, 2012, 23(2): 223-230.
- [32] 李小青. 用TRMM资料反演降水强度和水凝物垂直结构. 北京: 中国气象科学研究院硕士学位论文, 2003.
- [33] Vincente G A. Hourly retrieval of precipitation rate from the combination of passive microwave and infrared satellite measurements. PhD dissertation, University of Wisconsin-Madison, 1994.
- [34] Haddad Z S, Smith E A, Kummerow C D, et al. The TRMM "day-1" radar/radiometer combined rain-profiling algorithm. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1997, 5(4): 799-809.
- [35] 吴庆梅, 程明虎, 苗春生. 用TRMM资料研究江淮、华南降水的微波特性. *应用气象学报*, 2003, 14(2): 206-214.
- [36] Miller S W, Arkin P A, Joyce R J. A combined microwave/infrared rain rate algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22, 3285-3307.
- [37] Todd M C, Kidd C, Kniveton D, et al. A combined satellite infrared and passive microwave technique for estimation of small-scale rainfall. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18: 742-755.
- [38] 王兆礼, 钟睿达, 赖成光, 等. TRMM卫星降水反演数据在珠江流域的适用性研究——以东江和北江为例. *水科学进展*, 2017, 28(2): 174-182.
- [39] 王蕊, 余钟波, 杨传国, 等. TRMM/GPM 卫星降水产品在淮河流域上游逐日和小时尺度的精度评估. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(5): 109-115.
- [40] Kummerow C, Barnes W. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(3): 809-817.
- [41] 唐国强, 万玮, 曾子悦, 等. 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述. *遥感技术与应用*, 2015, 30(4): 607-615.
- [42] Arikoden H, Samah A A, Babu C A. Spatial and temporal characteristics of rain intensity in the peninsular Malaysia using TRMM rain rate. *Journal of Hydrology*, 2010, 387(3/4): 312-319.
- [43] Pombo S, Oliveira R P D. Evaluation of extreme precipitation estimates from TRMM in Angola. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 663-679.
- [44] Tekeli A E, Fouli H. Evaluation of TRMM satellite-based precipitation indexes for flood forecasting over Riyadh City, Saudi Arabia. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 471-479.
- [45] 杨传国, 余钟波, 林朝晖, 等. 基于TRMM 卫星雷达降雨的流域陆面水文过程. *水科学进展*, 2009, 20(4): 461-466.
- [46] Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15: 809-817.
- [47] Prakash S, Mitra A K, Momin I M, et al. Comparison of TMPA-3B42 versions 6 and 7 precipitation products with gauge based data over India for the southwest monsoon period. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(1): 346-362.
- [48] Liu Z. Comparison of versions 6 and 7 3-hourly TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) research products. *Atmospheric Research*, 2015, 163: 91-101.
- [49] Yong B, Chen B, Gourley J J, et al. Intercomparison of the version-6 and version-7 TMPA precipitation products over high and low latitudes basins with independent gauge networks: is the newer version better in both real-time and post-real-time analysis for water resources and hydrologic extremes. *Journal of Hydrology*, 2014, 508(2): 77-87.
- [50] 孙乐强, 郝振纯, 王加虎, 等. TMPA卫星降水数据的评估与校正. *水利学报*, 2014, 45(10): 1135-1146.
- [51] 刘少华, 严登华, 王浩, 等. 中国大陆流域分区TRMM降水质量评价. *水科学进展*, 2016, 27(5): 639-651.
- [52] Prakash S, Mitra A K, Aghakouchak A, et al. Error characterization of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA-3B42) products over India for different seasons. *Journal of Hydrology*, 2015, 529(3): 1302-1312.
- [53] 刘俊峰, 陈仁升, 韩春坛, 等. 多卫星遥感降水数据精度评价. *水科学进展*, 2010, 21(3): 343-348.
- [54] Sahoo A K, Sheffield J, Pan M, et al. Evaluation of the tropical rainfall measuring mission multi-satellite precipitation analysis (TMPA) for assessment of large-scale meteorological drought. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 159: 181-193.
- [55] 许凤林, 郭斌, 叶贝, 等. GPM IMERG 卫星降水产品在黄淮海平原的适用性研究. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 79-86.
- [56] Prakash S, Mitra a k, Paids, et al. From TRMM to GPM: How well can heavy rainfall be detected from space? *Advances in Water Resources*, 2016, 88: 1-7.
- [57] Tan M L, Santo H. Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia. *Atmospheric Research*, 2018, 202: 63-76.
- [58] Caracciolo D, Francipane A, Viola F, et al. Performances of GPM satellite precipitation over the two major Mediterranean islands. *Atmospheric Research*, 2018, 213: 309-322.
- [59] 孔宇. 中国大陆GPM/IMERG 产品的精度评估. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [60] Shen Y, Xiong AY, Wang Y, et al. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D02114.
- [61] 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.
- [62] [Gosset M, Viarre J, Quantin G, et al. Evaluation of several rainfall products used for hydrological applications over West Africa using two high-resolution gauge networks. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139: 923-940.
- [63] Li Z, Yang D, Hong Y. Multi-scale evaluation of high resolution multi-sensor blended global precipitation products over the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 2013, 500: 157-169.
- [64] Xu B, Yoo S, Xie P. Quantifying error in the CMORPH satellite precipitation estimates. San Francisco: AGU Annual Assembly, 2010.
- [65] 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(7): 487-503.
- [66] 刘江涛, 徐宗学, 赵焕, 等. 不同降水卫星数据反演降水量精度评价——以雅鲁藏布江流域为例. *高原气象*, 2019, 38(2): 386-396.
- [67] 李瑞泽, 张安定, 张华, 等. 多卫星降水产品在环渤海地区的精度评价. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2916-2924.
- [68] Lu N M, You R, Zhang WJ. A fusing technique with satellite precipitation estimate and raingauge data. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 18(2): 141-146.
- [69] 杨军. 气象卫星及其应用. 北京: 气象出版社, 2012.
- [70] 林建兴, 许向春, 冯文. 热带气旋影响下海南岛卫星降水估计产品的检验分析. *热带农业科学*, 2012, 32(4): 49-56.
- [71] 雷坤江, 假拉, 肖天贵. 利用FY-2E卫星降水资料对西藏地区降水日变化特征分析. *成都信息工程大学学报*, 2016, 31(1): 86-93.