

DOI: 10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 01. 006

GPM 降水产品评估研究综述

陈汉清^{1,2}, 鹿德凯^{1,2}, 周泽慧^{1,2}, 朱自伟^{1,2}, 任英杰^{1,2}, 雍斌^{1,2}

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:从 IMERG、DPR 和水文模拟 3 方面综述了 GPM 降水产品的评估工作。GPM 降水产品在复杂地形和高海拔地区均表现不佳, 甚至出现不可靠的情况, 还存在明显的季节差异性, 主要表现为夏秋两季的表现较好, 春冬两季表现相对较差。指出 GPM 对微量降水、固态降水和极端降水的观测还需进一步的完善, 未来的卫星降水评估工作应从传感器层面上展开。

关键词:全球降水观测; 多卫星联合降水反演; 降水产品; 水文模拟

中图分类号: TV125; P426. 6

文献标志码: A

文章编号: 1004 - 6933(2019)01 - 0027 - 08

An overview of assessments on global precipitation measurement (GPM) precipitation products // CHEN Hanqing^{1,2}, LU Dekai^{1,2}, ZHOU Zehui^{1,2}, ZHU Ziwei^{1,2}, REN Yingjie^{1,2}, YONG Bin^{1,2} (1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper reviews the assessments on global precipitation measurement (GPM) precipitation products from three aspects of integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement (IMERG), dual-frequency precipitation radar (DPR) and hydrologic simulation. The results show that the performance of GPM precipitation products is poor or even unreliable in complex terrain and high elevation areas, and there are significant seasonal differences that the performances of GPM precipitation products are good in summer and autumn, while relatively poor in spring and winter. The author of this paper believed that the observation to drizzle, heavy rainfall and solid precipitation by GPM should be improved, and the future assessment on satellite precipitation products should be carried out at sensor level.

Key words: global precipitation measurement; integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement; precipitation product; hydrological simulation

在全球变暖背景下,降水的时空分布直接影响着人类水资源的获取;极端的降水事件,如洪水、干旱、暴风雪等对社会经济产生重大的影响;农业灌溉、淡水资源管理与利用需要更精确地获取降水事件发生的时间、地点、强度等重要信息^[1-2]。因此,在水文学、气候学和气象学方面,降水都具有重要的理论和实践意义^[3]。精确的降水测量及其在全球范围的时空分布已成为当前研究前沿和热点问题^[4]。

随着测量技术的发展,目前主要的降水测量设备有雨量计、地基雷达和搭载各种传感器的遥感卫星等。雨量计和地基雷达给出的降水数据精度较高,一

般情况下视为“真值”,并作为卫星降水产品评估的参考资料^[5-9],但不适用于全球范围的降水研究以及监测。卫星技术的出现为全球范围的降水观测带来了曙光。1997 年 11 月 28 号由 NASA 和 JAXA 合作开发设计的 TRMM (tropical rainfall measuring mission) 卫星在日本成功发射,该卫星主要用于监测和研究热带和亚热带地区的降水^[10],已在 2015 年 4 月 15 日正式停止运行。在 TRMM 时代涌现出了多种降水产品,如 TPMA^[11]、CMORPH^[12]、PERSIANN^[13] 和 GSMaP^[14] 等降水产品。国内外学者对 TRMM 各版本降水产品进行了大量的评估工作^[15-19],并得到了

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2018YFA06050402);国家自然科学基金(91547101);江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX18_0618);中央高校基本科研业务费专项(2018B698X14)

作者简介:陈汉清(1990—),男,博士研究生,研究方向为卫星降水产品误差订正和产品研发。E-mail: hanqingchen@hhu.edu.cn

通信作者:雍斌,教授。E-mail: yongbin@hhu.edu.cn

广泛的应用^[20-22]。尽管通过 TRMM 卫星获取了大量的降水观测资料,但它在固态降水(如雪和冰雹)和微量降水($<0.5\text{ mm/h}$)的灵敏度方面并不令人满意,且其全球空间覆盖范围也存在着局限性,远不能满足人们的现实需求。针对 TRMM 卫星的不足,NASA 和 JAXA 联合发起了全球降水观测(global precipitation measurement, GPM)计划。2014 年 2 月 28 日,GPM 计划核心观测平台成功发射。该核心观测平台为用户带来了更高精度、更高时空分辨率和覆盖更广的数据源,可为进一步理解降水对地球水资源、气候和地球能量循环等方面的影响提供数据支持。卫星降水产品的评估工作是在其广泛使用前的一个必不可少的步骤,可为使用者选择最优卫星降水产品提供参考,同时也为基于卫星降水反演算法和传感器的改进提供可靠的信息。而卫星降水产品评估方法对量化卫星降水产品的误差至关重要。

针对卫星降水产品评估工作的需求,卫星降水产品的评估方法也有所区别。应用较为广泛成熟的为统计分析方法^[11-12]。Li 等^[23]提出采用面向对象的方法评估卫星降水产品的性能,该方法主要揭示卫星降水产品的几何和空间特征。Tan 等^[24]提出卫星降水产品误差溯源的方法,从传感器层面对卫星降水产品展开评估。综合研究发现大部分的卫星降水产品评估均以统计分析方法评估卫星降水产品的性能。随着 GPM 核心观测平台的成功发射以及降水产品的开放共享,国内外的研究者对 GPM 降水产品展开了一系列的评估工作。评估主要有两种形式:一是利用卫星降水产品与地面观测资料直接比较;二是将卫星降水产品作为水文模型的输入参数,以此评估卫星降水产品的表现。但目前尚未有相关文献对已有的 GPM 降水产品评估工作进行梳理和归纳。

本文主要从多卫星联合降水反演(integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement, IMERG)、双频降水雷达(dual-frequency precipitation radar, DPR)和水文模拟三方面综述 GPM 降水产品的评估工作,并对 GPM 降水产品未来需要解决的问题进行了总结,对卫星降水产品评估的方向进行了展望。

1 与地面资料直接比较评估

1.1 IMERG 降水产品评估

1.1.1 全球尺度

在全球尺度下对卫星降水产品的评估工作,有利于在粗尺度下了解 IMERG 降水产品在各地区的表现,也为进一步细分各地区或流域尺度下的评估工作提供参考。Liu^[25]对全球尺度下的 IMERG-Final 降水

产品进行了评估,分析发现在捕捉强降雨能力方面,IMERG-Final 降水产品比 TMPA(3B43)更为合理地捕捉到南北半球主要的强降雨地区,两种卫星降水产品之间的差异随着地表类型和雨率的变化而变化。进一步分析发现因为两种卫星降水产品的陆地部分均使用地面雨量站点数据进行了校准,因此陆地上的系统偏差比海洋上的偏差要小得多,正相对偏差主要发生在低雨强,而负相对偏差主要发生在高雨强。但在海洋上,所有的雨强均为负相对偏差。Liu^[25]同时对 IMERG 和 TMPA 的被动微波和红外降水产品进行了分析,发现 IMERG 和 TMPA 降水产品在热带海洋地区的系统偏差与被动微波降水产品有密切的关系,两种产品的偏差主要来自被动微波。

尽管 Liu^[25]在全球尺度下对 GPM 主要降水产品 IMERG 与 TRMM 时代的 TMPA 进行了比较分析,但缺乏与地面站点数据的比较分析,GPM 降水产品在全球尺度下的评估工作仍需要进一步研究。

1.1.2 地区尺度

评估某地区的卫星降水产品对产品在该地区水文应用、气候研究和淡水资源管理等方面有着积极的意义。由于中国受到多种气候类型的影响,各地区的降雨量差异较大,同时也存在地形复杂的地区以及高海拔的山区,因此 GPM 降水产品在中国山区的精度表现得到了广泛的研究和关注。金晓龙等^[26]针对卫星降水产品在天山山区适用性具有不确定性的问题,对 GPM 降水产品在天山山区适用性进行了研究,结果表明 IMERG 降水产品比 TPMA 与 CORMP 降水产品的精度要高,但在地形复杂的天山中心区表现较差,同时发现低海拔高估降水,在中海拔地区降水估计能力较好,高海拔低估降水且表现最差,主要的原因可能是因为 DPR 对高海拔地区的降雪探测能力较差。相比于天山,青藏高原为更典型也是更为热门的研究地区。Ma 等^[27]评估了 IMERG 降水产品在青藏高原上的表现,IMERG 降水产品表现较好,但存在高海拔地区命中降水事件偏低的问题。

干旱地区总降水量相对较少,而中高纬度区域主要为微量降水和固态降水。传统的卫星降水产品一般存在低雨强高估、对微量降水和固态降水敏感度不强的问题。GPM 搭载的多频被动微波成像仪(GPM microwave imager, GMI)以及 DPR 专门为微量降水以及固态降水而设计,为干旱和中高纬度地区的降水高精度估计带来了希望。GPM 降水产品在中国干旱区以及中高纬度地区的表现至关重要。Tang 等^[28]对中国大陆的 IMERG 和 TMPA 降水产品,基于地面雨量站点的降水数据进行了相互的交叉验证,结果表明 IMERG 降水产品在所有的时空尺

度下均明显优于 3B42 V7,特别是在中高纬度干旱地区的表现更为突出;IMERG 降水产品虽然相对较好地捕捉到降水的日变化情况,但仍有进一步提高的空间,特别是在干旱气候和高纬度地区。

GPM 降水产品在中国地区各季节的表现也得到了广泛的研究。金晓龙等^[26]分析发现卫星降水产品的估测能力随着季节变化而变化,在夏秋两季表现较好,但在春冬两季表现相对较差。Guo 等^[29]对中国地区的校准与未校准的 IMERG 降水产品进行了评估,结果表明校准的 IMERG 降水产品改善明显,但两种 IMERG 降水产品在冬季的表现均相对不佳,并存在对西南地区微量降水高估的问题。Chen 等^[30]评估了 IMERG 降水产品在中国大陆的表现,总体上 IMERG 降水产品较传统卫星降水产品更优,相对来说 IMERG 降水产品在冬季的表现不够理想,在新疆和青藏高原地区并不可靠,大陆北部的大部分地区在冬季也存在 IMERG 降水产品不可靠的问题。

GPM 降水产品在其他国家或地区的表现也得到了广泛的研究和关注。印度主要受到季风季节气候的影响,给印度带来了大量的降雨。Prakash 等^[31]初步评估了印度受西南季风季节地区的 IMERG 降水产品表现,得到了 IMERG 降水产品在捕捉强降水能力方面较 TMPA 降水产品有了显著的提升,但存在印度东北部地区暴雨发生频率被低估的结果。随后,Prakash 等^[32]在初步评估的基础上进一步对受季风季节影响的印度西南部地区日尺度下的 IMERG 和 GSMaP 降水产品进行了评估,结果表明 IMERG 降水产品更能反映研究区的季风降雨特征,其变化也更符合实际情况,但 IMERG 降水产品的均方根比 GSMaP 降水产品大,特别是在低雨强和西海岸地区;进一步采用一种基于熵的方法去评估这几种降水产品,发现 IMERG 和 GSMaP 降水产品性能有显著提高,特别是在低雨强下表现突出,同时 IMERG 降水产品在漏测和误测降水偏差上相对有所改善。与印度类似,韩国和日本同样显著地受到季风季节气候的影响。Kim 等^[33]对东亚部分地区的 IMERG 和 TMPA 降水产品以季风季节角度进行了分析,发现在季风前和季风季节期间,IMERG-Final 降水产品比 TRMM 3B42 V7 降水产品性能有微量的提升,而在降水的空间分布方面,IMERG-Final 降水产品比 TRMM 3B42 V7 降水产品具有更高的精度,这是因为 GPM 降水产品的时空分辨率更加精细,相对具有一定的优势。

不同的地形具有不同的降雨特征,特别是相比于背风坡,迎风坡的降雨较为丰富。传统的卫星降

水产品在复杂地形区的精度并不理想,特别是难以准确地探测到较精确的降雨量。针对 GPM 降水产品在复杂地形区的表现,许多科研人员做了一定的研究。Prakash 等^[32]分析了受地形影响的印度东北地区 and 降水极少的东南半岛,得到了所有的卫星降水产品均表现不佳的结果。Kim 等^[33]对远东地区的 IMERG 和 TMPA 降水产品,基于地面雨量站点数据对这两种卫星降水产品在不同地形情况下的表现进行了分析,结果表明在山区和海岸地区,IMERG-Final 降水产品均比 TRMM 3B42 V7 降水产品表现要好,但也存在因地形引起的对流以及反演算法的问题而导致卫星降水产品具有不确定性的问题。卫星降水产品在地形复杂多变的安第斯山脉的表现同样受到了科研人员的广泛关注。Manz 等^[34]在多时空尺度下对安第斯山脉的 IMERG 降水产品进行了评估工作,结果表明 IMERG 降水产品在探测能力和定量化降水强度能力上比 TMPA 降水产品表现更优,特别是在安第斯山脉的高海拔地区,在独立的降水探测或雨率方面,IMERG 降水产品均能更好地表达地面降水观测特征;进一步研究发现 IMERG 降水产品在属于干旱地区的秘鲁海岸沿线在降水探测和雨率估计方面均没有改进。Sharifi 等^[35]在不同地形条件下,对伊朗 IMERG 降水产品进行评估,得到了 IMERG 表现较好,但仍存在轻微低估的结果。

Gaona 等^[36]基于被视为降水“真值”的雷达降雨地图,对中纬度区域的荷兰第一年的 IMERG-Final 降水产品进行了评估,结果表明在总体上 IMERG-Final 降水产品存在轻微低估的问题,但可作为降水数据的一个可靠来源,特别是在地面雨量站点稀疏的地方,同时验证了 IMERG 降水产品在中纬度地区的潜力。Asong 等^[37]针对 IMERG 降水产品在中高纬度的加拿大地区的表现进行了评估,发现 IMERG 降水产品均能很好地捕捉到大部分区域的潮湿或干旱的时间长度分布。GPM 降水产品在美国地区的表现也得到了学者的研究和关注。Tan 等^[38]对美国东南部地区的 IMERG-Final 降水产品进行了评估,结果表明随着时间和空间尺度的增大,IMERG 和 TMPA 降水产品均能更好地识别降雨事件的发生,同时改善了雨强的随机误差和系统误差,在大部分情况下 IMERG 降水产品优于 TMPA 降水产品。Tan 等^[24]进一步评估了美国中部大西洋地区的 IMERG 降水产品,结果表明 IMERG 降水产品的随机误差较大,存在低雨强高估、高雨强低估的问题。

GPM 降水产品在其他典型地区的表现同样得到了广泛的研究和关注。Siukis 等^[39]对伊朗西北地

区的呼罗珊拉扎维省的 IMERG 降水产品进行了评估,得到了 IMERG 降水产品与地面雨量站点降水数据保持较好的一致性,但仍存在低估了降雨量的结果。Asong 等^[37]对加拿大南部陆地不同生态区的 IMERG 降水产品进行了评估,结果表明 IMERG 降水产品与地面雨量站点降水数据具有类似的日平均降水区域变化特征,但在太平洋海洋生态区,IMERG 降水产品存在高估的问题,在科迪勒拉生态区的大部分地区以及只有少量地面站点的草原生态区,IMERG 降水产品表现依然不够理想。Sharifi 等^[40]对奥地利东北部地区的 IMERG 降水产品进行了评估,得到了 IMERG 降水产品在降水频率上均存在高估的结果。

综上所述,在地区尺度上,IMERG 降水产品表现总体上要优于其他卫星降水产品(TMPA、GSMaP)。在中高纬度地区,IMERG 降水产品相比传统的卫星降水产品有所改进,具有一定的应用潜力,但仍有待进一步的提升和改善。在具有复杂地形或高海拔的地区,IMERG 降水产品的表现相对来说有一定的提升,但仍表现不佳,甚至出现数据不可靠的问题。因此针对地形复杂、高海拔、干旱以及中高纬度地区降水产品评估工作还需要进行更细致的研究,以分析其误差的来源及其成因,为传感器的改进和算法反演的进一步完善提供可靠的参考信息。与此同时,GPM 降水产品还表现出明显的季节性特征,夏秋两季表现较好,春冬两季相对较差。值得注意的是,在冬季甚至可能出现降水产品不可靠的问题,推测可能为春冬两季主要为微量降水和固态降水,而 GPM 未能对这两种降水类型精确探测所导致。

1.1.3 流域尺度

针对典型流域降水产品的评估工作有利于理解该流域的降水时空分布等信息,同时也有助于对自然灾害的预报,以便在防灾减灾中起到重要的作用。同时,流域尺度的卫星降水产品评估工作是进行水文模拟的前提步骤之一,国内外学者有针对性地在流域尺度下做了大量的降水产品评估工作。Tang 等^[41]对中国赣江流域的 IMERG 降水产品进行了一系列的评估,结果表明 IMERG 降水产品在干旱区域存在高估的问题,总体上 IMERG 降水产品基本可取代 TMPA 降水产品。Wang 等^[42]评估了中国北江流域的 IMERG 降水产品(包括 IMERG-Final、IMERG-Late 和 IMERG-Early),分析发现 IMERG-Final 降水产品与地面观测数据具有较高的相关性以及相对较低的相对偏差,而 IMERG-Late 和 IMERG-Early 降水产品表现相对较差,与地面站点观测数据相关性均

较低,IMERG 降水产品相对 TRMM 3B42 V7 降水产品表现出明显更高的降水命中概率,但同时误测率也更高。魏志明等^[43]对海河流域的 IMERG 和 TRMM 3B43 降水产品进行了精度分析,发现在总体上 IMERG 降水产品略优于 TRMM 3B43 降水产品,且在高分辨率水文分析方面具有较高的应用前景。但两种卫星降水产品均存在轻微的低估问题。

雨季的降水事件较多,特别是存在较多的极端降水事件,容易引发洪水等自然灾害。传统的卫星降水产品一般存在高雨强低估的问题。GPM 降水产品在雨季的表现对自然灾害预报等具有重要的作用,一系列的评估工作已经展开。Sahlu 等^[44]选取了尼罗河流域上游雨季时间段校准与未校准的 IMERG 降水产品与对应的 CMORPH 降水产品进行了比较分析,发现所有的 IMERG 降水产品在每小时或日尺度下的相关系数和偏差率均比 CMORPH 降水产品表现要好,而在探测降水能力方面,IMERG 降水产品比 CMORPH 降水产品仅有轻微的提高,但存在卫星降水产品在该地区对大雨的探测能力较差的问题。He 等^[45]选取中国西南部湄公河流域上游的两种雨季卫星降水产品(IMERG-Final、TRMM 3B42 V7)与地面雨量站点降水数据进行了分析研究,评估了日尺度下的卫星降水产品在该地区的精度,结果表明 IMERG 降水产品改善了中强度降水事件的捕捉能力以及对极端降水具有的高敏感性,相比 3B42 降水产品更能捕捉到降雨的变化,但高估了极端降水事件的数量。

相比 TRMM 时代的降水产品,IMERG 降水产品表现较好,特别是在中强度降水事件和极端降水的探测和降雨估计上有了一定的提高,但仍存在高估极端降水、探测能力不足的问题,这会对后续洪水的预报以及防灾减灾工作带来潜在的危害。

1.2 DPR 降水产品评估

改善微量降水和固态降水的观测是 DPR 的任务之一,相关研究对 DPR 的表现进行了评估。考虑到地形和气候对 DPR 降水可靠性有着重要的影响,Speirs 等^[46]选取了阿尔卑斯山脉与高原地区的 DPR 降水产品进行了评估,结果表明在探测和降水估计方面存在比较突出的特征:夏季明显的好于冬季,液态降水好于固态降水,平原地区好于复杂地形区域,但存在一致低估的问题。Casella 等^[47]以 CloudSat-CPR 产品为参考数据,对 DPR 的降雪探测能力进行了评估,分析发现 DPR 探测到降雪发生事件与 CPR 相比仅有微小的偏差,但该部分偏差的降雪量并不可忽略,同时指出 DPR 的漏测主要由 DPR 降噪算法部分引起,并提出了一个简单的算法使得

DPR 探测到的降雪量增加高达 59%。吴琼等^[48]利用 4 次降雪实例分析比较了 DPR 的 3 种扫描模式 (KaMS、KaHS 和 Ku) 对降雪探测能力的差异,结果表明 DPR 降水产品与地面雨量站点数据结果较为一致,具备对雨雪进行区分的能力,而 Ku 模式能够识别出最多的降雪事件,对降雪的综合探测能力较强。

DPR 是 GPM 时代的主要优势之一,与 IMERG 降水产品类似,DPR 降水产品同样存在季节性特征,即夏季的表现明显优于冬季,同时表现出液态降水优于固态降水、平原地区优于复杂地形地区的特点。DPR 的 3 种扫描模式相对来说 Ku 模式的综合表现最优。值得注意的是,虽然 DPR 能够精确探测到大部分降雪事件,但漏测的降雪量却不可忽略,这可能是由于 DPR 对大雪事件不敏感或是对降雪量存在严重低估,还需要对传感器和算法反演作进一步的调整和改进。

2 水文模拟评估

降水是水文模型最为重要的输入参数之一。最大可能地发挥水文模型对洪水、泥石流等灾害的预测和评估能力,卫星降水产品的精度是保证。相比于 TRMM 等以往的卫星降水产品,GPM 降水产品精度更高,能满足水文模型对降水产品精度的高要求,理论上 GPM 降水产品相对传统的卫星降水产品在水文模型应用上具有更广阔的前景。随着 GPM 降水卫星产品的发布,国内外学者对 GPM 降水产品在水文模拟上的表现展开了一系列的研究。

Tang 等^[41]利用 CREST 水文模型预测径流,结果表明 IMERG 降水产品与地面站点降水参考数据相当,在大部分情况下,IMERG 降水产品的表现优于 TMPA 降水产品,认为该产品在水文应用方面具有较为广阔的前景。He 等^[45]将 IMERG-Final 降水产品和 TRMM 3B42 V7 降水产品应用到中国西南部湄公河流域上游中,分析发现两种卫星产品的日径流模拟相当,但在驱动水文模拟方面,以 IMERG 降水产品率定的结果优于 TRMM 3B42 降水产品。Sharif 等^[49]利用 IMERG 降水产品,以 GSSHA 水文模型模拟了哈费尔巴廷市近期发生的一个洪水事件,径流模拟结果发现该次洪水事件中城市化部分的子流域(约占流域面积的 6.8%)产生的洪水约占此次总洪水量的 85%;上游子流域部分(约占流域面积的 68%)产生的洪水量可忽略不计;而中间子流域产生的洪水约占总洪水量的 13%。TANG 等^[50]将 IMERG-Late、PERSIANN、GSMaP NRT 和 3B42RT 4 种降水产品应用于中国南方 2016 年 6 月

的洪水预警,结果表明 IMERG-Late 降水产品为最适合的产品。Wang 等^[42]以北江流域作为研究区域,以 VIC 水文模型分别采用两种率定形式验证 IMERG-Early、IMERG-Late 和 IMERG-Final 降水产品在水文应用方面的性能,在两种率定形式下,IMERG-Final 水文模拟效果均最好,值得注意的是,在汛期时 IMERG-Early 和 IMERG-Late 水文模拟效果更好,综合各卫星降水产品的表现,实时性较高的 IMERG-Early 降水产品在洪水预测方面具有较高的应用前景。Zubieta 等^[51]在秘鲁-厄瓜多尔亚马孙河流域地区进行了水文模拟实验,以 IMERG 降水产品和 TMPA(V7 和 RT)降水产品分别作为分布式水文模型的降水输入数据进行实验,结果表明 IMERG 降水产品在南部地区(乌卡亚利河流域)较为实用,但在缺乏充足降雨资料的北部地区(马拉尼翁河和纳波流域),3 种卫星降水产品均不能给出实际径流情况。Yuan 等^[52]利用 IMERG 和 TRMM 3B42 V7 降水产品在缅甸数据点稀疏的山区进行了水文模拟实验,结果表明两种卫星降水产品均存在高估的问题,同时验证了两种卫星降水产品均适用于研究区的径流模拟,值得注意的是,TRMM 3B42 V7 降水产品比 IMERG 降水产品更适用于该地区的径流模拟。

卫星降水产品精度的进一步提高,使得其在水文等应用领域上较以往的卫星降水产品有更大的优势。相比传统的卫星降水产品,GPM 降水产品在水文模拟评估中的表现相对较好。在所有的 IMERG 降水产品中,总体上 IMERG-Final 降水产品在水文模拟中的表现相对更优,但在洪水预报以及考虑实时性等方面,IMERG-Late 和 IMERG-Early 有一定的优势。不可忽略的是,在局部地区存在 TRMM 降水产品比 GPM 降水产品效果更好的情况(如 Yuan 等^[52]的研究成果),这还需要进一步研究。

3 研究展望

GPM 是建立在 TRMM 成功经验基础上的,解决了 TRMM 的关键局限性,同时统一了 GPM 卫星群的观测成果,为卫星降水产品设立了新标准,进一步提高了各类传感器的性能,尤其是对中高纬度地区微量降水和固态降水的估计能力,并带来了更高的精度和时空分辨率。大量的评估工作结果表明,GPM 降水产品较以往的卫星降水产品精度更高,适用性更强,更能反映降水的时空特征。GPM 虽然带来了新一代的降水产品,特别是在着重解决中高纬度的微量降水和固态降水观测的问题方面,相比以往的卫星降水产品有一定的改进,但在以下方面仍有待进一步的提升和改善:

a. 在复杂地形和高海拔的地区,GPM 降水产品表现还不稳定,甚至出现不可靠的情况,特别是在天山和青藏高原地区。针对复杂地形和高海拔地区的卫星降水评估仍需进一步做更细致化的研究,以分析其误差的来源及其成因,为传感器的改进和算法反演的进一步完善提供可靠的参考信息。

b. 卫星降水产品具有季节性的特征,夏秋两季的表现较好而春冬两季的表现相对较差,在冬季甚至可能出现不可靠的情况,可能因为 GPM 对微量降水和固态降水的观测仍然不足,对微量降水和固态降水的探测仍需进一步提高。另一方面,虽然 GPM 在存在较多极端降水事件的夏季中表现相对较好,但 GPM 对极端降水的探测仍有待提高。

c. 在水文模拟评估中,存在局部 TRMM 降水产品比 GPM 降水产品效果更好的问题,具体的情况仍需进一步的研究。

d. 目前的卫星降水产品评估工作主要基于卫星降水产品与地面参考资料的直接比较,不能从本质上反映误差的来源,未来的卫星降水产品评估工作应从传感器层面上展开。

参考文献:

[1] HOU A Y, KAKAR R K, NEECK S, et al. The global precipitation measurement mission [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 95(5) : 701-722.

[2] SKOFRONICK-JACKSON G, PETERSEN W A, BERG W, et al. The global precipitation measurement (GPM) Mission for Science and Society [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98 (8) : 1679-1695.

[3] 夏军,石卫,王强,等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. 水资源保护, 2017, 33(1) : 1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction[J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (1) : 1-8. (in Chinese))

[4] 刘培,吴凯,许怡,等. 中国大陆 TRMM 降水多尺度精度评价[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3) : 42-47. (LIU Pei, WU Kai, XU Yi, et al. Multi-scale accuracy evaluation of TRMM precipitation data in mainland China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3) : 42-47. (in Chinese))

[5] GROISMAN P Y, LEGATES D R. Documenting and detecting long-term precipitation trends; where we are and what should be done[J]. Climatic Change, 1995, 31(2/3/ 4) : 601-622.

[6] KIDD C, BECKERR A, HUFFMAN G J, et al. So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges? [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(1) : 69-78.

[7] 刘元波,傅巧妮,宋平,等. 卫星遥感反演降水研究综述 [J]. 地球科学进展, 2011, 26(11) : 1162-1172. (LIU Yuanbo, FU Qiaoni, SONG Ping, et al. Satellite retrieval of precipitation: an overview[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(11) : 1162-1172. (in Chinese))

[8] 刘俊,尹洋洋,沙晓军,等. 下垫面要素变化对径流影响的多元统计分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(2) : 41-43. (LIU Jun, YIN Yangyang, SHA Xiaojun, et al. Multivariate statistical analysis of influence of underlying surface change on runoff[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2) : 41-43. (in Chinese))

[9] 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[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4) : 607-615. (TANG Guoqiang, WAN Wei, ZENG Ziyue, et al. An overview of the global precipitation measurement(GPM) mission and it's latest development [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(4) : 607-615. (in Chinese))

[10] MAGGIONI V, MEYERS P C, ROBINSON M D. A review of merged high-resolution satellite precipitation product accuracy during the tropical rainfall measuring mission (TRMM) era [J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(4) : 1101-1117.

[11] HUFFMAN G J, BOLVIN D T, NELKIN E J, et al. The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) : quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(1) : 38-55.

[12] 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]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(3) : 487-503.

[13] HSU K, GAO X, SOROOSHIAN S, et al. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks [J]. Journal of Applied Meteorology, 1997, 36(9) : 1176-1190.

[14] USHIO T, KACHI M. Satellite rainfall applications for surface hydrology [M]. Dordrecht, Netherlands : Springer, 2010 : 105-123.

[15] YONG B, REN L, HONG Y, et al. First evaluation of the climatological calibration algorithm in the real-time TMPA precipitation estimates over two basins at high and low latitudes[J]. Water Resources Research, 2013, 49 (5) : 2461-2472.

[16] YONG B, REN L L, HONG Y, et al. Hydrologic evaluation of multi-satellite precipitation analysis standard precipitation products in basins beyond its inclined latitude band: a case study in Laohahe Basin, China[J]. Water Resources Research, 2010, 46(7) : 759-768.

[17] YONG B, HONG Y, REN L L, et al. Assessment of evolving TRMM-based multi-satellite real-time precipitation estimation methods and their impacts on

- hydrologic prediction in a high latitude basin [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117:1-21.
- [18] GOURLEY J J, HONG Y, FLAMIG Z L, et al. Hydrologic evaluation of rainfall estimates from radar, satellite, gauge, and combinations on Ft. Cobb Basin, Oklahoma [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2011, 12(5):973-988.
- [19] GAO Y C, LIU M F. Evaluation of high-resolution satellite precipitation products using rain gauge observations over the Tibetan Plateau [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2013, 17(2):837-849.
- [20] HIERRO R, LLAMEDO P, DE LA T A, et al. Spatiotemporal structures of rainfall over the Amazon basin derived from TRMM data [J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(3):1565-1574.
- [21] 田苗, 李卫国. 基于 TRMM 遥感数据的旱涝时空特征分析 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(5):252-257. (TIAN Miao, LI Weiguo. Analysis of spatial and temporal characteristics of drought and flood based on TRMM remote sensing data [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5):252-257. (in Chinese))
- [22] ZHAO Y, XIE Q, LU Y, et al. Hydrologic evaluation of TRMM multi-satellite precipitation analysis for Nanliu River Basin in humid southwestern China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):2470.
- [23] LI J, HSU K L, AGHAKOUCHAK A, et al. Object-based assessment of satellite precipitation products [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(7):547.
- [24] TAN J, PETERSEN W A, Tokay A. A novel approach to identify sources of errors in IMERG for GPM ground validation [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(9):2477-2491.
- [25] LIU Z. Comparison of integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) and TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) monthly precipitation products: initial results [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(3):777-790.
- [26] 金晓龙, 邵华, 张弛, 等. GPM 卫星降水数据在天山山区的适用性分析 [J]. *自然资源学报*, 2016, 31(12):2074-2085. (JIN Xiaolong, SHAO Hua, ZHANG Chi, et al. The applicability evaluation of three satellite products in Tianshan Mountains [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(12):2074-2085. (in Chinese))
- [27] MA Y, TANG G, LONG D, et al. Similarity and error intercomparison of the GPM and its predecessor-TRMM multi-satellite precipitation analysis using the best available hourly gauge network over the Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(7):569.
- [28] TANG G, MA Y, LONG D, et al. Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533:152-167.
- [29] GUO H, CHEN S, BAO A, et al. Early assessment of integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement over China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 176/177:121-133.
- [30] CHEN F, LI X. Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 monthly precipitation products over Mainland China [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6):472.
- [31] PRAKASH S, MITRA A K, PAI D S, et al. From TRMM to GPM: how well can heavy rainfall be detected from space? [J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 88:1-7.
- [32] PRAKASH S, MITRA A K, AGHAKOUCHAK A, et al. A preliminary assessment of GPM-based multi-satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 556:865-876.
- [33] KIM K, PARK J, BAIK J, et al. Evaluation of topographical and seasonal feature using GPM IMERG and TRMM 3B42 over Far-East Asia [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 187:95-105.
- [34] MANZ B, PAEZ-BIMOS S, HORNA N, et al. Comparative ground validation of IMERG and TMPA at variable spatiotemporal scales in the Tropical Andes [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(9):2469-2489.
- [35] SHARIFI E, STEINACKER R, SAGHAFIAN B. Assessment of GPM-IMERG and other precipitation products against gauge data under different topographic and climatic conditions in Iran: Preliminary Results [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2):135.
- [36] GAONA M F R, OVEREEM A, LEIJNSE H, et al. First-year evaluation of GPM rainfall over the Netherlands: IMERG Day 1 Final Run (V03D) [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(11):2799-2814.
- [37] ASONG Z E, RAZAVI S, WHEATER H S, et al. Evaluation of integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) over Southern Canada against ground precipitation observations: a preliminary assessment [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(4):1033-1050.
- [38] TAN J, PETERSEN W A, KIRSTETTER P E, et al. Performance of IMERG as a function of spatiotemporal scale [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 18(2):307-319.
- [39] SIUKIS K, SAGHAFIAN B, MOAZAMI. Comprehensive evaluation of 3-hourly TRMM and half-hourly GPM-IMERG satellite precipitation products [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(2):558-571.
- [40] SHARIFI E, STEINACKER R, SAGHAFIAN B. Hourly comparison of GPM-IMERG-final-run and IMERG-real-time (V-03) over a dense surface network in Northeastern Austria [C] // General Assembly Conference Abstracts. Vienna: Copernicus, 2017:1949.
- [41] TANG G, ZENG Z, LONG D, et al. Statistical and hydrological comparisons between TRMM and GPM Level-3 products over a midlatitude basin: is Day-1 IMERG a good successor for TMPA 3B42 V7? [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(1):121-137.

- [42] WANG Z, ZHONG R, LAI C, et al. Evaluation of the GPM IMERG satellite-based precipitation products and the hydrological utility[J]. Atmospheric Research, 2017, 196: 151-163.
- [43] 魏志明, 岳官印, 李家, 等. GPM 与 TRMM 降水数据在海河流域的精度对比研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 171-176. (WEI Zhiming, YUE Guanyin, LI Jia, et al. Comparison study on accuracies of precipitation data using GPM and TRMM product in Haihe River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 171-176. (in Chinese))
- [44] SAHLU D, NIKOLOPOULOS E I, MOGES S A, et al. First evaluation of the Day-1 IMERG over the upper Blue Nile Basin[J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(11): 2875-2882.
- [45] HE Z, YANG L, TIAN F, et al. Intercomparisons of rainfall estimates from TRMM and GPM multi-satellite products over the Upper Mekong River Basin [J]. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(2): 413-430.
- [46] SPEIRS P, GABELLA M, BERNE A. A comparison between the GPM dual-frequency precipitation radar and ground-based radar precipitation rate estimates in the Swiss Alps and Plateau[J]. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(5): 1247-1269.
- [47] CASELLA D, PANEGROSSI G, SANO P, et al. Evaluation of the GPM-DPR snowfall detection capability: comparison with CloudSat-CPR [J]. Atmospheric Research, 2017, 197: 64-75.
- [48] 吴琼, 仰美霖, 窦芳丽. GPM 双频降水测量雷达对降雪的探测能力分析[J]. 气象, 2017, 43(3): 348-353. (WU Qiong, YANG Meilin, DOU Fangli. Study of GPM dual-frequency radar in detecting snow [J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(3): 348-353. (in Chinese))
- [49] SHARIF H, AL-ZAHRANI M, HASSAN A. Physically, fully-distributed hydrologic simulations driven by GPM satellite rainfall over an urbanizing arid catchment in Saudi Arabia[J]. Water, 2017, 9(3): 163.
- [50] TANG G, ZENG Z, MA M, et al. Can near-real-time satellite precipitation products capture rainstorms and guide flood warning for the 2016 summer in South China? [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(8): 1208-1212.
- [51] ZUBIETA R, GETIRANA A, CARLO ESPINOZA J, et al. Hydrological modeling of the Peruvian-Ecuadorian Amazon Basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2017, 21(7): 1-21.
- [52] YUAN F, ZHANG L, WIN K, et al. Assessment of GPM and TRMM multi-satellite precipitation products in streamflow simulations in a data-sparse mountainous watershed in Myanmar[J]. Remote Sensing, 2017, 9(3): 302.

(收稿日期: 2017-11-27 编辑: 熊水斌)

· 信息播报 ·

“2018 中国水资源高效利用与节水技术论坛”在广州召开

2018 年 12 月 21—23 日, 由河海大学主办, 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心、广东省水利水电科学研究院、《水资源保护》编委会、巢湖研究院和北京沃特咨询有限公司承办的“2018 中国水资源高效利用与节水技术论坛”在广东省水利水电科学研究院召开。

水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心常务副主任陈达, 广东省水利厅副厅长黄志坚, 广东省水利厅副巡视员、省防汛防旱防风总指挥部秘书长贺国庆, 广东省水利水电科学研究院党委书记黄本胜, 巢湖研究院院长朱青出席论坛开幕式。论坛开幕式由水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心副主任张行南主持。

陈达副主任在致辞中表示, 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心作为国家科技创新体系的组成部分, 在我国新老水问题相互交织、水资源水生态问题日益突出的严峻形势下, 将瞄准世界水利学科发展前沿, 加快科技创新步伐、推动成果转移转化, 为促进节水型社会建设与生态文明建设提供强有力的科技支撑, 为我国水利事业的建设与发展做出更大贡献。

黄志坚副厅长指出, 本次论坛围绕习近平总书记生态文明思想和新时代水利工作方针, 共同研讨热点问题与最新技术成果, 意义重大。希望通过本次学术论坛, 为推动广东省的水资源高效利用和节水工作科学、高效、安全发展贡献智慧。

黄本胜书记指出, 全面节约和高效利用水资源, 是破解我国水资源短缺, 确保水资源可持续利用的战略举措, 本次论坛为各方搭建了一个增进了解、相互学习借鉴和交流的平台, 通过深入开展交流探讨进行思想碰撞, 相信会取得很好的成效。

本次论坛以“跨界治水, 融合与创新”为主题, 来自全国各地的 11 位行业内知名专家学者参加会议并做特邀报告, 水利相关管理部门、高校、科研院所等单位近 200 名代表围绕水资源高效利用与节水技术进行了深入的交流和讨论, 分享了最新研究成果。

大会组委会对会议优秀论文进行了表彰, 由《水资源保护》副主编彭桃英编审主持颁奖仪式。部分与会人员还考察了广东省水利水电科学研究院飞来峡水利试验基地。

(本刊编辑部供稿)