

施丽娟,冯婉悦,雷勇,等,2022. GPM 日降水产品在中国大陆的准确性评估[J]. 气象,48(11):1428-1438. Shi L J, Feng W Y, Lei Y, et al, 2022. Accuracy evaluation of daily GPM precipitation product over Mainland China[J]. Meteor Mon, 48(11):1428-1438(in Chinese).

## GPM 日降水产品在中国大陆的准确性评估 \*

施丽娟<sup>1</sup> 冯婉悦<sup>2</sup> 雷 勇<sup>1</sup> 王智敏<sup>3</sup> 郑 清<sup>1</sup>

1 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

2 新疆维吾尔自治区气象技术装备保障中心, 乌鲁木齐 830002

3 新疆维吾尔自治区人工影响天气办公室, 乌鲁木齐 830002

**提 要:** 以中国 2423 个地面气象站点的降水传感器观测数据为基准, 采用定量统计指标(相关系数  $R$ 、均方根误差 RMSE、平均绝对误差 MAE、相对误差 RE)以及分类统计指标(探测率 POD、误报率 FAR、虚报漏报率 Bias、风险评分 ETS), 从不同空间尺度、不同时间尺度和不同降水强度三个维度, 分析了 GPM 降水产品的观测准确性, 以探究 GPM 卫星降水产品在中国大陆的适用性。结果表明: 从不同空间尺度特征看, GPM 降水在全国范围均呈现较高的观测准确性, 72% 的站点  $R$  值超过 0.7, 在华东地区最好, 西北区相对较差; 全国大部分区域都为正的相对误差, 各区 RE 集中分布在 0~20%。不同高程带内的准确性显示, GPM 产品对降水的高估情况在低海拔(<2000 m)、高海拔(>4000 m)地区较为明显, 在中海拔地区(2000~4000 m) GPM 降水数据适用性相对较好。从不同时间尺度特征看, GPM 降水产品与降水传感器实测降水年总量分布上较为一致, 两者的  $R$  为 0.75, 但在量值上存在一定程度的偏差, RMSE 为  $6.15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。从逐月结果看, GPM 降水产品与地面降水传感器的一致性在 1—10 月表现较好,  $R$  均在 0.7 以上, 11、12 月略低, 夏季误差值比冬季大。从不同降水强度特征看, POD 随着降水强度的增加而降低, GPM 降水产品对“中雨”强度降水事件的整体探测能力较优, 而在“小雨”和“暴雨”的探测能力稍弱。

**关键词:** GPM, 降水量, 准确性分析, 分类统计指标

中图分类号: P414

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.091601

### Accuracy Evaluation of Daily GPM Precipitation Product over Mainland China

SHI Lijuan<sup>1</sup> FENG Wanyue<sup>2</sup> LEI Yong<sup>1</sup> WANG Zhimin<sup>3</sup> ZHENG Qing<sup>1</sup>

1 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

2 Xinjiang Meteorological Technology and Equipment Support Center, Urumqi 830002

3 Xinjiang Weather Modification Office, Urumqi 830002

**Abstract:** Based on the gauges data of 2423 meteorological stations in China, continuous statistical metrics (correlation coefficient:  $R$ , root mean squared error: RMSE, mean absolute error: MAE, relative error: RE) and classified statistical metrics (probability of detection: POD, false alarm ratio: FAR, bias score: Bias, equitable threat score: ETS) are used to analyze the accuracy of Global Prediction Measurement (GPM) precipitation products from three dimensions including different spatial scales, different time scales and different precipitation intensity so as to explore the applicability of GPM satellite precipitation products over mainland China. The main results show that from different spatial scales, GPM precipitation has high observation accuracy in all regions, and the correlation coefficient ( $R$ ) values of 72% stations exceeded 0.7,

\* 国家重点研发计划(2018YFC1507502)和中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2019007)共同资助

2021 年 9 月 13 日收稿; 2022 年 8 月 10 日收修定稿

第一作者: 施丽娟, 主要从事协同观测研究、大气探测业务相关工作. E-mail: shilj@cma.gov.cn

with the best in East China and relatively poor in Northwest China. RE is concentrated in 0—20%. The accuracy of different altitude-zone elevations show that the overestimation of GPM is more obvious in low altitude ( $< 2000$  m) and high altitude ( $> 4000$  m) regions, and the applicability of GPM data is relatively good in mid-altitude regions (2000—4000 m). In terms of different temporal scales, the total annual precipitation of GPM is consistent with that of rain gauges, and the  $R$  is 0.75, but there is a certain deviation in the amount of precipitation, with RMSE being  $6.15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ . The consistency between GPM precipitation products and rain gauges is better from January to October, with the  $R$  above 0.7, slightly lower in November and December. The error value in summer is higher than that in winter, and the RE is positive mostly. In addition, the accuracy results of different precipitation intensity suggests that POD decreases with the increase of precipitation intensity. GPM precipitation products have a better detection ability for “moderate rain” intensity, while the detection ability for “light rain” and “heavy rain” is slightly weaker.

**Key words:** GPM (Global Prediction Measurement), precipitation, accuracy analysis, category statistical metric

## 引 言

精确的降水时空分布对预报、服务、水资源管理、农业生产和旱涝灾害监测等领域都具有重要的应用价值(Hou et al, 2014)。目前我国气象部门已在全国部署安装了 6 万多部自动站,用于降水量的加密观测。站点降水量的观测虽然在点尺度上具有较高的准确性,但由于中国地形复杂,且降水分布具有较高的时空变化性,基于站点降水观测的代表性受到一定局限,因此站点降水很难提供准确性较高的降水时空分布特征(Hu et al, 2014; Duan et al, 2016)。

卫星遥感观测反演的降水产品具有较高的时空分辨率,为研究降水空间分布提供了很好的技术支撑。卫星产品能够提供定时连续的时空降水信息,已广泛用于水文模型和区域气候的预测(Li et al, 2015)。1997 年美国 NASA(National Aeronautics and Space Administration)和日本 JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)共同发射了 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星,其降水产品主要应用于中低纬热带地区气候和水文研究(Mantas et al, 2015; 唐国强等, 2015)。TRMM 卫星为降水应用分析提供了丰富的观测产品,但它对固态降水和微量降水的探测灵敏度尚存在一定问题,全球空间覆盖范围也较为局限,尚不能满足预报服务的精细化需求。2014 年 2 月 28 日 NASA 和 JAXA 发射了新一代全球降水测量计划卫星 GPM(Global Precipitation Measurement),其

目标是实现对全球范围的降水观测。GPM 作为 TRMM 卫星的继承与改进,一方面降水产品的空间分辨率由  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  提升到  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ,时间分辨率由 3 h 提高到 30 min;另一方面通过其搭载的双频(Ku, Ka)雷达系统和高性能微波辐射计,显著增强了对弱降雨( $< 0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )和固态降水的探测能力(许小峰, 2020; Hou et al, 2014; 唐国强等, 2015)。Tang et al(2016)分析了 2014 年 4—12 月中国大陆地区 GPM 和 TRMM 数据的准确性,结果表明 GPM 优于 TRMM;李麒麟等(2018)利用国内 2014 年 4 月至 2016 年 12 月的 824 个气象站点日降水数据评估了 GPM 和 TRMM 在中国大陆和九大流域内的产品准确性,在日和月尺度上 GPM 降水产品均优于 TRMM。Xu et al(2017)利用 2014 年雨季青藏高原南部雨量站点数据对 GPM 和 TRMM 降水产品准确性进行对比验证,结果表明 GPM 对小雨事件的漏报在青藏高原南部较为明显,而 TRMM 则表现为对小雨事件的虚报。魏志明等(2017)对海河流域 IMERG 和 RMM 3B43 降水产品进行了对比分析,分析发现两种卫星降水产品均表现出一定的漏报问题。另外,也有部分研究针对 GPM 卫星降水产品在黑河流域(王思梦等, 2018)、长江流域(吴一凡等, 2019)、黄河流域(董国涛等, 2018)、天山山区(金晓龙等, 2016)等不同区域的适用性进行了研究。

根据众多研究可以知道,降水估测的准确性受很多因素的影响,如地理位置、地形特点、季节变化、天气过程等因素影响,具有较大的时间变率和空间差异性。现有的研究工作主要是针对 GPM 卫星降

水产品有部分流域、地区的准确性评估,研究数据一般时间较短、研究站点较少,评估结果的代表性比较局限。为此,本文在相关研究基础上,利用我国2019年1—12月2423个国家级自动气象站降水数据,分别从不同空间尺度、不同时间尺度和不同降水强度等三个维度,对GPM降水产品的准确性进行了全面、深入的评估。本文研究的意义在于,一方面,对全国2423个国家级自动站点的降水数据进行评估,为国内预报及服务业务选用合适的GPM降水产品提供参考依据,另一方面可为数据生产者提供改进误差校正算法的建议,为GPM卫星降水数据业务准入奠定基础。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究数据

#### 1.1.1 GPM卫星降水数据

本研究所用GPM数据来自于NASA降水测量计划网站(<https://gpm.nasa.gov/>)的3级融合降水产品IMERG(integrated multi-satellite retrievals for GPM),该产品是多卫星、多传感器以及多算法的GPM综合反演产品。GPM的核心观测平台由GPM搭载的双频降水雷达(DPR)和13通道微波成像仪(GMI)组成。其中DPR是全球首部星载主动遥感双频测雨雷达,由Ku波段雷达(13.6 GHz)和Ka波段雷达(35.5 GHz)组成,Ku波段雷达对于中强强度降水的探测效果较好,Ka波段雷达由于探测波段更短,对小降水粒子更加敏感。张晔祺和傅云飞(2018)对DPR不同波段、不同扫描方式及反演方法的降水产品进行了对比分析发现,Ka HS产品对小于 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的弱降水观测性能好,但是对大于 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水存在严重的低估;Ku PR受频率限制对小于 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的弱降水能力有限。陈涛等(2021)利用DPR分析了台风利奇马的雨带结构和云微物理特征,充分发挥了DPR在降水垂直结构观测上的优势。IMERG产品是将DPR的数据与GMI两者数据进行融合处理形成GPM雷达-辐射计联合产品(CORRA-G),再利用气候校准的方法与GPM卫星群的其他微波数据(PMW)相互校准,气候预报中心(CPC)再将该校准数据与地球同步轨道红外数据(IR)进行校准重新校准,最终形成经过融合、校准和插值处理的综合反演降水产品。

IMERG产品对数据的处理方法主要包括(Huffman et al, 2015):对微波估计进行相互校准;利用卡尔曼滤波进行准拉格朗日时间插值,提供更精细的时间和空间采样;提供微波校准红外估计,以填补卫星群微波数据(PMW)的观测空白;利用降水传感器观测数据进行偏差控制,包括日、月尺度的偏差订正;提供偏差估计。

IMERG提供Early Run、Late Run和Final Run等3种产品,Early Run产品使用向前推演技术,主要用于实时预报分析的需要;Late Run增加了后向推演,数据信息更为丰富;本文所采用的Final Run日降水产品在融合的过程中还利用了全球降水气候中心的月平均站点资料进行误差订正,在观测后两个月发布(孔宇, 2017),比Early Run和Late Run数据产品的精度更高(曾岁康和雍斌, 2019)。该产品2014年3月由美国NASA(National Aeronautics and Space Administration)降水系统PPS(Precipitation Processing System)发布开放,以HDF5格式存储。数据下载地址为[https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM\\_3IMERGDF\\_06/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGDF_06/summary),其空间分辨率为 $0.1^\circ$ ,时间分辨率为日(00时至次日00时,世界时),覆盖范围为 $90^\circ\text{N} \sim 90^\circ\text{S}$ 、 $180^\circ\text{W} \sim 180^\circ\text{E}$ ,降水产品对应的数据集变量名称为precipitationCal,数据单位为mm,数据类型为标准的NC格点数据。本文中卫星降水产品均取大于或等于 $0.1 \text{ mm}$ 的降水样本,以便与最小分辨率为 $0.1 \text{ mm}$ 的地面降水传感器的数据相匹配。

为了开展卫星发射前的算法开发和发射后产品评估,NASA在美洲、欧洲、亚洲、澳洲等地区14个国家建立了联合地基验证研究项目,用于评估目前的卫星降雨产品在不同的地理和气候条件下的准确性。Petracca et al(2018)利用意大利18个月22部雷达和大于3000个雨量计数据,评估分析了GPM降水产品,结果表明正常扫描(NS)降水产品在夏季的性能优于高灵敏度扫描(HS)和匹配扫描(MS)降水产品。Kim et al(2014)分析了朝鲜半岛地区的GPM降水产品性能,在降水量的比较中,引入了TRMM和雨量计的雨量数据,结果因雨量类型而异。Tan and Duan(2017)在新加坡,Sharifi et al(2016)在印度分别分析评估了IMERG与TRMM的反演精度,结果显示IMERG降水量值和空间分布等各项评估指标均优于TRMM。Liu(2016)对全球尺度下的IMERG-Final降水产品进行了评估,

IMERG-Final降水产品很好地捕捉到南北半球主要的强降水地区。

### 1.1.2 地面基准数据

本文使用的地面降水数据来自国家气象信息中心天擎平台的日数据产品,包括中国大陆 2423 个气象站点,数据字段为 pre\_time\_0808(08 时至次日 08 时,北京时),数据单位为 mm,观测数据分辨率为 0.1 mm。数据的质量控制以天擎平台结果为准,质量控制检查包括气候极值、台站历史极值、时空一致性、内部一致性等,取质量控制码标识为“正确”的观测数据作为样本数据,剔除缺测天数超过 10% 的气象站点数据(17 个站)。经质量控制后,具有有效样本的站点为 2406 个,本文主要利用该有效样本数据进行相关分析。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 资料匹配方案

时间尺度上,因地面数据和卫星产品数据经时区转换之后,地面 08—08 时(北京时)数据能直接对应到每日卫星产品 00—00 时(世界时),因此直接采用日期匹配的对应地面观测和卫星产品数据。日累计降水量是反映气候变化的重要因素,是洪涝、泥石流灾害等预报服务的重要产品,因此本文选取日降水量作为研究对象(李红梅等,2008;宁亮和钱永甫,2008;田冰等,2008;高荣等,2018)。

空间尺度上,由于将气象站点观测数据插值成空间数据后具有一定误差(金晓龙等,2018),因此,以站点降水传感器实测降水数据作为基准值,来分析评估 GPM 卫星降水产品的准确性。利用地面自动站坐标提取距离最近的 GPM 卫星降水栅格数据作为邻近点,对邻近点及其周边 8 个点构成的 9 点数据求取平均值作为 GPM 卫星降水与地面降水传感器的匹配样本,在站点尺度上评价 GPM 降水产品质量准确性。

### 1.2.2 定量分析指标

对卫星产品的精度评价方法中,一般采用皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient,  $R$ )、均方根误差(RMSE)等评价指标,大量研究也强调使用  $R$  在卫星降水产品准确性评价中的重要性(金晓龙等,2016)。本文为了对 GPM 卫星 IMERG 降水产品的准确性给出客观定量的误差评估,本文采用连续统计指标进行分析评估,以地面气象站点降水数据为参照值,利用连续统计指标,对两种数据的相

关性进行分析评估(程扬等,2020;李芳等,2020)。

综合各评价指标计算的复杂度及稳健度,本文采用的连续统计评估指标如下: $R$  用于衡量卫星数据与气象站点观测数据的线性相关程度;RMSE 反映卫星观测数据序列与真实值之间的关系,用来评价卫星降水产品整体误差水平;平均绝对误差(MAE)表示卫星降水数据和站点观测数据的平均绝对偏差程度;相对误差(RE)反映卫星降水数据对站点观测数据的偏离程度,用于评价卫星产品对实测站点误差的平均趋势。当卫星产品具有较低的 RE 和 RMSE 值及较高的  $R$  值时,表征其对降水的预测较好。各评价指标如下所示(Navarro et al, 2019):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}} \quad (1)$$

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

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - S_i| \quad (3)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - S_i)}{\sum_{i=1}^N S_i} \quad (4)$$

式中: $N$  为雨量站个数, $i$  为雨量站序号, $P_i$  为雨量站对应的卫星降水格点数据,其平均值为  $\bar{P}$ ;  $S_i$  为雨量站实测降水量,其平均值为  $\bar{S}$ 。

为分析在不同降水强度下 GPM 降水产品的观测精度,本文根据国家标准《降水量等级》(GB/T 28592—2012)(国家气象中心,2012)对降水强度划分为:小雨、中雨、大雨、暴雨,定量分析指标所用的不同降水强度的雨量范围(表 1)的定量分析指标分级范围。

### 1.2.3 分类评分指标

本文利用分类指标评估 GPM 卫星降水产品对于不同降水量级的捕获能力,包括探测率(POD)、误报率(FAR)、虚报漏报率(Bias)和风险评分(ETS),各指标见下式:

$$POD = \frac{H}{H + M} \quad (5)$$

$$FAR = \frac{F}{H + F} \quad (6)$$

$$Bias = \frac{H + F}{H + M} \quad (7)$$

$$ETS = \frac{H - H_s}{H + M + F - H_s} \quad (8)$$

式中： $H$  表示 GPM 降水产品和地面降水传感器同时大于阈值的次数； $F$  表示 GPM 降水产品大于阈值范围而地面降水传感器小于阈值范围的次数； $M$  表示 GPM 降水产品小于阈值范围而地面降水传感器大于阈值范围的次数； $Z$  表示 GPM 降水产品和地面降水传感器都小于阈值范围的次数，具体定义详见表 2。 $H_s$  的计算公式为(韦青等,2020;李麒麟等,2018;金晓龙等,2016):

$$H_s = \frac{(H + M)(H + F)}{H + M + F + Z} \quad (9)$$

表 1 不同降水强度等级雨量阈值和样本数

Table 1 Rainfall threshold and sample number of different precipitation intensity grades						
降水强度等级	定量分析指标 分级范围/mm	站点数/个	样本数/个	分类评分指标 分级阈值/mm	站点数/个	样本数/个
小雨	$0.1 \leq P \leq 10$	2406	209 880	$P \geq 0.1$	2406	271 192
中雨	$10 < P \leq 25$	2373	39 891	$P \geq 10$	2376	61 312
大雨	$25 < P \leq 50$	2216	15 383	$P \geq 25$	2231	21 421
暴雨	$50 < P \leq 100$	1732	6038	$P \geq 50$	1732	6038

表 2 GPM 卫星降水数据与雨量站实测数据关系  
Table 2 Relationship between GPM precipitation data  
and gauges-observed data

卫星降水探测结果	雨量站观测结果	
	观测值 $\geq$ 阈值	观测值 $<$ 阈值
观测值 $\geq$ 阈值	$H$	$F$
观测值 $<$ 阈值	$M$	$Z$

注:阈值取值范围见表 1。

Note: The vlaue ranges are shown in Table 1.

## 2 结果分析

### 2.1 不同空间尺度的准确性比较

#### 2.1.1 全国不同地区的准确性分析

图 1 为 GPM 卫星逐日降水产品在各气象站点检验精度指标的空间分布及箱型图。不同地区站点数及样本数见表 3。图 1a 显示 GPM 降水产品在中国陆地大部分站点都与实测数据呈现出较高的相关性,72%的站点  $R$  值超过 0.7。其中华东区平均相关系数最高, $R$  值为 0.78;西北区最低, $R$  值为 0.68。图 1b 箱型图显示不同区域相关性指标的分布情况,可以看到,华东区整体相关性略好于其他区域,异常值也较少。西北、西南区降水数据整体相关性偏低与其他区域,且较为离散,异常值(离群点)偏

这些指标被广泛应用于观测站点和卫星反演产品的比较中(金晓龙等,2018;肖柳斯等,2019)。POD 表示了实际降水被卫星正确探测到的概率,POD 越大表示卫星降水产品对降水事件的漏报率越小; $FAR$  表示卫星数据对降水事件的误报情况; $Bias$  用来反映卫星数据对比于站点观测数据的虚报( $Bias > 1$ )和漏报( $Bias < 1$ )的情况; $ETS$  反映了在随机情况下,在不同时空上卫星对实测降水综合探测的准确性, $ETS$  越大表示卫星降水产品对降水事件的综合预测能力越强。

多,个别站点相关系数低于 0.3。图 1c~1f 为 RMSE 和 MAE 的评估情况,GPM 降水产品显示出从东南沿海到西北内陆逐级递减的特点,华南误差值整体偏高,RMSE 主要分布在  $8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  以上,MAE 主要分布在  $3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  以上。东北、华北、西北误差值较低,平均 RMSE 均低于  $5.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,平均 MAE 均低于  $2.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在 RE 方面,GPM 降水产品在全国各区大部分观测站点都表现出较高的精确度,其 RE 集中分布在  $0 \sim 20\%$  区间内,GPM 降水产品整体上存在明显的虚报。

以上分析表明,华东、华南地区相关性较好,但是误差整体偏高,西北、华北地区相关性略低,但同时误差也较小。同时,全国大部分区域都为正的相对误差。

#### 2.1.2 不同高程带内的准确性分析

图 2 显示了 GPM 降水产品在不同高程带内的表现能力,不同高程区间站点数及样本数见表 4。GPM 降水产品与实测雨量的相关性  $R$  随海拔高度增加而逐级递减, $R$  的范围在  $0.63 \sim 0.76$ ,误差随海拔高度增加逐渐降低,RMSE 范围在  $3.0 \sim 6.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,MAE 范围在  $1.1 \sim 2.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在低海拔( $< 2000 \text{ m}$ )地区,GPM 降水产品具有最好的相关性,但也存在最高的偏差,平均  $R$  为 0.74,RMSE 为  $5.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,MAE 为  $1.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,平均

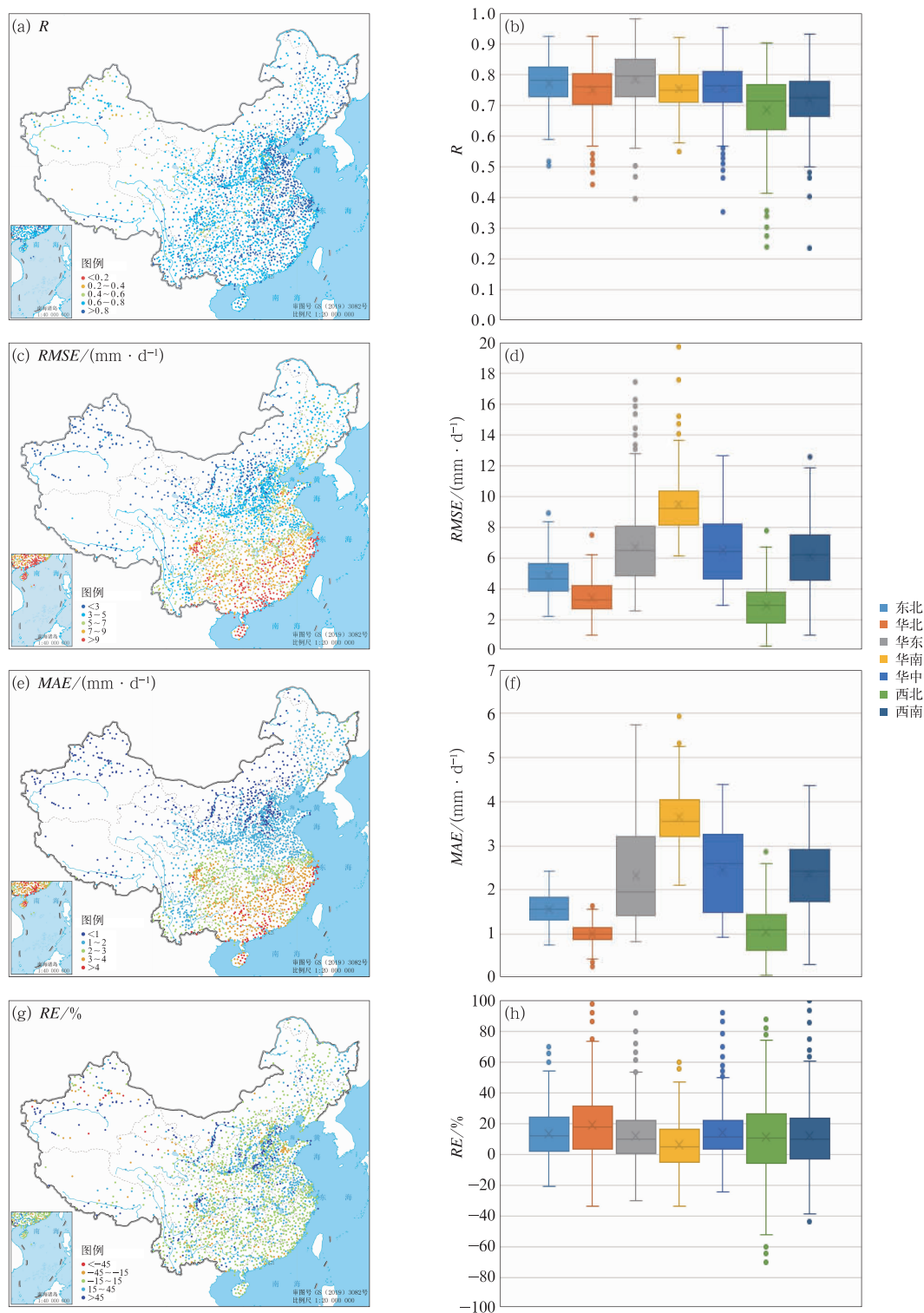


图 1 GPM 产品各评价指标的(a,c,e,g)空间分布及(b,d,f,h)箱型图

(a,b) $R$ , (c,d) $RMSE$ , (e,f) $MAE$ , (g,h) $RE$ 

(箱型图中, 5 条水平线自上向下依次为最大值、上四分位数、中位数、下四分位数和最小值, 中间“ $\times$ ”表示平均值, 最大、最小值以外的点为异常值; 图 1h 中相对误差大于 100% 或小于 100% 的异常值未给出)

Fig. 1 (a, c, e, g) Spatial distributions and (b, d, f, h) box plots of error evaluation for GPM products

(a, b)  $R$ , (c, d)  $RMSE$ , (e, f)  $MAE$ , (g, h)  $RE$ 

(In Fig. s. 1b, 1d, 1f, 1h, the five horizontal lines from top to bottom are orderly the maximum value, 25th percentile, median value, 75th percentile and minimum value; the “ $\times$ ” in the box represents average value; all the dots beyond the maximum and minimum are abnormal values. The abnormal values with  $RE > 100\%$  or  $RE < -100\%$  in Fig. 1h are omitted)

表 3 不同地区站点数及样本数

Table 3 Number of stations and samples in different areas					
区域	站点数/个	样本数/个	区域	站点数/个	样本数/个
华北	401	146327	华中	389	141878
东北	199	72610	西北	357	130262
华东	427	155541	西南	435	158664
华南	198	72199	总数	2406	877481

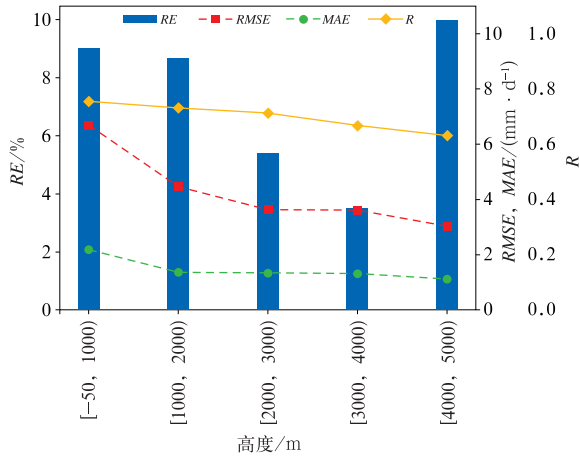


图 2 GPM 卫星产品在不同高程带内的精度比较  
Fig. 2 Error evaluation metrics for GPM product in different elevation zones

表 4 不同高程区间站点数及样本数  
Table 4 Number of stations and samples at different elevations

高程区间/m	站点数/个	有效样本数/个
−50~1000	1820	663711
1000~2000	426	155429
2000~3000	77	28100
3000~4000	58	21123
4000~5000	25	9118
总数	2406	877481

相对误差 RE 为 8.8%。中海拔地区(2000~4000 m)地区,GPM 偏差明显低于其他海拔地区,RMSE 在  $3.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  以下,MAE 在  $1.35 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  以下,RE 在 5.4%以下。但是在高海拔地区( $>4000 \text{ m}$ ),相对偏差显著偏高,RE 达到 9.97%。

以上分析说明,GPM 产品对降水的高估情况在低海拔( $<2000 \text{ m}$ )、高海拔( $>4000 \text{ m}$ )地区较为明显。在低海拔( $<2000 \text{ m}$ )地区高估降水的原因可能是,GPM 卫星探测到的降水量主要是大气层高空处的降水,可能有些降水在落地过程中蒸发,导致在某些地区地面实测降水传感器的降水量小于卫星降水量(Rozante and Cavalcanti, 2008)。高海拔( $>4000 \text{ m}$ )地区出现高估的原因可能由于高海拔地区地形较为复杂,且经常被积雪覆盖,下垫面的复杂情况对卫星观测精度有一定影响(Salio et al,

2015)。中海拔地区(2000~4000 m)地势相对平缓,适用性相对较好。

## 2.2 不同时间尺度的准确性比较

### 2.2.1 全年准确性分析

图 3 为地面降水传感器和 GPM 卫星观测的 2019 年全年降水总量分布。可以发现,GPM 卫星和地面降水传感器观测到的 2019 年全国降水总量自东南向西北递减,其中江南地区、华南地区全年降水量大于  $1600 \text{ mm}$ ,部分地区大于  $2000 \text{ mm}$ ,而西北地区、内蒙古地区的降水量基本小于  $400 \text{ mm}$ 。GPM 卫星观测的降水量等值线在空间分布上与地面降水传感器观测较为吻合,表明 GPM 卫星对年降水量的空间分布观测较为准确。但同时也注意到,GPM 卫星对华南局部降水量的虚报现象较为明显。

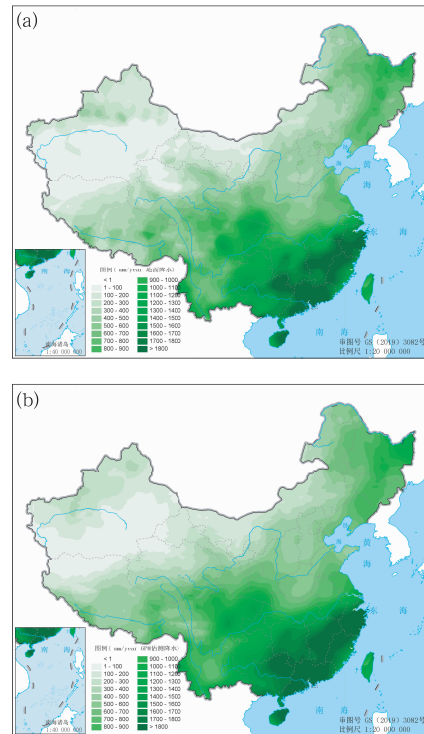


图 3 2019 年中国大陆(a)地面降水传感器与(b)GPM 卫星产品降水总量分布  
Fig. 3 Distribution of total precipitation of (a) ground rain-gauges and (b) GPM products over mainland China in 2019



以 2019 年 1—12 月全国 2423 个地面降水传感器数据为自变量,以 GPM IMERG 数据为因变量做一元线性回归分析(图略)。可以发现,全年 GPM 卫星与实测值的  $R$  值为 0.75, RMSE 为  $6.15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , MAE 为  $1.99 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,这说明 GPM 数据与实测数据整体上具有明显的相关特性与一致性,但存在一定程度的偏差。

2.2.2 不同季节的准确性分析

不同季节的准确性分析整体结果如图 4 所示,不同月份站点数及样本数见表 5。从全国整体  $R$  值的季节分布特征看,GPM 降水产品与地面降水传感器在全国范围的一致性在 1—10 月表现较好, $R$  均在 0.7 以上,最高出现在 2 月(0.81),最低出现在 11 月、12 月,分别为 0.6 和 0.66。从 7 个区域的季节分布看,各区在冬季均表现为较低的相关性,这可能与冬季降雨较少有关,其中东北、华北、西北的相关性较差, $R$  出现低于 0.3 的情况;春季各区相关系

数逐渐升高,到夏秋两季,达到相对稳定的趋势。

全国整体 RMSE 夏季月份较高,其中 8 月最高(9.98),冬季月份较低,11 月最低(2.29),这与地面实测降水量的时间变化十分接近。各区域的 RMSE 值都表现为相近的变化趋势,在降水量较大的月份表现为 RMSE 的峰值,其中华南、华中、华东在夏季的 RMSE 值明显高于其他区域。可以明显看到,随着我国主要雨带的自南向北推进, RMSE 的峰值最早出现在华南区的 5 月,达到  $14 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。MAE 的变化趋势与 RMSE 相似,在夏季误差值较大,冬季误差值最小。全国整体 RE 全年各月均为正的误差值,变化趋势自 1—11 月变化为  $7\% \sim 12\%$ ,12 月陡增至  $33.63\%$ 。大部分地区在冬、春两季出现 RE 的正偏差或者负偏差的波动,东北、华北波动较为明显,最大正偏差出现在华北 1 月,为  $66\%$ ,最大负偏差出现在东北 2 月,为  $-30\%$ 。

出现这样的季节变化可能是由于夏季相比于冬

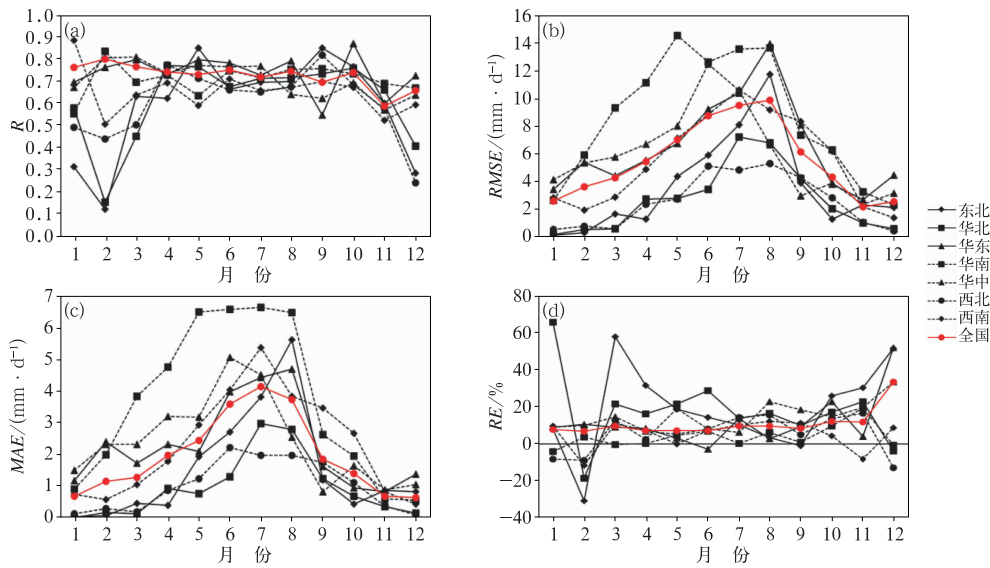


图 4 GPM 产品各评价指标的月分布  
(a)  $R$ , (b) RMSE, (c) MAE, (d) RE

Fig. 4 Error evaluation metrics for GPM products in different months

(a)  $R$ , (b) RMSE, (c) MAE, (d) RE

表 5 不同月份站点数及样本数

Table 5 Number of stations and samples in different months

月份	站点数/个	样本数/个	月份	站点数/个	样本数/个
1	2406	74530	7	2406	74547
2	2406	67300	8	2406	74553
3	2406	74553	9	2406	72145
4	2406	72148	10	2406	74558
5	2406	74540	11	2406	72151
6	2406	71920	12	2406	74536



季有更大的降水量,易使降水样本中出现较多的离群值(吴琼等,2017)。其中,华南、华中、华东的降水强度和个体序列波动相较于其他地区更大,因此这些区域夏季误差值要明显高于其他区域。

### 2.3 不同降水强度的准确性分析

图 5 分析了 GPM 卫星降水产品对于不同降水强度阈值(小雨、中雨、大雨、暴雨)的探测能力表现,不同降水强度站点数及样本数见表 6。GPM 降水产品的 POD 具有随降水强度的增加而降低的变化特征,其中“小雨”级别 POD 最高,为 0.86;而“暴雨”级别最低为 0.46。从 FAR 指数看,在“中雨”级别时明显小于其他降水强度级别,为 0.38,中雨级别以上随着降水强度增加,FAR 值增加,“暴雨”级别 FAR 最大为 0.52,同时还可以发现,“小雨”级别也有较大的 FAR 值,为 0.47。从 Bias 指数来看,GPM 降水产品在“小雨”级别的降水事件存在明显

的虚报( $Bias > 1$ ),Bias 值为 1.64。“中到大雨”级别降水强度 Bias 值接近于 1,说明 GPM 对中等强度的降水事件的判断相对较为准确,降水估测值最接近真实值。就 ETS 指标而言,在“中雨”强度级别上的评分最高,ETS 为 0.43,在“中雨”以上随着降水强度增加 ETS 逐渐降低,“暴雨”级别时评分为 0.30。同时注意到,在“小雨”强度级别上,ETS 评分偏低为 0.28。

以上分析表明,在不同空间区域,GPM 降水产品对降水事件的捕获准确率随着降水强度的增加而降低,同时,GPM 降水产品对“中雨”强度降水事件的整体探测能力较优,而在“小雨”和“暴雨”的探测能力稍弱。

## 3 结论与讨论

利用不同空间尺度特征、时间尺度特征、降水强

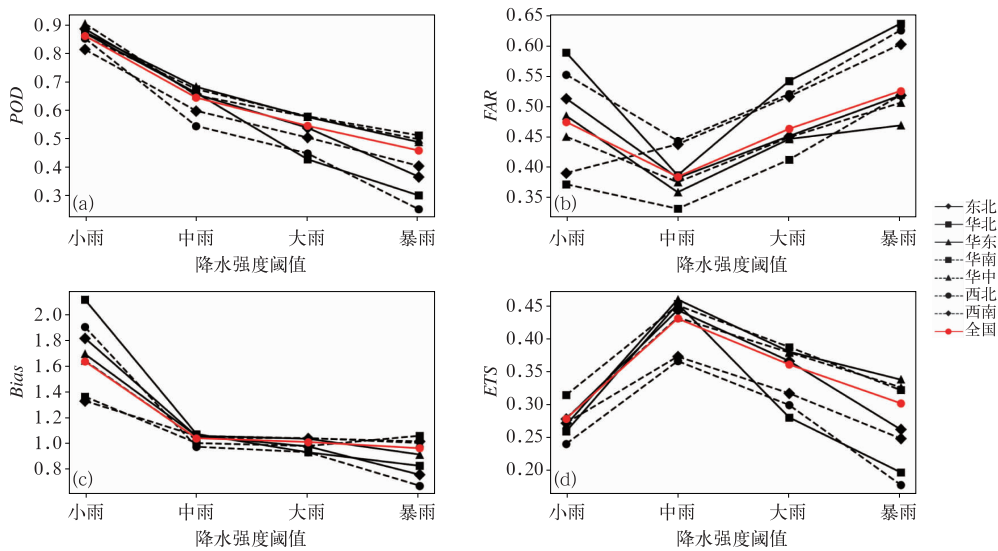


图 5 GPM 产品各评价指标随降水强度的分布

(a)POD,(b)FAR,(c)Bias,(d)ETS

Fig. 5 Error evaluation metrics for GPM products with different rainfall intensity

(a) POD, (b) FAR, (c) Bias, (d) ETS

表 6 不同降水强度站点数及样本数

Table 6 Number of stations and samples with different precipitation intensities

降水级别/mm	站点数/个	样本数/个
小雨[0.1,10.0)	2406	209880
中雨[10.0,25.0)	2373	39891
大雨[25.0,50.0)	2216	15383
暴雨[50.0,∞)	1732	6038
总数	2406	877481

度特征等方面的定量与分类评估指标,具体分析了 GPM 降水产品在我国陆地范围的准确性,主要结论如下:

(1)从不同空间尺度特征看,GPM 降水产品与中国大部分站点实测数据呈现出较高的相关性,72%的站点相关系数( $R$ )超过 0.7,其中华东区相关性最好,西北区相对略低。华东、华南地区相关性略好,但是误差整体偏高,西北、华北地区相关性略低,

但均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)较小。同时,全国大部分区域都为正的相对误差,即 GPM 降雨数据偏大,相对误差(RE)集中分布在 0~20%。GPM 降水产品与实测雨量的相关性随海拔高度增加而逐级递减,RMSE 和 MAE 随海拔高度也逐级递减。高海拔(4000~5000 m)地区出现较大的相对误差,这与高海拔地区地形较为复杂有关。在中海拔地区(2000~4000 m),GPM 降水数据适用性相对较好。

(2)从不同时间尺度特征看,GPM 降水产品与实测降水在 2019 年全年降水总量分布上较为一致, $R$  为 0.75,但存在一定程度的偏差,RMSE 为  $6.15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。GPM 降水产品与实测降水在全国范围的一致性在 1—10 月表现较好, $R$  均在 0.7 以上,11、12 月略低。东北、华北、西北在冬季的相关性出现低于 0.3 的情况。从误差的情况看,全国各区域夏季误差值较大,冬季误差值较小。全国整体上全年均为正的相对误差值,各季节均存在高估现象,东北、华北区在冬、春两季出现高估和低估现象的明显波动。

(3)从降水强度分布特征看,GPM 降水产品对降水事件的捕获准确率随着降水强度的增加而降低,GPM 降水产品对“中雨”强度降水事件的整体探测能力较优,而在“小雨”和“暴雨”的探测能力稍弱。

综上所述,GPM 卫星日降水数据在中国西北、华北区域的误差低于其他区域,在中海拔(2000~4000 m)地区准确性相对优于其他海拔地区;在非强降水季节误差相对低于其他季节,在中雨级别探测能力相对优于其他降水级别。

## 参考文献

- 陈涛,董林,罗玲,等,2021. 台风利奇马登陆期间的对流结构特征及对强降雨影响[J]. 气象,47(12):1433-1443. Chen T, Dong L, Luo L, et al, 2021. Convection structure and impact on severe precipitation during landing of Typhoon Lekima[J]. Meteor Mon, 47(12):1433-1443(in Chinese).
- 程扬,郭燕,齐鹏云,等,2020. GPM IMERGE 卫星遥感降水数据在巢湖流域的精度评价[J]. 水土保持研究,27(5):188-193. Cheng Y, Guo Y, Qi P Y, et al, 2020. Analysis of accuracy of GPM IMERGE precipitation data in Chaohu Basin[J]. Res Soil Water Conserv, 27(5):188-193(in Chinese).
- 董国涛,樊东,杨胜天,等,2018. GPM 与 TRMM 降雨数据在黄河流域适用性分析[J]. 水土保持研究,25(3):81-87. Dong G T, Fan D, Yang S T, et al, 2018. Analysis on the applicability of GPM and TRMM precipitation data in the Yellow River Basin[J]. Res Soil Water Conserv, 25(3):81-87(in Chinese).
- 高荣,宋连春,钟海玲,2018. 2016 年汛期中国降水极端特征及与 1998 年对比[J]. 气象,44(5):699-703. Gao R, Song L C, Zhong H L, 2018. Characteristics of extreme precipitation in China during the 2016 flood season and comparison with the 1998 situation[J]. Meteor Mon, 44(5):699-703(in Chinese).
- 国家气象中心,2012. 降水量等级:GB/T 28592—2012[S]. 北京:中国标准出版社. National Meteorological Centre, 2012. Grade of precipitation:GB/T 28592—2012[S]. Beijing: China Standards Press(in Chinese).
- 金晓龙,邵华,邱源,等,2018. TRMM 卫星降水数据在天山山区的校正方法研究[J]. 气象,44(7):882-891. Jin X L, Shao H, Qiu Y, et al, 2018. Correction method of TRMM satellite precipitation data in Tianshan Mountains[J]. Meteor Mon, 44(7):882-891(in Chinese).
- 金晓龙,邵华,张弛,等,2016. 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,31(12):2074-2085. Jin X L, Shao H, Zhang C, et al, 2016. The applicability evaluation of three satellite products in Tianshan Mountains[J]. J Nat Resour, 31(12):2074-2085(in Chinese).
- 孔宇,2017. 中国大陆 GPM/IMERG 产品的精度评估[D]. 南京:南京信息工程大学. Kong Y, 2017. Evaluation of the accuracy of GPM/IMERG over the mainland of China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 李芳,孔宇,高谦,2020. GPM/IMERG 产品在鲁南地区的精度评估[J]. 气象科技,48(4):474-481. Li F, Kong Y, Gao Q, 2020. Evaluation of GPM/IMERG products in Southern Shandong[J]. Meteor Sci Technol, 48(4):474-481(in Chinese).
- 李红梅,周天军,宇如聪,2008. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析[J]. 大气科学,32(2):358-370. Li H M, Zhou T J, Yu R C, 2008. Analysis of July—August daily precipitation characteristics variation in Eastern China during 1958—2000[J]. Chin J Atmos Sci, 32(2):358-370(in Chinese).
- 李麒麟,张万昌,易路,等,2018. GPM 与 TRMM 降水数据在中国大陆的精度评估与对比[J]. 水科学进展,29(3):303-313. Li Q L, Zhang W C, Yi L, et al, 2018. Accuracy evaluation and comparison of GPM and TRMM precipitation product over Mainland China[J]. Adv Water Sci, 29(3):303-313(in Chinese).
- 宁亮,钱永甫,2008. 中国年和季各等级日降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象,27(5):1010-1020. Ning L, Qian Y F, 2008. Analyses on trends of annual and seasonal four kinds of daily precipitation in China[J]. Plateau Meteor, 27(5):1010-1020(in Chinese).
- 唐国强,李哲,薛显武,等,2015. 赣江流域 TRMM 遥感降水对地面站点观测的可替代性[J]. 水科学进展,26(3):340-346. Tang G Q, Li Z, Xue X W, et al, 2015. A study of substitutability of TRMM remote sensing precipitation for gauge-based observation in Ganjiang River Basin[J]. Adv Water Sci, 26(3):340-346(in Chinese).
- 田冰,王裕宜,洪勇,等,2008. 泥石流预报中前期降水量与始发日降水量的权重关系——以云南省蒋家沟为例[J]. 水土保持通报,28(2):71-75. Tian B, Wang Y Y, Hong Y, et al, 2008. Weighted relation between antecedent rainfall and process precipitation in debris flow prediction—A case study of Jiangjia Gully in Yunnan

- Province[J]. Bull Soil Water Conserv, 28(2): 71-75 (in Chinese).
- 王思梦, 王大钊, 黄昌, 2018. GPM 卫星降水数据在黑河流域的适用性评价[J]. 自然资源学报, 33(10): 1847-1860. Wang S M, Wang D Z, Huang C, 2018. Evaluating the applicability of GPM satellite precipitation data in Heihe River Basin[J]. J Nat Resour, 33(10): 1847-1860 (in Chinese).
- 韦青, 代刊, 林建, 等, 2020. 2016—2018 年全国智能网格降水及温度预报检验评估[J]. 气象, 46(10): 1272-1285. Wei Q, Dai K, Lin J, et al, 2020. Evaluation on the 2016—2018 fine gridded precipitation and temperature forecasting[J]. Meteor Mon, 46(10): 1272-1285 (in Chinese).
- 魏志明, 岳官印, 李家, 等, 2017. 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, 37(2): 171-176. Wei Z M, Yue G Y, Li J, et al, 2017. Comparison study on accuracies of precipitation data using GPM and TRMM product in Haihe River Basin[J]. Bull Soil Water Conserv, 37(2): 171-176 (in Chinese).
- 吴琼, 仰美霖, 窦芳丽, 2017. GPM 双频降水测量雷达对降雪的探测能力分析[J]. 气象, 43(3): 348-353. Wu Q, Yang M L, Dou F L, 2017. Study of GPM dual-frequency radar in detecting snow[J]. Meteor Mon, 43(3): 348-353 (in Chinese).
- 吴一凡, 张增信, 金秋, 等, 2019. GPM 卫星降水产品在长江流域应用的精度估算[J]. 人民长江, 50(9): 77-85, 152. Wu Y F, Zhang Z X, Jin Q, et al, 2019. Accuracy evaluation of GPM precipitation product in Yangtze River Basin[J]. Yangtze River, 50(9): 77-85, 152 (in Chinese).
- 肖柳斯, 张阿思, 闵超, 等, 2019. GPM 卫星降水产品在台风极端降水过程的误差评估[J]. 高原气象, 38(5): 993-1003. Xiao L S, Zhang A S, Min C, et al, 2019. Evaluation of GPM satellite-based precipitation estimates during three tropical-related extreme rainfall events[J]. Plateau Meteor, 38(5): 993-1003 (in Chinese).
- 许小峰, 2020. 奥林匹克山气象试验: 对雷达卫星(GPM)的地空观测验证与应用[J]. 气象科技进展, 10(1): 2-3, 6. Xu X F, 2020. Meteorological experiment at Olympic Mountain[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(1): 2-3, 6 (in Chinese).
- 曾岁康, 雍斌, 2019. 全球降水计划 IMERG 和 GSMaP 反演降水在四川地区的精度评估[J]. 地理学报, 74(7): 1305-1318. Zeng S K, Yong B, 2019. Evaluation of the GPM-based IMERG and GSMaP precipitation estimates over the Sichuan region[J]. Acta Geogr Sin, 74(7): 1305-1318 (in Chinese).
- 张晔祺, 傅云飞, 2018. GPM 卫星双频测雨雷达探测降水结构的个例特征分析[J]. 大气科学, 42(1): 33-51. Zhang A Q, Fu Y F, 2018. The structural characteristics of precipitation cases detected by dual-frequency radar of GPM satellite[J]. Chinese J Atmos Sci, 42(1): 33-51 (in Chinese).
- Duan Z, Liu J Z, Tuo Y, et al, 2016. Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales[J]. Sci Total Environ, 573: 1536-1553.
- Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al, 2014. The global precipitation measurement mission[J]. Bull Am Meteor Soc, 95(5): 701-722.
- Hu Z Y, Zhang C, Hu Q, et al, 2014. Temperature changes in Central Asia from 1979 to 2011 based on multiple datasets[J]. J Climate, 27(3): 1143-1167.
- Huffman G J, Bolvin D T, Braithwaite D, et al, 2015. Day 1 IMERG final run release notes[EB/OL]. NASA Doc, 9pp.
- Kim J H, Ou M L, Park J D, et al, 2014. Global precipitation measurement (GPM) ground validation (GV) prototype in the Korean Peninsula[J]. J Atmos Ocean Technol, 31(9): 1902-1921.
- Li C F, Zhang C, Luo G P, et al, 2015. Carbon stock and its responses to climate change in Central Asia[J]. Glob Change Biol, 21(5): 1951-1967.
- Liu Z, 2016. Comparison of integrated multisatellite retrievals for GPM (IMERG) and TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) monthly precipitation products: initial results[J]. J Hydrometeorol, 17(3): 777-790.
- Mantas V M, Liu Z, Caro C, et al, 2015. Validation of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes[J]. Atmos Res, 163: 132-145.
- Navarro A, García-Ortega E, Merino A, et al, 2019. Assessment of IMERG precipitation estimates over Europe[J]. Remote Sens, 11(21): 2470.
- Petracca M, D'Adderio L P, Porcù F, et al, 2018. Validation of GPM dual-frequency precipitation radar (DPR) rainfall products over Italy[J]. J Hydrometeorol, 19(5): 907-925.
- Rozante J R, Cavalcanti I F A, 2008. Regional Eta model experiments: SALLJEX and MCS development[J]. J Geophys Res: Atmos, 113(D17): D17106.
- Salio P, Hobouchian M P, Skabar Y G, et al, 2015. Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network[J]. Atmos Res, 163: 146-161.
- Sharifi E, Steinacker R, Saghafi B, 2016. Assessment of GPM-IMERG and other precipitation products against gauge data under different topographic and climatic conditions in Iran: Preliminary results[J]. Remote Sens, 8(2): 135.
- Tan M L, Duan Z, 2017. Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore[J]. Remote Sens, 9(7): 720.
- Tang G Q, Ma Y Z, Long D, et al, 2016. Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales[J]. J Hydrol, 533: 152-167.
- Xu R, Tian F Q, Yang L, et al, 2017. Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan Plateau based on a high-density rain gauge network[J]. J Geophys Res: Atmos, 122(2): 910-924.

(本文责编: 俞卫平)