

## 全球降水计划多卫星降水联合反演 IMERG 卫星降水产品在中國大陸地区的多尺度精度评估<sup>\*</sup>

任英杰<sup>1,2</sup>, 雍斌<sup>1,2\*\*</sup>, 鹿德凯<sup>1,2</sup>, 陈汉清<sup>1,2</sup>

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

(2: 河海大学地球科学与工程学院, 南京 211100)

**摘要:** 以中国气象局逐小时地面降水数据集为参考基准, 采用 8 种统计评价指标综合评估对比了美国 NASA 研发的全局降水计划 (GPM) 多卫星降水联合反演 IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) 卫星降水产品的三个不同版本的 Final 数据, 分析了三套卫星降水在中國大陸地区多时空尺度下的反演精度, 探讨了 IMERG 最新版本 V5 数据的改进情况及反演中仍然存在的问题. 结果表明: IMERG 数据能够准确地捕捉到中國大陸地区的降水区域特征, 但是在中國西北部地面站点稀疏地区误差较大, 精度较低, 难以精确估测该地区的实际降水值. 最新版本 V5 数据精度整体上优于先前的 V3 和 V4 数据, V5 与地面观测数据的相关系数为 0.75, 均方根误差为 7.03 mm/d, 较 V3、V4 有明显提高, 改善了 V3、V4 在中國西北部出现的降水低估问题; 但是 V5 在冬季表现较差且没有解决前期版本存在的高估问题, 整体上相对实际降水仍处于高估状态; 同时 V5 在对高雨强事件的捕捉监测能力方面还存在一定的不足, 因此建议在强降雨事件监测中需谨慎使用卫星降水 IMERG 数据集. 目前 V5 系统中的校正算法还存在部分缺陷: 为消除全球降水系统性低估问题, 目前的校正算法整体性抬升了卫星降水值, 从而导致卫星降水反演在中國地区高雨强事件下出现高误报以及高估问题, 进而影响到 IMERG 数据回推以及后续再生数据的精度.

**关键词:** IMERG; 卫星降水; 中國大陸地区; 精度评估; 高估; 高雨强事件; 校正算法

## Evaluation of the Integrated Multi-satellitE Retrievals (IMERG) for Global Precipitation Measurement (GPM) mission over the Mainland China at multiple scales

REN Yingjie<sup>1,2</sup>, YONG Bin<sup>1,2\*\*</sup>, LU Dekai<sup>1,2</sup> & CHEN Hanqing<sup>1,2</sup>

(1: State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, P.R.China)

(2: School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, P.R.China)

**Abstract:** Based on the hourly gauge precipitation data from the China Meteorological Administration, we used eight statistical metrics to evaluate the accuracy of the Final data from three IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) versions (i.e., Versions 3, 4 and 5) over Mainland China across multiple scales. We quantified the improvement of the latest Version 5 relative to previous versions and analyzed the problems in the current IMERG algorithm. Our result shows that: The IMERG data can well capture regional precipitation characteristics over Mainland China, but in northwest China where ground stations are sparse the error is larger and the accuracy is lower, making it difficult to estimate actual precipitation. The Versions 5 outperforms the Versions 3 and 4, with a higher correlation coefficient of 0.75 and a lower root mean squared error of 7.03 mm/d. Though partly corrected for the underestimate problem in northwest China, the Version 5 still performs poorly in winter and does not handle the overestimate problem. This latest version generally suffers from overestimate problems, and the ability to capturing and monitoring heavy rainfall events is less satisfying, and therefore cautions should be taken for the cases of heavy rainfall events. The correction algorithm is still imperfect, in particular for the historical data. Meanwhile, the algorithm may upraise satellite precipitation values in excess as a re-

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划项目 (2018YFA0605402)、国家自然科学基金项目 (91547101) 和江苏省面上基金项目 (BK20161502) 联合资助. 2018-06-29 收稿; 2018-09-02 收修改稿. 任英杰 (1995~), 男, 硕士研究生; E-mail: hhurenyingjie@hhu.edu.cn.

<sup>\*\*</sup> 通信作者; E-mail: yongbin\_hhu@126.com.

sult of the correction for underestimate problems, leading to high false alarm rates and overestimate problems in the cases of heavy rainfall events. This has an impact on the quality of IMERG data that retrospect to TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) times and also the follow-on data.

**Keywords:** IMERG; satellite precipitation; Mainland China; accuracy evaluation; overestimate; heavy rainfall events; correction algorithm

降水作为地球水循环系统的关键组成部分,在水圈、大气圈、生物圈的相互作用中扮演着重要角色<sup>[1-3]</sup>. 准确获取降水的时空分布信息是了解和预测天气及气候变化的关键<sup>[4]</sup>,也是气象、气候、经济、农业等其他相关学科研究的基础和必要支撑<sup>[5]</sup>. 随着卫星遥感技术和星载传感设备的快速发展和不断完善,多卫星降水联合反演技术弥补了地面雨量计和地基雷达的局限和不足,成为当前快速地获取高时空分辨率降水信息的主流技术<sup>[6]</sup>. 1997年11月28日,TRMM<sup>[7]</sup>(Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星的成功发射揭开了多卫星联合反演降水的序幕<sup>[8]</sup>. TRMM计划不仅达到了预期目的:进一步深刻了解热带降水对全球水循环机制的影响<sup>[9]</sup>,同时也衍生出了一系列丰富的高时空分辨率降水数据,如TMPA(TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis)<sup>[7]</sup>系列产品、CMORPH(Climatology Prediction Center Morphing Technique)<sup>[10]</sup>系列产品、PERSIANN(Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks)<sup>[11]</sup>系列产品. 国内外研究者通过对TRMM时代卫星降水数据的评估及应用<sup>[12-15]</sup>,肯定了TRMM数据在水文预测、干旱监测等方面良好表现<sup>[16-17]</sup>,同时也发现了TRMM校正算法在空间覆盖率和冻雨观测灵敏度等方面存在的不足,为卫星降水算法的改进提出了建议<sup>[18]</sup>. 针对TRMM时代卫星数据存在的缺陷,新一代的全球降水计划GPM<sup>[19]</sup>(Global Precipitation Measurement,全球降水观测计划)继承了TRMM的成功经验和成果,改进了降水反演算法,同时利用更为先进的被动微波辐射计GMI(GPM Microwave Imager)和双频雷达DPR(Dual-frequency Precipitation Radar)传感器为多卫星联合反演降水提供了更加精准的校准参考. 作为TRMM的后续降水观测计划,GPM可以提供更高精度、更大覆盖范围、更高时空分辨率的降水数据,提高固态降水以及微量降水的探测精度<sup>[19]</sup>.

IMERG<sup>[20]</sup>(Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM,GPM多卫星降水联合反演计划)作为GPM的代表产品,为所有用户提供时间分辨率为30分钟、空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ,覆盖范围为 $60^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{S}$ (后续将扩展至 $90^\circ\text{N} \sim 90^\circ\text{S}$ )的高时空分辨率降水数据. 自2014年以来,IMERG已经发布了IMERG-V03、IMERG-V04、IMERG-V05(后简称V3、V4、V5)3个正式版本的数据. 根据不同的数据处理过程,IMERG提供了3种不同的降水产品,包括近实时产品Early-Run和Late-Run及滞时产品Final-Run(后简称Early、Late、Final). 在3种数据中,由于Final数据经过了地面站点的月尺度校正,其精度最接近于实际降水数据<sup>[21]</sup>,在水文模拟、环境治理等领域具有广阔的应用前景. 近年来,国内外研究结果<sup>[22-25]</sup>充分证明了IMERG产品在精度上相较于TRMM产品有显著的提高,可以在研究气候变化、径流模拟等方面起到重要作用.

中国大陆地区幅员辽阔,地形复杂,气候多样,降水时空分布的差异性较大,因而卫星降水产品在中国地区的表现受到了众多学者的关注. 近年,国内学者针对IMERG产品进行了分析评估与应用<sup>[26-29]</sup>,肯定了IMERG数据在降水观测方面较TRMM系列产品具有更加良好的表现,表明了IMERG数据在水文模拟等方面的应用潜力,同时发现了IMERG未校正数据存在低雨强高估、高雨强低估的问题. 但是总体上,上述研究时间段多集中在夏季,数据时间较短;研究地区多集中于区域或流域上的对比;研究数据多集中为IMERG前期版本V3或V4;而针对最新版本V5数据在中国大陆地区多尺度的精度评估与分析研究也相对较少. Wang<sup>[30]</sup>等分析了IMERG V5数据在全球范围以及中国大陆地区的精度,结果表明V5版本Final数据提升了降水反演的精度,但是对于校正算法存在的问题分析较少. 因此为全面分析IMERG数据精度对于水文模拟等方面的适用性以及其校正算法存在的问题,本文以中国气象局地面自动站与CMORPH融合数据作为参考,全面评估比较IMERG 3个正式版本Final数据在中国地区的精度. 通过比较分析定量评估IMERG各版本的误差特征,分析最新版本V5的改进情况以及校正算法存在的问题,借此希望能为IMERG卫星降水算法将来的改进与完善提供反馈信息,同时也通过对各版本数据在中国大陆地区的量化评估,可为后续IMERG的数据使用者在中国大陆地区的使用提供借鉴信息.

1 数据与方法

1.1 卫星降水数据

IMERG 是专为全球降水计划 GPM 设计的最新一代多卫星融合反演降水数据. 它充分借鉴融合了 TRMM 时代成熟的卫星降水反演算法: TMPA、CMORPH、PERSIANN-CCS (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Cloud Classification System)<sup>[31]</sup>, 结合了 GPM 卫星群提供的被动微波数据和红外数据, 并通过 GPCC<sup>[32]</sup> (Global Precipitation Climatology Centre, 全球降水气候中心) 的校准分析进行数据校正. IMERG 生成系统数据处理过程主要包含以下步骤: ①将高时空分辨率数据通过 GSMap<sup>[33]</sup> 相同的云移动矢量算法实时生成云移动矢量场; ②预处理微波数据并建立微波与降水强度的关系, 生成微波数据版本的降水数据; ③利用云移动矢量场并通过拉格朗日时间插值算法对微波数据进行插值; ④利用卡尔曼滤波算法对插值后的微波以及地球静止卫星红外数据进行融合处理, 同时加入全球历史气候数据生成降水产品. IMERG 数据生成系统在实时阶段运行一次并采用云移动矢量传播算法的前向传播算法生成 Early 数据; IMERG 数据生成系统再次运行并加入后向传播算法生成 Late 数据; 最后 IMERG 数据生成系统在得到月度地面降水数据后再次运行生成 Final 数据. 随着 IMERG 版本的更新与变化, IMERG 算法及其所涉及的传感器也在同步更新, IMERG 主要算法及传感器变化的详细情况见表 1.

表 1 IMERG 算法及传感器变化  
Tab.1 Algorithm and sensor updating for IMERG

数据类型	算法名称	数据起止时间	传感器主要变化	数据处理过程主要变化
V3	GPROF V03	2014-03-12— 2016-01-31	—	—
V4	GPROF V04	2014-03-12— 2017-02-28	加入 ATMS 传感器	1. 根据不同传感器调整降雨阈值 2. 改正了在使用卡尔曼滤波方法中出现的错误, 屏蔽了近海地面数据对卫星数据校正造成的影响 3. 重新启用了 ECMWF 文件减少数据延迟并移除了 GPCC 网格校正量值
V5	GPROF V05	2014-03-12 至今	停止 TMI 传感器的使用 限制 ATMS 以及 MHS 传感器的使用	1. 改进校正误差估计以提供适当权重 2. 减少了微波数据的使用 3. 在没有红外数据的完整降雨场也使用了 GPROF 算法进行计算

1.2 地面参考数据

本文选用的地面参考数据为中国自动站与 CMORPH 融合的逐小时降水量 0.1°网格数据集(1.0 版). 数据集采用概率密度匹配以及最优插值方法将经过质量控制后的全国三万余个自动气象站(图 1)观测的地面数据以及 CMORPH 卫星数据进行融合, 最终生成了一套覆盖中国区域的高时空分辨率的降水数据. 该数据处理过程主要包括: ①通过地面数据插值以及卫星数据重采样使得两套数据时空分辨率相同; ②利用概率密度函数匹配误差订正法订正卫星数据系统误差; ③以订正后的卫星数据为初估场, 利用最优插值方法融合两种数据, 得到最终数据集. 数据集在经过地面站点的质量控制的前提下, 适当引入了卫星降水数据来弥补地面观测数据的不足, 并使用科学合适的方法进行融合, 使得该数据的总体估计误差明显优于国际上同类型产品<sup>[34]</sup>. 因此, 本文选取了此套数据作为 IMERG 评估的地面参考数据. 需要说明的是, 在融合过程中由于受到地面观测站点分布的影响, 数据集会存在部分缺陷, 在地面站点分布稀疏的区域以及冬季自动站不工作的东北、西部区域, 数据集的降水来源主要依赖于 CMORPH 数据, 因此使用数据集作为参考数据会在我国西部地区的评估方面存在一定的不确定性.

1.3 精度评估方法

1.3.1 精度评估指标 为定量研究分析卫星降水的精度及误差, 本文采用了系列评估指标进行综合评

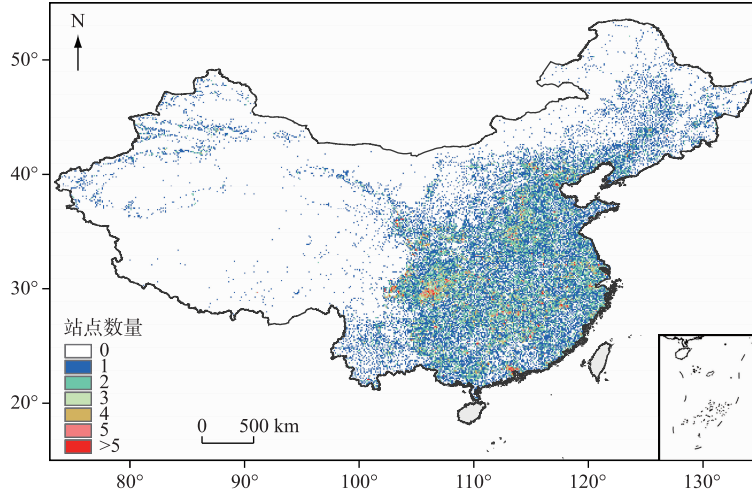


图 1 中国大陆地区地面观测站点分布

Fig.1 Distribution of gauge stations over the Mainland China

价<sup>[35-36]</sup>. 评估指标包括:相关系数(correlation coefficient,  $CC$ ),该指标表示卫星数据与地面站点观测数据的线性相关程度,最优值为 1;均方根误差(root mean squared error,  $RMSE$ ),该指标反映了卫星数据与地面站点观测数据之间的离散程度,最优值为 0;平均误差(mean error,  $ME$ )表示卫星数据误差的整体水平,最优值为 0;相对偏差(relative bias,  $BIAS$ )和相对绝对偏差(absolute relative bias,  $ABIAS$ )可反映卫星数据的偏差程度,最优值为 0;命中率(probability of detection,  $POD$ )表示卫星数据准确捕捉实际降水事件的能力,最优值为 1;误报率(false alarm ratio,  $FAR$ )表示卫星数据对降水事件的误报情况,最优值为 0;关键成功率(critical success index,  $CSI$ )综合考虑了命中与误报情况,反映出了卫星降水真实的监测实际降水事件的能力,最优值为 1. 上述指标公式如下:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2} \quad (2)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - G_i) \quad (3)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i} \times 100\% \quad (4)$$

$$ABIAS = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - G_i|}{\sum_{i=1}^n G_i} \times 100\% \quad (5)$$

$$POD = H/(H + M) \quad (6)$$

$$FAR = F/(H + F) \quad (7)$$

$$CSI = H/(H + F + M) \quad (8)$$

式中,  $n$  为样本总数,  $S_i$  代表卫星数据,  $G_i$  代表地面站点数据,  $\bar{S}$  代表卫星数据平均降水值,  $\bar{G}$  代表地面站点数据平均降水值,  $H$  代表卫星命中降水数量,  $F$  代表卫星漏报降水数量,  $M$  代表卫星误报降水数量.

1.3.2 雨量阈值划分 根据不同降水事件划分不同阈值,以反映卫星数据在不同阈值下对降水事件发生可能

表 2 降水类别及对应阈值\*  
Tab.2 Precipitation category and the corresponding thresholds

类别	日降水量	阈值
小雨	$1\text{ mm} \leq \text{日降水量} < 10\text{ mm}$	1 mm
中雨	$\leq 10\text{ mm}$ 日降水量 $< 25\text{ mm}$	10 mm
大雨	$\leq 25\text{ mm}$ 日降水量 $< 50\text{ mm}$	25 mm
暴雨	日降水量 $\geq 50\text{ mm}$	50 mm

\* 为排除微量降雨的影响,因此将小雨的最小值调为 1 mm/d.

性的估计能力. 根据中国气象局降水等级标准,本文划分降水等级如表 2 所示.

本文在日尺度上对卫星数据进行精度评估,在计算各类评估指标时,为保证所使用到的数据均包含地面自动站观测数据,本文只选取至少包含一个地面站点的格网进行格网尺度下的定量比较<sup>[30,37-39]</sup>.

### 2 结果分析

#### 2.1 卫星数据及其误差空间分布特征

##### 2.1.1 总体分布尺度

由图 2 可知,IMERG 数据表现出的降水空间分布特征与地面观测数据较为相似. 如图 2a 所示,中国大陆东南沿海地区降水丰富,年降水量大于 800 mm;西北内陆地区降水量稀少,年降水量小于 200 mm;日降水量自东南向西北逐渐递减,IMERG 数据准确地捕捉到了中国大陆地区较为明显的降水区域特征,同时图 2a 中显示部分区域具有明显的斑点式分布特征,这主要是由于地面数据在融合时使用的卫星降水产品 CMORPH 会在一定程度上高估湖泊区域降水<sup>[40]</sup>,而 IMERG 产品并没有出现类似问题. 据图 2b~d,随着卫星数据版本的更新,IMERG 各版本数据日平均降水空间分布整体变化不大,区域性变化明显. 其中 V4 在青藏高原地区以及西南山区的降水较 V3、V5 明显偏少,而 V5 在青藏高原南部以及塔里木地区低降水区域较 V3、V4 明显减少. 由此可见,IMERG 各版本数据在青藏高原及其附近地区的修正较为频繁,原因可能是:该区域的海拔高度以及地形的复杂性在一定程度上限制了各类卫星传感器的有效性,卫星数据生产者需要通过不断调整算法使得卫星反演的数据更加接近真实的地面降水值.

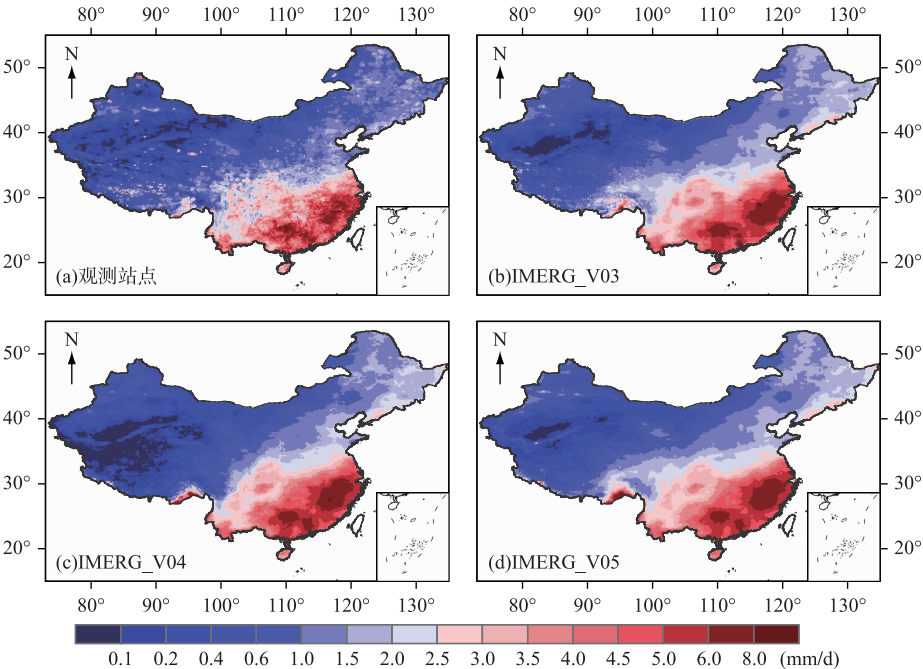


图 2 2015 年 1—12 月中国大陆平均日降水空间分布: a~d 图分别来自地面观测数据、V3、V4、V5  
Fig.2 Spatial distributions of mean daily precipitation over Mainland China during the period of January 2015 to December 2015: computed from the gauge observations, the V3, V4 and V5 versions of IMERG products (a~d)

据图 3,在相对偏差方面,IMERG 各版本数据相较于地面降水数据整体呈高估状态,虽然 V5 的调整没

有效改善 IMERG 数据表现出的高估现象,但是消除了 V3、V4 在西北地区大量存在的负偏差,使得卫星数据在该地区的低估问题得到了一定程度的改善。在相关系数方面和降水命中率方面,各版本数据在华东地区的表现明显优于西部地区。相对于 V3、V4, V5 在东南地区提升较大,在华中、华北和西北地区的表现较好,但是针对西南地区存在的低相关性、低命中率问题仍没有明显改进。同时,综合图 3b、e、h 可以看出 V4 在青藏高原及西南山区的精度最差,表明 V4 的算法在该区域出现了问题,对 IMERG 产品的精度提升没有帮助,导致了 V4 在更新一段时间后即被 V5 所取代。

综合来看, V5 通过算法的调整弥补了 V3、V4 存在的缺陷,提升较大精度最高。但是从各类精度指标的空间分布来看, IMERG 数据仍然存在问题,在华东、华南和华北地区,卫星数据和地面观测数据较为一致但是在西部地区卫星数据相对偏差较大,相关性和命中率较低。总体来说,导致卫星数据在中国西部地区误差较大、降水反演困难的主要原因有:①由于地面参考数据在西部地区的地面观测站点较为稀疏,因此经过插值后的参考数据可能会偏离实际降水值,从而降低计算指标的可靠性,导致卫星数据在该地区偏差较大;②受到中国西部地区复杂的地形气候因素的影响,各类卫星传感器准确反演这类地区的降水仍然是一个较大的挑战个难题,从而影响到卫星数据的精确性;③IMERG 通过 GPCC 地面数据进行地面校正以减少卫星数据的偏差,但是 GPCC 在中国西部地区的站点较为稀疏,难以提供全面准确的地面数据对卫星数据进行校正,因此也会影响到 IMERG 的数据质量;④卫星数据算法虽然随着版本不断更新,但是仍然没有解决该地区的问题,算法在该地区效果提升不明显。综上所述, V5 数据在 3 个版本中表现最好,同时由于受到了各类限制, IMERG 数据在数据稀疏、缺失地区以及地形复杂地区的降水反演还需要进一步完善。

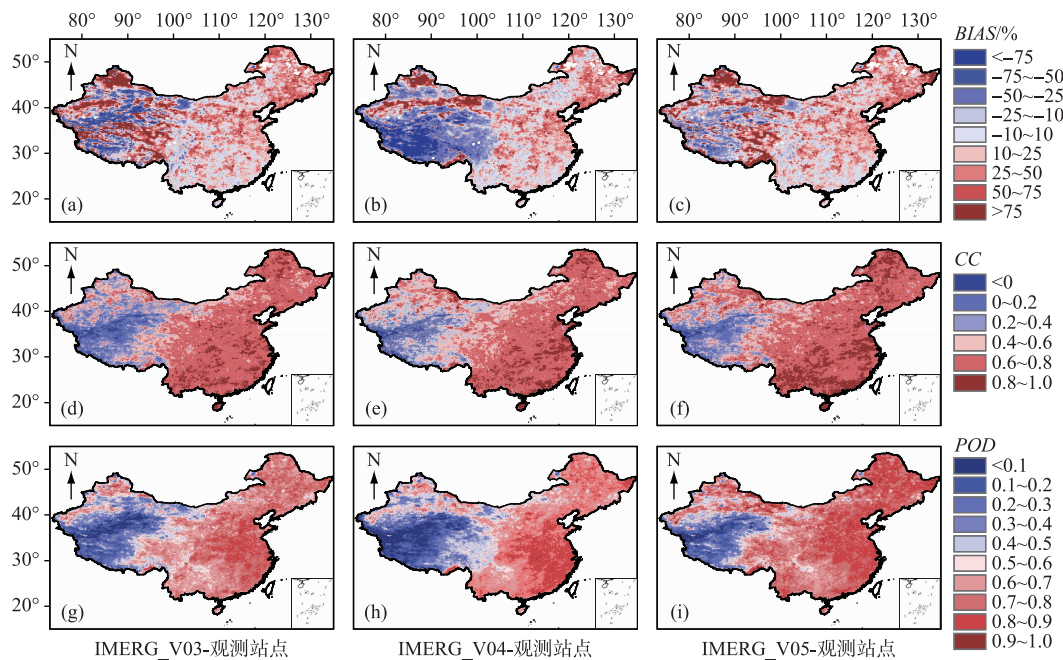


图 3 中国大陆地区 V3(左)、V4(中)、V5(右)日降水数据统计指标的空间分布:  
(a~c)为相对偏差(BIAS), (d~f)为相关系数(CC), (g~i)为降水命中率(POD)

Fig.3 Spatial distributions of statistical indices computed from the V3 (left), V4 (middle) and V5 (right) daily precipitation estimates over the Mainland China: (a~c) correlation coefficient (BIAS), (d~f) root mean square error (CC), and (g~i) probability of detection (POD)

2.1.2 网格尺度 为了能更加直观地了解各版本卫星数据的降水精度及误差,图 4 展示了栅格单元尺度下 IMERG 各版本卫星数据与地面观测逐日降水量之间的散点对比情况,同时表 2 给出了各类误差评估指标。



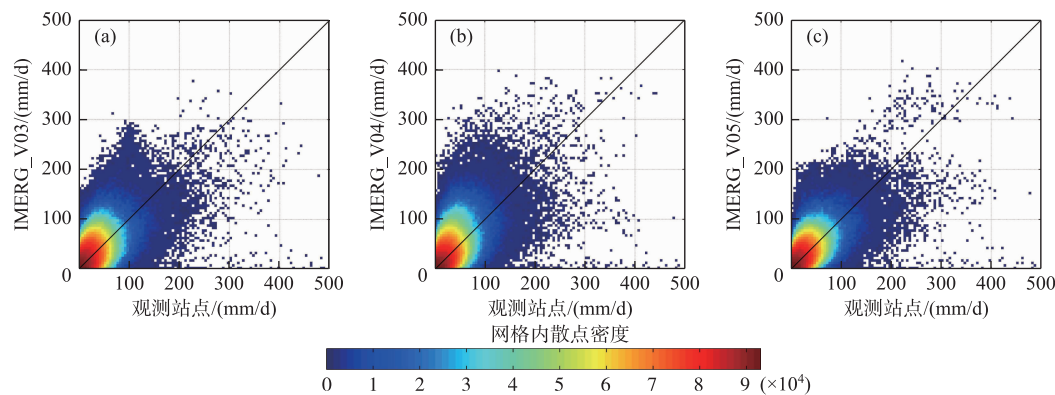


图 4 2014 年 4 月至 2016 年 1 月中国大陆 V3 (a)、V4 (b)、V5 (c) 卫星数据逐日降水量与地面观测数据对比彩色散点图

Fig.4 Comparisons of daily V3 (a), V4 (b), V5 (c) precipitation data and gauge observations over the Mainland China during the period April 2014 to January 2016

可以看出,3 个版本数据的散点聚集簇趋势皆高于 1:1 的对角线,且相对偏差 *BIAS* 均大于 0,表明 IMERG 数据相对于实际降水处于高估状态. 据表 2 相对偏差指数的显示(V3 的 *BIAS* 为 17.72%,V4 的 *BIAS* 为 17.64%,V5 的 *BIAS* 为 18.57%),V5 的高估情况最为明显,但是综合对比图 4a~c,V5 的散点聚集簇相对于 V3、V4 更接近于 1:1 对角线且具有较低的均方根误差,说明 V5 在精度上有所提升,且高估情况相对较轻,与相对偏差指数相矛盾. 结合表 3、图 3 及图 4,导致这种矛盾的原因主要是:①V5 数据在相关系数 *CC* 上相较于 V3、V4 整体提高了 0.03,这一特点也与 V5 相关系数在空间分布表现更好(图 3d~f)相呼应,说明 V5 数据与地面数据相关性更强,从而提升了 V5 与地面数据在散点图上的聚集程度;②图 3a~c 显示:与 V3、V4 相比,V5 在很大程度上改善了青藏高原及其附近地区的低估问题,而在中国大陆其他地区,3 个版本的相对偏差基本一致,因此 V3、V4 在中国大陆为尺度对相对偏差进行计算时会出现更多的正负抵消现象,而 V5 的相对偏差整体偏大,但是相对绝对偏差 *ABIAS* 较 V3、V4 分别降低了 3.55%、3.01%,也从侧面说明了 V5 在相对偏差计算过程中存在较少的正负抵消现象;③据图 4c,在 1~200 mm/d 的降水区间异常高估现象已得到很大缓解,这说明 V5 数据在降水高估问题已作出较大改进;同时在 200~400 mm/d 区间的低估现象也大大减少,V5 在这些降水区间的改进成为相关系数增加、相对绝对偏差减小的主要原因,同时 V5 对低估现象校正较多且校正幅度较大,对高估现象校正较少且校正幅度较小,因此在计算相对偏差过程中正负抵消现象较少,使得 V5 相对偏差表现出增大的趋势. 由此可以看出,V5 数据虽在精度上有所提升且解决了前期版本在一些区域的降水低估问题,对于降水高估现象也作出了较大的改进,但是降水高估现象仍然是主要问题;同是在极高雨强即 300~500 mm/d 降水区间的异常低估现象虽然有所减少但是仍然没有得到有效的解决,因此在未来版本中还需要进一步完善.

表 3 IMERG 与地面参考日降水产品的统计分析数据\*  
Tab.3 Statistical results for the daily IMERG versus observed precipitation

产品	<i>CC</i>	<i>ME</i> /(mm/d)	<i>RMSE</i> /(mm/d)	<i>BIAS</i> /%	<i>ABIAS</i> /%
V3	0.72	0.53	7.70	17.72	84.89
V4	0.72	0.53	7.87	17.64	84.35
V5	0.75	0.55	7.03	18.57	81.34

\* 阴影部分代表各评价指标最优统计值.

2.2 卫星数据及其误差时间分布特征

2.2.1 月尺度变化 图 5 给出了 IMERG 各版本数据与地面数据重合时间段内月平均降水及月平均偏差随时

间变化情况,其中 V3 重合时间段为 2014 年 4 月至 2016 年 1 月,V4 重合时间段为 2014 年 4 月至 2017 年 2 月,V5 重合时间段为 2014 年 4 月至 2017 年 12 月。

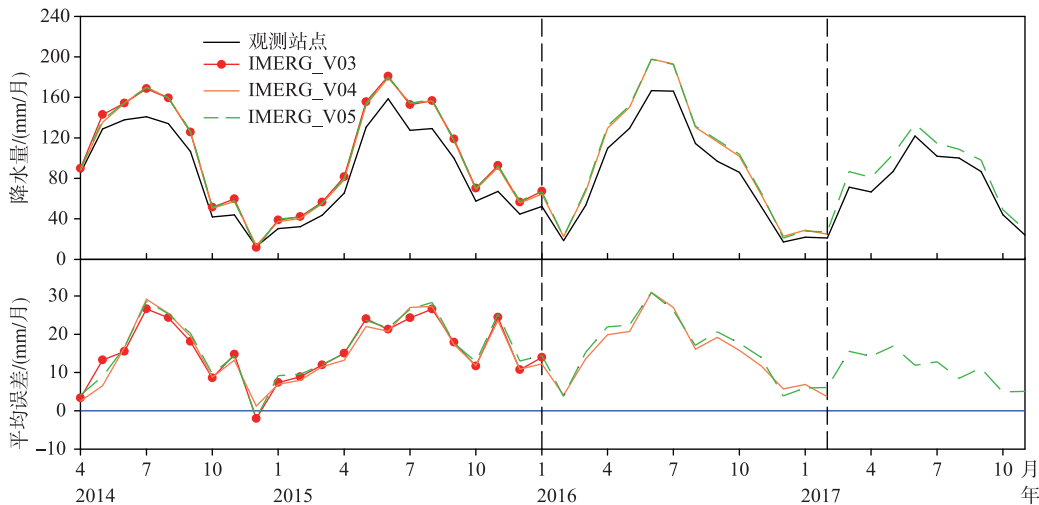


图 5 2014 年 4 月至 2017 年 12 月月平均降水(a)及月平均误差(b)时间序列

Fig.5 Time series of averaged monthly precipitation (a) and monthly mean error(b) of three IMERG versions versus gauge observations during the period April 2014 to December 2017

从 IMERG 各版本月平均降水值及月平均误差的表现来看,除 2014 年 12 月以外 IMERG 各版本数据相对于地面数据一直处于高估的状态,且在降水较多的月份高估问题更为明显. 在 IMERG 各版本数据重合时间段内,月平均降水及误差基本一致,这说明 V5 虽然有所改进,但是由于 3 个版本数据均采用了 GPCC 地面数据进行月度校正,因此效果仍然不够显著. 同时值得注意的是,V5 的高估程度在 2017 年夏季有所缓解,原因可能是:V5 版本在经过传感器更新之后,得到的原始数据在精度上稍有提升,同时经过了算法的改进,使得 V5 版本的高估问题得到改善. 由此可见,虽然 IMERG 数据依然存在高估问题,且 V5 算法相较 V3、V4 数据提升效果不明显,但是 V5 时期传感器及算法的变化使得高估问题得到了明显的改善,在一定程度上反映出 V5 传感器及算法变化的有效性,同时也反映出 V5 算法对前期数据的改进效果仍然不够,还需进一步改进.

2.2.2 季节性变化 为更加深入地了解 IMERG 不同版本卫星数据的精度季节性变化情况,从各数据重合的时间段(2014 年 4 月至 2016 年 1 月)中选取了自 2014 年 12 月到 2015 年 11 月一整年的数据将其分季节进行计算,给出了各版本数据季节性误差统计指数(表 4).

据表 4,3 个版本的  $ME$ 、 $BIAS$  均大于零,反映出 IMERG 数据在各季节都存在高估问题,这与图 5 的表现相一致. 其中,除冬季外 V5 在  $CC$ 、 $RMSE$ 、 $ABIAS$  方面都优于 V3、V4, $ME$ 、 $BIAS$  相较于 V3、V4 表现较差,但综合前文分析可知,由于 V5 对于降水高估问题的改进效果略显不足,导致 V5 平均误差以及相对偏差的增高,因此总体来看 V5 精度较 V3、V4 有一定的提升. 同时 V5 仍存在部分缺陷:①V5 冬季表现不够理想,精度较差,综合来说 V4 的精度相对较好;②相较于 V3、V4,V5 的降水命中率  $POD$  在春、夏两季有所提升,但在秋、冬两季表现较差,同时 V5 具有相对较高的误报率  $FAR$  以及较低的关键成功率  $CSI$ ,反映出其在降水事件捕捉能力方面的不足. 综合来看,V5 数据在精度上具有一定的改进,但是在冬季降水反演以及降水事件捕捉能力方面还有待进一步的提升.

卫星数据对于降水事件的捕捉能力直接影响到了卫星数据的精度,前文对于 IMERG 各版本数据精度季节性变化的分析中提到,V5 的降水误报率  $FAR$  以及关键成功率  $CSI$  表现较差,表明了 IMERG 数据对于降水事件的捕捉能力还存在不足. 因此为深入了解 IMERG 卫星数据对于各类降水事件的捕捉能力,同时也是为了给日降水贡献分布季节性变化分析提供参考,依据表 2 雨强大小划分了不同的阈值,并给出不同阈



值下 IMERG 各版本数据在降水命中率、误报率、关键成功率上的表现(图 6).

表 4 IMERG 与地面参考日降水产品的季节性统计分析数据\*

Tab.4 Statistical results of daily comparisons between IMERG and observed precipitation for different seasons

季节	产品	CC	ME/ (mm/d)	RMSE/ (mm/d)	BIAS/ %	POD	FAR	CSI
春季	V3	0.742	0.566	6.867	20.86	0.757	0.251	0.604
	V4	0.749	0.510	6.711	18.81	0.783	0.314	0.576
	V5	0.771	0.559	5.941	20.61	0.796	0.316	0.582
夏季	V3	0.721	0.788	9.806	17.34	0.769	0.275	0.595
	V4	0.714	0.825	10.726	18.16	0.758	0.265	0.596
	V5	0.759	0.839	8.857	18.45	0.803	0.299	0.598
秋季	V3	0.711	0.586	7.038	23.43	0.707	0.318	0.532
	V4	0.707	0.573	7.145	22.91	0.726	0.368	0.510
	V5	0.732	0.604	6.654	24.13	0.713	0.371	0.502
冬季	V3	0.739	0.173	3.587	18.07	0.524	0.366	0.403
	V4	0.778	0.191	2.927	19.86	0.632	0.448	0.418
	V5	0.762	0.199	3.271	20.68	0.530	0.440	0.374
年	V3	0.729	0.570	7.510	19.62	0.729	0.285	0.565
	V4	0.726	0.566	7.820	19.49	0.746	0.321	0.552
	V5	0.763	0.592	6.797	20.38	0.756	0.331	0.550

\* 阴影部分代表各评价指标最优统计值.

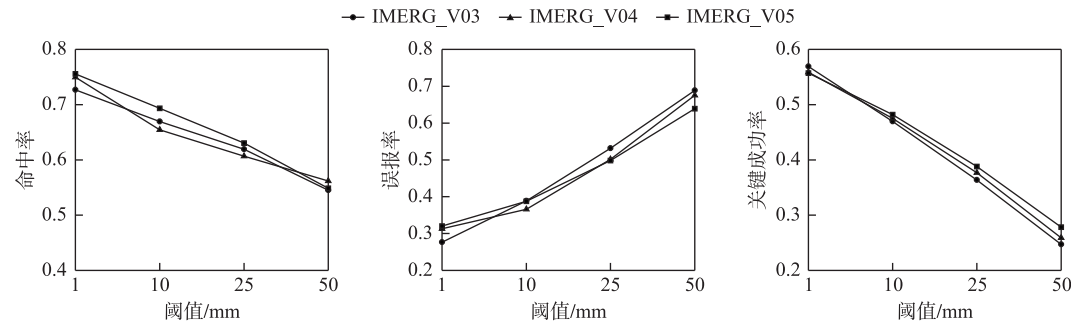


图 6 不同阈值下的 IMERG 各版本降水能力评估指标:(a) *POD*、(b) *FAR*、(c) *CSI*

Fig.6 Statistical comparisons of three IMERG estimates for different rainfall thresholds:(a) *POD*, (b) *FAR*, (c) *CSI*

通过图 6 可以看出,①随着阈值的不断增大,IMERG 各版本数据对于降水事件的捕捉能力逐渐下降,V5 虽在一定程度上具有小幅提升,但是这种微小的变化并不足以弥补 IMERG 存在的问题;②3 个版本的数据对于大雨以及暴雨事件的误报率分别超过 0.5、0.6,且关键成功率分别低于 0.4、0.3,表明了 IMERG 数据对于大雨以及暴雨这种高雨强的降水事件的捕捉监测能力存在极大的缺陷,而高雨强降水事件捕捉能力的不足将会严重影响卫星数据在水文模拟、洪涝灾害等方面的应用,因此在这些应用中使用 IMERG 数据时需要谨慎;③IMERG 数据在高雨强事件中的高误报率会在一定程度上抬高卫星数据反演的降水值,这也许是 IMERG 数据相对于地面数据一直处于高估状态的原因之一.

为详细研究 IMERG 数据在不同雨强下的表现,图 7 给出了地面数据以及 IMERG 各版本数据降水值在不同季节日降水强度区间上的贡献降水分布. 其中 X 轴表示超过降水事件判断阈值(1 mm/d)的雨强区间分布(取值范围为 1~256 mm/d),并使用指数分布的形式划分区间. Y 轴上的降水量代表每一个雨强区间的

网格平均日累计降水值。

据图 7,整体上所有 IMERG 降水产品在中低雨强与地面站点数据拟合较好,表现基本一致。在冬季(图 7a)降水反演中,V4 版本与地面站点数据更为接近;但是在春季、夏季、秋季(图 7b~d),V5 版本的降水趋势与地面站点数据的表现更为拟合,由此可见,IMERG 各版本数据在不同季节的贡献降水分布与其精度评估指标表现基本一致,表明了 V4 版本在冬季降水反演的优势。同时 IMERG 各版本数据在大于 8 mm/d 的雨强区间上开始出现高估的问题,春、冬两季严重高估区间主要集中在 16~64 mm/d,夏、秋两季严重高估区间主要集中在 16~128 mm/d 且高估现象更加严重,同时,地面观测降水贡献峰值主要集中与 16~32 mm/d 之间,而 IMERG 数据峰值则主要集中在 32~64 mm/d 之间。造成各类区间不同的原因主要是:①将上述区间根据表 2 的阈值划分来看,IMERG 主要是大雨和暴雨事件中出现高估的情况,春、冬两季的大雨和暴雨事件相较于夏、秋两季发生次数较少且雨强较低,IMERG 对于高雨强事件监测能力的不足,从而导致了高估区间的季节性差异;②IMERG 未校正数据存在低雨强高估、高雨强低估的问题<sup>[29]</sup>,校正算法为改善高雨强的低估问题,过度调高了未校正数据的降水值,从而抬升了各类降水事件的量值,导致了图 6b 中大雨及暴雨事件的误报率相对较高,这种高误报率导致 IMERG 数据降水贡献峰值向高雨强区间偏移,从而导致了地面数据与卫星数据的峰值区间的不同,进一步加重了 IMERG 数据的高估问题。

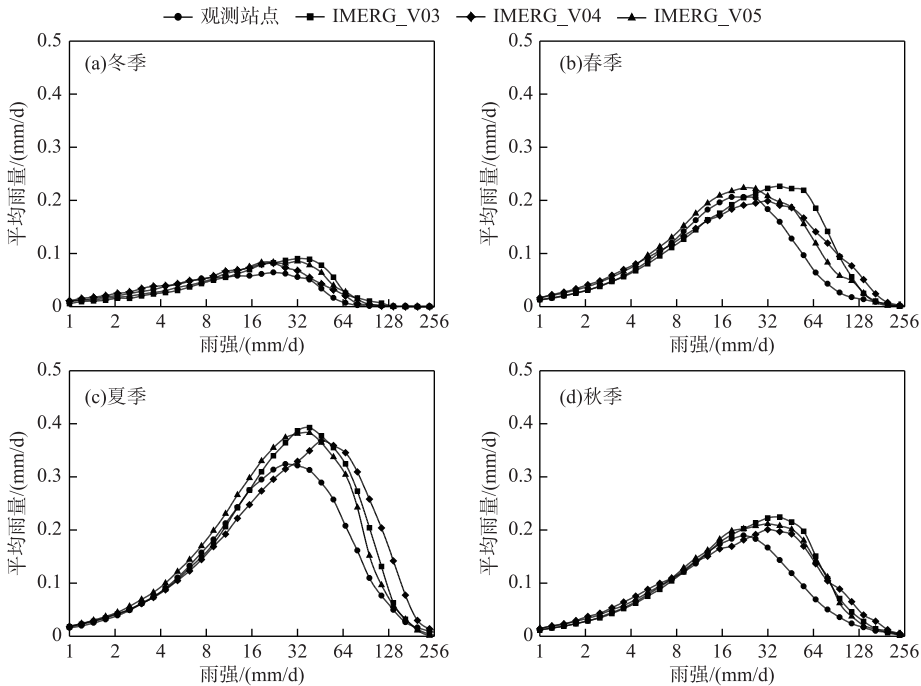


图 7 IMERG 卫星数据及地面观测数据不同季节日贡献降水分布

Fig.7 Daily precipitation amounts as a function of precipitation rate for the V3, V4, and V5 of IMERG estimates compared with the gauged observations

### 3 结论和展望

以中国气象局地面站点融合数据为基准参考,利用 8 种精度评价指标,综合评估了 IMERG 3 个版本卫星降水数据在中国大陆地区的精度特征,阐述了各版本数据精度指标时空分布特征,主要分析了最新版本数据 V5 的改进情况,发现了 IMERG 数据存在的问题,结论如下:

1) IMERG 各版本数据能够准确地捕捉到中国大陆地区的降水分布特征,但是由于地形、气候、地面校正站点等因素的综合限制,IMERG 各版本数据在中国大陆东部地区的精度明显优于西部地区,V5 虽然改善了

西部地区的降水低估问题,但是对于IMERG来说,提升西部地区的降水精度依然是一个难点.

2)整体上V5卫星数据的精度相较于前期版本表现更好,其中相关系数较V3、V4提升了0.03,均方根误差分别减少了0.67、0.84 mm,缓解了在前期版本中出现的低估现象,解决了V4在部分地区降水异常低估的问题,同时对于降水高估问题也作出了较大改进.

3)V5数据在精度提升后仍然存在部分不足:①冬季降水反演精度相对较低;②IMERG数据相对于实际降水仍然存在高估的问题,其中夏季及高雨强事件的降水高估问题最为突出③对于大雨以及暴雨时间的监测能力严重不足,在监测高雨强事件中表现较差.

4)校正算法对于历史数据的校正效果不够显著,一定程度上会影响到IMERG回推数据的精度,同时校正算法过度调高卫星数据高雨强事件下的降水值则会影响今后IMERG生产的数据质量.因此校正算法的改进对于日后IMERG数据精度的提高至关重要.

IMERG数据随着版本的更新变化,整体精度虽有一定的提高,但是数据存在的缺陷不能忽视,IMERG卫星降水产品仍需继续改进完善.本文的研究结论希望一方面能给数据使用者在进行水文模拟等应用时提供合理的依据,另一方面能为数据生产者在降水数据改进的过程中提供适当的参考.同时校正算法的缺陷也暴露出了目前IMERG反演系统中月尺度校正存在的问题,而IMERG团队也已在考虑日尺度校正,因此发展更高时间分辨率(日、小时等)的系统校正算法以及传感器层面的误差溯源问题将是卫星降水联合反演领域两个值得研究的方向.

#### 4 参考文献

- [1] Yong B, Liu D, Gourley JJ *et al.* Global view of real-time TRMM multisatellite precipitation analysis: Implications for its successor global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, **96**(2): 283-296. DOI:10.1175/BAMS-D-14-00017.1.
- [2] Allen MR, Ingram WJ. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, 2012, **419**(6903): 224-232. DOI:10.1038/nature11456.
- [3] 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. *Journal of Hydrology*, 2016, **533**: 152-167. DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.12.008.
- [4] Huffman GJ, Adler RF, Arkin P *et al.* The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, **78**(1): 5-20. DOI:10.1175/1520-0477(1997)078<0005:TG-PCPG>2.0.CO;2.
- [5] Shen Y, Pan Y, Yu JJ. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China. *Trans Atmos Sci*, 2013, **36**(1): 37-46.[沈艳,潘旻,宇婧婧等.中国区域小时降水量融合产品的质量评估.大气科学学报,2013, **36**(1): 37-46.]
- [6] Huffman GJ, Adler RF, Morrissey MM *et al.* Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *Journal of Hydrometeorology*, 2000, **2**(1): 36-50. DOI:10.1175/1525-7541(2001)002<0036:GPAODD>2.0.CO;2.
- [7] Huffman GA, Adler R, Bolvin DT *et al.* The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA): quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scale. *Journal of Hydrology*, 2007, **1**(8): 38-55. DOI:10.1175/JHM560.1.
- [8] Rosenfeld D. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. *Geophysical Research Letters*, 1999, **26**(20): 3105-3108. DOI:10.1029/1999GL006066.
- [9] Liu YB, Fu QN, Song P. Satellite retrieval of precipitation: An overview. *Advances in Earth Science*, 2011, (11): 1162-1172.[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, (11): 1162-1172.]
- [10] Joyce RJ, Janowiak JE, Arkin PA *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**(3): 287-296. DOI:10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2.
- [11] Hong Y, Hsu K, Sorooshian S. Precipitation estimation from remotely sensed information using ANN-Cloud Classification System. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, **36**(9): 1176-1190.

- [12] Mccollum JR, Krajewski WF, Ferraro RR *et al.* Evaluation of biases of satellite rainfall estimation algorithms over the continental United States. *J Appl Meteor*, 2002, **41**: 1065-1080. DOI:10.1175/1520-0450(2002)041<1065:EOBOSR>2.0.CO;2.
- [13] Gebremichael M, Krajewski WF. Characterization of the temporal sampling error in space-time-averaged rainfall estimates from satellites. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, **109**(D11): D1110. DOI:10.1029/2004JD004509.
- [14] Liu Z. Comparison of versions 6 and 7 3-hourly TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) research products. *Atmospheric Research*, 2015, **163**: 91-101. DOI:10.1016/j.atmosres.2014.12.015.
- [15] Liu JF, Chen RS, Han CT *et al.* Evaluating TRMM multi-satellite precipitation analysis using gauge precipitation and MODIS snow-cover products. *Adv Water Sci*, 2010, **21**(3): 343-348.[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.]
- [16] Su F, Hong Y, Lettenmaier DP. Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, **9**(4): 622-640. DOI: 10.1175/2007JHM944.1.
- [17] Zeng H, Lijuan LI, Jiuyi LI. The evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) in drought monitoring in the Lancang River Basin. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, **22**(2): 273-282. DOI: 10.1007/s11442-012-0926-1.
- [18] Bitew MM, Gebremichael M. Assessment of satellite rainfall products for streamflow simulation in medium watersheds of the Ethiopian highlands. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2011, **15**(4): 1147-1155. DOI:10.5194/hess-15-1147-2011.
- [19] Hou AY, Kakar RK, Neeck S *et al.* The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, **95**(5): 701-722. DOI:10.1175/BAMS-D-13-00164.1.
- [20] Huffman GJ, Bolvin DT, Braithwaite D *et al.* Developing the integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG). *Acta Paulista de Enfermagem*, 2012, **25**(1): 146-150.
- [21] Huffman GJ, Bolvin DT, Nelkin EJ. Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) technical documentation. NASA, 2018.
- [22] Sharifi E, Steinacker R, Saghafi B. Assessment of GPM-IMERG and other precipitation products against Gauge Data under different topographic and climatic conditions in Iran: Preliminary results. *Remote Sensing*, 2016, **8**(2): 135. DOI:10.3390/rs8020135.
- [23] Liu Z. Comparison of Integrated Multisatellite Retrievals for GPM (IMERG) and TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) Monthly Precipitation Products: Initial Results. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, **17**(3): 777-790. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0068.1.
- [24] Chen F, Li X. Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 monthly precipitation products over mainland China. *Remote Sensing*, 2016, **8**(6): 472. DOI:10.3390/rs8060472.
- [25] Siuki SK, Saghafi B, Moazami S. Comprehensive evaluation of 3-hourly TRMM and half-hourly GPM-IMERG satellite precipitation products. Taylor & Francis, Inc., 2017: 558-571.
- [26] 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 3B42V7? *Journal of Hydrometeorology*, 2015, **17**. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0059.1.
- [27] Liu G, Zhu ZW, Tan XH. Assessments of high resolution multi-satellite precipitation products on extreme storm event monitoring: A case study of typhoon "Rammasun" in 2014. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2017, (4): 39-48.[刘国, 朱自伟, 谭显辉. 高分辨率遥感降水产品对强降水的监测能力评估——以 2014 年“威马逊”台风为例. 亚热带资源与环境学报, 2017, (4): 39-48.]
- [28] Zhao H, Yang S, You S *et al.* Comprehensive evaluation of two successive V3 and V4 IMERG Final Run Precipitation Products over Mainland China. *Remote Sensing*, 2017, **10**(1): 34. DOI:10.3390/rs10010034.
- [29] Chen XH, Zhong RD, Wang ZL *et al.* Evaluation on the accuracy and hydrological performance of the latest-generation GPM IMERG product over South China. *J Hydraul Eng*, 2017, (10): 1147-1156.[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, (10): 1147-1156.]
- [30] Wang C, Tang G, Han Z *et al.* Global Intercomparison and Regional Evaluation of GPM IMERG Version-03, Version-04 and its latest Version-05 precipitation products: Similarity, Difference and Improvements. *Journal of Hydrology*, 2018,

- 564**: 342-356.
- [31] Hong Y, Hsu KL, Sorooshian S *et al.* Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, **36**(9): 1176-1190.
  - [32] Schneider U, Fuchs T, Meyer-Christoffer A *et al.* Global precipitation analysis products of the GPCP. Dtsch Wetterdienst, 2005.
  - [33] Aonashi K, Liu G, Awaka J *et al.* GSMaP passive microwave precipitation retrieval algorithm: Algorithm description and validation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2009, **87A**(3): 119-136. DOI:10.2151/jmsj.87A.119.
  - [34] Shen Y, Feng MN, Zhang HZ *et al.* Interpolation methods of china daily precipitation data. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, **21**(3): 279-286. [沈艳, 冯明农, 张洪政等. 我国逐日降水量格点化方法. 应用气象学报, 2010, **21**(3): 279-286.]
  - [35] Yong B, Ren LL, Hong Y *et al.* Hydrologic evaluation of Multisatellite Precipitation Analysis standard precipitation products in basins beyond its inclined latitude band: A case study in Laohahe basin, China. *Water Resources Research*, 2010, **46**(7): 759-768. DOI:10.1029/2009WR008965.
  - [36] Yong B, Chen B, Gourley JJ *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**: 77-87. DOI:10.1016/j.jhydrol.2013.10.050.
  - [37] Demaria EMC, Rodriguez DA, Ebert EE *et al.* Evaluation of mesoscale convective systems in South America using multiple satellite products and an object-based approach. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, **116**(D8).
  - [38] Tang G, Behrangi A, Long D *et al.* Accounting for spatiotemporal errors of gauges: A critical step to evaluate gridded precipitation products. *Journal of Hydrology*, 2018, **559**.
  - [39] Ma Y, Tang G, Long D *et al.* Similarity and error intercomparison of the GPM and Its Predecessor-TRMM Multisatellite Precipitation Analysis using the best available hourly gauge network over the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 2016, **8**(7): 569. DOI:10.3390/rs8070569.
  - [40] Tang G, Long D, Hong Y. Systematic anomalies over inland water bodies of High Mountain Asia in TRMM precipitation estimates: No longer a problem for the GPM era? AGU Fall Meeting, 2016.