暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

中国大陆IMERG和GSMaP小时降水产品适用性评估

陈双 陈涛 曹勇 杨舒楠 解晋

Performance assessment of hourly precipitation products from IMERG and GSMaP over mainland China

CHEN Shuang，CHEN Tao，CAO Yong，YANG Shunan，XIE Jin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-050

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

IMERG降水产品在2021年台风“烟花”降水过程的检验分析

Verification and analysis of IMERG during the precipitation process of Typhoon In-Fa in 2021

暴雨灾害. 2024, 43(1): 73-83 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-046

GPM-IMERG日降水数据在内蒙古地区的适用性分析

Applicability analysis of GPM-IMERG daily precipitation data in Inner Mongolia

暴雨灾害. 2020, 39(3): 293-299 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.010

多卫星融合降水产品对2015—2020年登陆浙江台风降水的监测能力评估

Evaluation of monitoring ability of the integrated multi-satellite retrievals for precipitation during typhoon landing in Zhejiang from 2015 to 2020

暴雨灾害. 2023, 42(1): 57-66 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-015

国家级降水融合产品在长江流域的适用性评估

Assessing the applicability of national precipitation merged products in the Yangtze River Basin

暴雨灾害. 2020, 39(4): 400-408 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.010

两套新型高分辨率再分析降水资料在湖南年季尺度上的适用性评估

Applicability evaluation of two sets of new high-resolution reanalysis precipitation data on annual and seasonal scale in Hunan

暴雨灾害. 2021, 40(2): 167-173 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.008

多源融合实况分析1 km网格降水产品在广东省暴雨过程中的准确性评估

Assessment of multi-source observation merged 1 km-grid precipitation product during the disastrous rainstorms in Guangdong

暴雨灾害. 2023, 42(6): 679-691 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-242

关注微信公众号，获得更多资讯信息

陈双,陈涛,曹勇,等.2026.中国大陆 IMERG 和 GSMaP 小时降水产品适用性评估[J].暴雨灾害,45(2):263−276. CHEN Shuang, CHEN Tao, CAO Yong, et al. 2026. Performance assessment of hourly precipitation products from IMERG and GSMaP over mainland China [J]. Torrential Rain and Disasters,45(2):263−276 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−050

中国大陆 IMERG 和 GSMaP 小时降水产品适用性评估

陈双, 陈涛, 曹勇, 杨舒楠, 解晋

(国家气象中心, 北京 100081)

摘　要: 中国幅员辽阔, 地形和气候类型多样, 卫星反演降水产品在不同区域的适用性差别较大。基于国家气象观测站 2019—2023 年逐小时地面降水观测数据, 首先分析了中国大陆区域 IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM)_V7 (以下简称 IMERG) 和 GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation)_V8 (以下简称 GSMaP) 两种卫星反演小时降水产品的分布特征, 并采用定量和分类统计评估方法对比两种产品不同区域、不同月份及不同时段的误差特征, 最后探讨了二者在不同天气背景下的适用性差异。结果表明: 两种产品普遍高估弱降水事件频次、低估强降水事件频次, 尤以 GSMaP 产品高估弱降水事件频次更明显, 其平均小时雨强较地面观测一致偏弱, IMERG 产品不同雨强等级频次分布更接近地面观测, 其平均小时雨强整体较地面观测虽然同样偏弱, 但在西北地区东部、西南地区等区域较地面观测偏强; 两种产品对西南地区秋冬季绵阴雨及黄淮以北地区冬季降雪天气的晴雨判识能力均较低, 其中, GSMaP 产品较 IMERG 产品关键成功指数略高, 与地面观测相关性也更好; 二者在江南、江淮地区的春季降水及淮河流域秋季降水中的表现优于其他雨季, 而对华南前汛期, 尤其是午后至前半夜以暖区对流为主的降水, 晴雨判识能力均较弱, 误差显著增加。对比显示, IMERG 产品在各主要雨季中表现更优, 特别是在 7—8 月主汛期, 空报率较低, 关键成功指数显著高于 GSMaP 产品, 相关性也好于 GSMaP 产品。

关键词: 卫星反演降水; IMERG; GSMaP; 误差分析; 适用性评估

中图法分类号: P412　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−050

Performance assessment of hourly precipitation products from IMERG and GSMaP over mainland China

CHEN Shuang, CHEN Tao, CAO Yong, YANG Shunan, XIE Jin

(*National Meteorological Centre*, *Beijing* 100081)

Abstract: Precipitation in China exhibits high diversity and significant regional differences, leading to considerable variability in the applicability of satellite-derived precipitation products. Using hourly surface observations from national meteorological stations (2019–2023), this study evaluates IMERG_V7 (hereafter IMERG) and GSMaP_V8 (hereafter GSMaP) two hourly satellite products over mainland China. Spatial patterns and error characteristics are compared across regions, months, and time periods using quantitative and categorical statistics, and applicability under different weather conditions is assessed. The result are as follows. Both products overestimate light precipitation frequency and underestimate heavy precipitation frequency, with GSMaP showing a stronger overestimation of light events and weaker mean intensities. IMERG more closely matches observed intensity distributions and is locally stronger in eastern Northwest and Southwest China. Both perform poorly for persistent autumn–winter rainfall in Southwest China and winter snowfall north of Huang–Huai, though GSMaP shows slightly higher critical success index (CSI) and correlation in these cases. Performance is better for spring rainfall in Jiangnan/Jianghuai and autumn rainfall in the Huai River Basin, but weaker for pre-flood season convection in South China. Overall, IMERG outperforms GSMaP in major rainy seasons, particularly July–August, due to a lower false alarm rate and higher CSI and correlation.

Key words: satellite retrieved precipitation; IMERG; GSMaP; error analysis; applicability assessment

收稿日期: 2025−03−14; **定稿日期**: 2025−09−07

资助项目: 新疆维吾尔自治区重点研发专项 (2022B03027-2); 国家重点研发计划项目 (2024YFC3012404, 2019YFC1510404)

第一作者: 陈双, 主要从事暴雨雪天气机理分析及监测预报技术研究。E-mail: schen520@live.cn

通信作者: 曹勇, 主要从事短期降水预报技术研究。E-mail: caoyong@cma.gov.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

引 言

降水作为地球水循环的关键组成部分，在天气预报、气候变化、全球水文和能量循环及生态学研究中具有重要的应用价值 (Barrett and Beaumont, 1994; Kidd and Levizzani, 2011; Naud et al., 2020)。高时空分辨率的降水数据，对于提升强降水事件的监测与预警能力具有重要意义，可有效辅助防范如洪水、泥石流、山体滑坡等次生灾害的发生 (Ebert et al., 2007)。星载遥感反演降水数据具有时空分辨率高、覆盖范围广等优势，能有效弥补雨量站空间代表性不足 (Villarini et al., 2008) 及地基天线雷达易受外部环境干扰的局限性 (Guo et al., 2016)。融合主被动微波的多传感器降水反演产品在分辨率和精度上较单一传感器反演产品有显著提升，代表性产品如基于 GPM 的 IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) 产品 (Huffman et al., 2023) 和 GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) 产品 (Shige et al., 2009) 受到较多关注。然而，受限于反演机制及传感器性能 (Tan et al., 2016)，产品仍存在误差，需在区域尺度上开展适用性评估以提升其可用性。

国内外学者从多角度系统研究了 IMERG 产品和 GSMaP 产品的误差特征。结果表明，尽管二者能较好反映降水的时空分布特征，但其可靠性仍受到气候类型、地面观测站覆盖程度、卫星反演算法等多种因素影响 (Sun et al., 2018; Pradhan et al., 2022)，存在一定的地理差异。地理分布上，IMERG 产品在中国低纬度地区的精度优于高纬度地区 (Chen and Li, 2016; 曲学斌等, 2020)，在湿润地区对强降水反演的精度优于干旱地区对弱降水反演的精度 (Wu et al., 2018)，表明其降水反演性能受纬度和气候环境的共同影响。此外，两种产品的精度普遍随海拔升高而降低 (Wang et al., 2019)，平原地区优于高原山区 (Trinh-Tuan et al., 2019; 曾岁康和雍斌, 2019)。受降水系统结构和相态季节性变化影响，产品精度也呈现出季节差异，通常夏季优于冬季 (廖荣伟等, 2015; Navarro et al., 2019)。在总体误差分析之外，一些研究还关注不同降水量级的误差特征。陈爱军等 (2018) 指出，IMERG 产品与国家气象信息中心基于地面雨量计的逐日降水分析产品 CGDPA (China Gauge-Based Daily Precipitation Analysis) 在微量降水和中雨差异较大，而对其他雨强估计较为一致。Wang 等 (2019) 进一步分析表明，IMERG 产品对弱降水判识能力有限，但对中等强度降水具有较高精度。针对典型强降水事件的研究表明，IMERG 产品与 GSMaP 产品在中小尺度强降水监测中具备一定应用潜力，但在降水落区定位和动态演变追踪方面仍有待提升 (何爽爽等, 2018; 李伶杰等, 2018)。因此，尽管 IMERG 产品和 GSMaP 产品在揭示降水时空分布方面具有重要应用潜力，但其精度受区域性、季节性等多种因素局限，仍需进一步评估与改进，以提升其精细化降水监测和应用能力。

已有研究成果为开展 IMERG 产品和 GSMaP 产品在不同地理区域和气候背景下的推广及优化提供了重要参考。然而，目前的相关研究多集中于日尺度及以上的数据评估。例如，针对 IMERG产品的研究超过 80% 的工作聚焦于日值及更长时间尺度，限制了对卫星降水产品在更高时间分辨率下误差特征的深入认知与实际应用 (Pradhan et al., 2022)。灾害性天气过程通常与中小尺度天气系统密切相关，对小时甚至分钟级降水数据的准确性提出更高要求。目前针对小时尺度卫星反演降水产品的研究，多以典型降水事件为分析对象，基于中国大陆区域的长时段、系统性评估工作较少。此外，中国大陆雨季类型多样，时段各异，包括江南春雨期、华南前汛期、江淮梅雨期、华北和东北雨季、华南后汛期、淮河秋雨期等主要雨季 (朱乾根等, 2000)，各雨季降水过程受不同尺度天气系统主导，表现出明显的复杂性与不确定性。同一降水过程也可能并存多种尺度降水机制，进而影响卫星降水产品在不同时空条件下的准确性。因此，深入开展小时尺度卫星降水产品的误差分析，特别是在不同天气气候背景下的适用性评估，对提升卫星降水反演产品精度认知和拓展实际应用具有重要意义。

本文基于 2019—2023 年国家气象站逐小时降水资料，采用定量分析与分类统计相结合的方法，对 IMERG 与 GSMaP 小时降水产品在中国大陆不同天气气候背景下的适用性进行系统评估，旨在揭示 IMERG 产品与 GSMaP 产品在中国大陆复杂天气气候条件下的探测能力，为开展其灾害性天气监测及应用提供参考依据。

1 研究区域、资料和方法

1.1 研究区域

本文以中国大陆为研究区域，该区域地形复杂，海拔自西向东逐渐降低 (图 1)。受季风气候影响，降水从东南沿海到西北内陆逐渐减少，夏季降水量显著高于其他季节。中国大陆区域幅员辽阔，地形和气候类型多样，卫星反演降水精度易受地形及气候

特征等因素影响 (Wedajo et al., 2020), 本文参考《中国气象地理区划手册》(中国气象局预测减灾司, 2006), 将中国大陆区域划为东北 (DB)、华北 (HB)、内蒙古 (NMG)、西北 (XB)、黄淮 (HH)、江淮 (JHUAI)、江汉 (JHAN)、江南 (JN)、西南 (XN)、西藏 (XZ)、华南 (HN) 共 11 个区域, 开展分区评估, 具体区域划分见图 1。

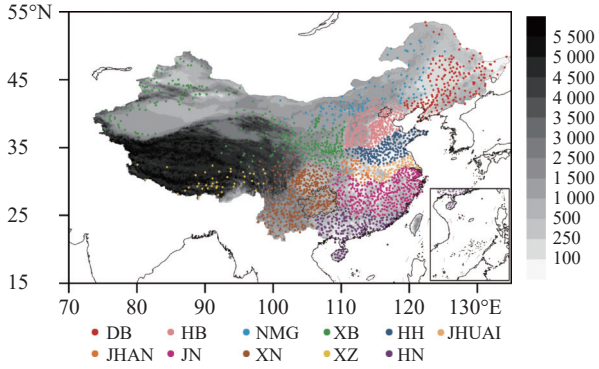


图 1 中国大陆不同区域降水评估站点 (圆点) 及地形 (阴影, 单位: m) 分布 (不同颜色的站点代表不同气象地理区域, 中国台湾地区由于站点降水资料缺失未参与评估)

Fig. 1 Distribution of precipitation evaluation stations (dots) and topography (shaded, unit: m) in mainland China (stations in different colors represent distinct meteorological-geographical regions. The Taiwan region is excluded due to lack of station precipitation data)

1.2 卫星反演降水产品介绍

本文选取的两种卫星反演小时尺度降水产品为经过地面降水订正的 IMERG_V07_Final 产品与基于 V8 算法研发的 GSMaP_Gauge 产品, 相关产品信息见表 1。

表 1 两种卫星反演降水产品基本信息

Table 1 Basic information of satellite-derived precipitation products

产品名称	时间分辨率/h	空间分辨率/°	覆盖范围	时间范围	供应商
IMERG	0.5	0.10	90°S — 90°N	2000.06—至今	NASA
GSMaP	1.0	0.10	60°S — 60°N	2000.04—至今	JAXA

IMERG 产品是美国国家航空航天局 (NASA) 发布的多卫星联合反演降水产品, 采用戈达德廓线算法 (Goddard Profiling Algorithm, GPROF) 进行微波降水反演 (Rande et al., 2020), 参考 Joyce 等 (2004) 提出的方法进行微波与红外观测融合, 最终利用 GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) 月尺度观测数据进行偏差校准。产品包括 Early、Late 和 Final 三个系列, 其中, Final 系列为经地面观测资料订正后的产品, 具有最高精度。2023 年 7 月, IMERG 产品更新至 V07 版本, 红外-微波融合策略、降水相态识别等方面均有显著改进 (Huffman et al., 2023)。该产品可通过 https://disc.gsfc.nasa.gov/获取。

GSMaP 产品是由日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 研发的一款高分辨率降水产品, 该产品基于 Aonashi 等 (2009) 提出的微波反演方法, 通过卡尔曼滤波模型融合微波与红外观测数据, 并利用 CPC (Climate Prediction Center) 日值降水资料进行校正。产品系列包括 GSMaP_NOW、GSMaP_NRT、GSMaP_MVK, 以及在 GSMaP_MVK 基础上融合全球雨量站点、地形及气候信息进一步校正的 GSMaP_Gauge (Shige et al., 2009), 其中, GSMaP_Gauge 因其经地面观测订正处理, 具有最高精度。2021 年 12 月, GSMaP 产品算法升级至 V8 版本, 在地形降水模拟和降雪估计等方面有了进一步优化。该产品可通过 https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/获取。

1.3 观测降水资料介绍

本文采用 2019—2023 年中国气象局国家基本气象站逐小时雨量计观测数据作为评估参考。该数据集由中国气象局国家气象信息中心提供, 经过严格质控处理, 通过中国气象局大数据云平台 (http://idata.cma/cmadaas/) 获取, 因其所具有的高质量和全面性等优势, 被广泛应用于降水评估研究。Su 等 (2019)、Zhou 等 (2020)、Wang 等 (2023) 基于该数据集的日值资料, 对 IMERG 等地面校正型降水产品在中国大陆区域的误差特征进行了系统评估, 表明其可以用来开展中国大陆区域卫星降水反演评估。

此外, 本文在评估过程中基于质控标识对观测数据进一步筛选, 剔除缺测率超过 5% 的站点, 最终纳入评估的有效站点共 2 400 个, 其空间分布见图 1。

1.4 评估方法

鉴于地面观测数据与 GSMaP 产品的时间分辨率均为 1 h, 而 IMERG 产品的时间分辨率为 0.5 h, 为保持数据时间的尺度一致性, 采用时间平均法将 IMERG 产品处理为 1 h 时间间隔。为实现与地面站点的空间匹配, 采用邻近点插值法将卫星反演降水产品的格点数据插值至各地面观测站点位置, 以便进行一致性检验。需要指出的是, 当站点密度稀疏或地形复杂时, 可能会对结果带来一定的不确定性 (Tian et al., 2018)。

检验时将小时雨强分为 0.1~2.5 mm·h^{-1}、2.5~5.0 mm·h^{-1}、5.0~10.00 mm·h^{-1}、10.0 mm·h^{-1} 以上 4 个等级, 对卫星反演降水产品和地面观测降水的总体频次分布特征进行分析, 参考 Wedajo 等 (2020) 的研究方法, 以 0.1 mm·h^{-1}作为晴雨事件判别的阈值, 并

采用定量和分类指标对其性能进行评估。

由于 IMERG_Final 和 GSMaP_Gauge 校正过程中分别使用了 GPCC 月尺度和 CPC 日尺度雨量计数据，与本文采用的地面观测数据存在部分重叠，可能对验证结果的独立性造成一定影响。对此，Zhou 等(2020) 对基于该类数据的日尺度评估结果稳定性进行了检验，结果表明整体具有较高一致性。由于本文聚焦小时尺度数据，较上述研究的日尺度资料具有更高的时间分辨率，其评估结果在空间和时间上具有更强代表性。因此，采用该数据集开展相关评估工作是可行的。

本文所使用的定量统计指标包括相关系数 CC (记为 C)、均方根误差 RMSE (记为 E_{RMS})、相对偏差 BIAS (记为 B_{IAS})，用其评估降水估算的精度与误差，上述指标的计算公式如下

$$C=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(G_i-\bar{G}\right)\left(S_i-\bar{S}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(G_i-\bar{G}\right)^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(S_i-\bar{S}\right)^2}} \tag{1}$$

$$E_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(S_i-G_i\right)^2} \tag{2}$$

$$B_{\mathrm{IAS}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(S_i-G_i\right)}{\sum_{i=1}^{n}G_i}\times 100\% \tag{3}$$

上式中，S_i 表示卫星反演降水值，G_i 表示地面站降水观测值，n 表示样本总数，i 表示样本。

分类统计指标包括命中率 POD (记为 P_{OD})、误警率 FAR (记为 R_{FA}) 及关键成功指数 CSI (记为 I_{CS}) 等，用其从不同角度评估卫星反演降水产品对降水事件识别的表现。

为计算上述指标，构建站点观测降水事件与卫星反演降水判别事件之间的 2×2 列联表，如表 2 所示。表中 a 表示实际发生的降水事件被卫星反演降水正确判识到的次数；b 表示实际未发生的降水事件却被卫星反演降水判识到的次数；c 表示实际发生的降水事件未被卫星反演降水正确判识到的次数；d 表示实际发生未发生的降水事件卫星反演降水也未判识到的次数。

表 2 观测降水事件 (G) 和卫星反演降水事件 (S) 次数列联表

Table 2 Contingency table for station-observed precipitation(G) and satellite-derived precipitation (S)

观测降水	卫星反演降水	
	S≥阈值	S<阈值
G≥阈值	a	c
G<阈值	b	d

注：文中此处阈值主要针对晴雨事件而言，取值0.1 mm·h^{-1}

分类统计指标计算公式如下所示

$$P_{\mathrm{OD}}=\frac{a}{a+c} \tag{4}$$

$$R_{\mathrm{FA}}=\frac{b}{a+b} \tag{5}$$

$$I_{\mathrm{CS}}=\frac{a}{a+b+c} \tag{6}$$

上式中 a、b、c 意义同表 2。

2 结果分析和适用性讨论

2.1 总体分布

2.1.1 不同雨强频次分布

图 2 展示了地面观测 (Gauge) 降水及 IMERG 产品和 GSMaP 产品在不同小时雨强范围内的频次分布情况。从样本量看，IMERG 产品反演降水总站次为 10 805 983 站次，GSMaP 产品降水为 17 455 708 站次，均显著高于地面观测的 7 832 130 站次，表明两种卫星产品普遍高估了降水事件发生频次。从不同雨强等级频次分布看，对弱降水事件 (<1.0 mm·h^{-1})，地面观测该类降水事件占比为 68%，IMERG 产品占比略低，为 66%，而 GSMaP 产品占比高达 82%，表现出对弱降水事件的识别存在明显的空报；对中等降水事件 (1.0~10.0 mm·h^{-1})，IMERG 产品在此雨强等级的占比与地面观测接近或略高，表现较为稳定，GSMaP 产品占比相对偏低，说明其对中等降水事件的识别能力存在一定不足；对强降水事件 (≥10.0 mm·h^{-1})，

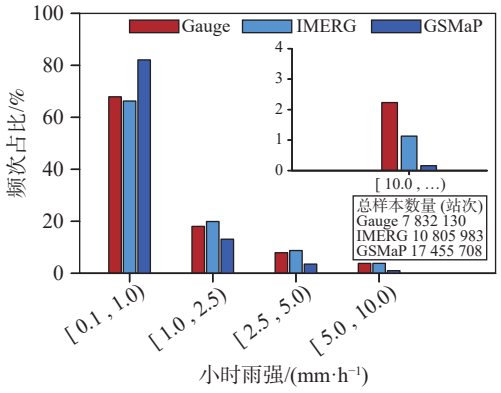


图 2 2019—2023 年中国大陆地面观测 (Gauge)、IMERG 和 GSMaP 小时降水产品不同小时雨强范围频次占比分布

Fig. 2 Frequency distribution of different hourly rainfall intensities from ground observations (Gauge), IMERG, and GSMaP hourly precipitation products over mainland China during 2019-2023

地面观测产品中占比 2.2% (174 860 站次), 而 IMERG 产品和 GSMaP 产品中分别仅为 1.1% (122 557 站次) 和 0.2% (27 173 站次), 二者在该等级的频次及绝对站次数均显著低于地面观测, 反映出其对强降水事件的识别能力有限。

综上所述, 卫星反演降水产品对弱降水事件的高估及对强降水的低估较为明显, 尤其是 GSMaP 产品对弱降水的高估和强降水的低估更突出。相比之下, IMERG 产品在各雨强等级上的频次分布更接近地面观测, 整体表现相对更优。

2.1.2 平均雨强空间分布

图 3 展示了地面观测 (Gauge) 平均小时雨强及其与卫星反演降水产品 (IMERG 和 GSMaP) 之差的站点分布特征。地面观测结果 (图 3a) 表明, 中国大陆平均小时雨强整体呈现自东南向西北递减的空间分布, 其中在华南沿海和华北东部存在两个显著的强降水中心。这种分布特征与区域气候背景密切相关: 华南地区受热带系统频繁影响, 降水类型多为热带海洋型降水 (孙继松, 2017), 而华北东部在盛夏季节常受强烈发展的中尺度天气系统影响 (姚莉等, 2010); 二者特征均为高降水效率的低质心降水系统。与地面观测相比, 卫星反演降水整体存在偏弱情况 (图 3b、c)。其中, GSMaP 产品几乎所有站点均表现出偏弱趋势, 约 95% 的站点偏弱幅度超过 0.30 mm·h^{-1}, 且偏弱程度明显高于 IMERG 产品 (图 3c)。这可能与 GSMaP 产品反演结果更易识别出频繁但强度较小的弱降水事件 (图 2), 从而拉低了平均降水强度有关。相比之下, IMERG 产品有 25% 的站点表现出偏弱超过 0.40 mm·h^{-1}, 偏弱最明显区域集中于华南沿海和华北东部 (图 3b)。这种偏弱现象可能源于上述区域主导强降水的低质心降水系统, 其微波亮温和实际降水强度之间相关性较弱 (Wilheit et al., 2003), 从而违背了卫星反演降水依赖的辐射亮温-降水强度相关性假设 (Kidd and Levizzani, 2011)。此外, IMERG 产品有 5% 的站点表现为相对于地面观测偏强, 幅度超过达 0.20 mm·h^{-1}, 主要分布于西北地区东部、西南地区、江南东部等地 (图 3b), 其原因值得进一步探讨。

为进一步分析 IMERG 产品平均雨强在显著偏强区域 (贵州) 及显著偏弱区域 (北京) 的偏差特征, 计算两地地面观测 (Gauge)、IMERG 产品和 GSMaP 产品的逐月降水频次分布 (图 3d、e)。结果显示, IMERG 产品在贵州地区冬季降水站次显著低于地面观测。而贵州秋冬季常出现绵阴雨天气 (张顺谦等, 2014), 说明 IMERG 产品对该类绵阴雨的判识效率较低, 导致其对弱降水频次的低估, 从而造成平均反演降水量偏高。北京地区由于冬季降水较少, IMERG 产品与地面观测的降水频次整体差异较小。夏季 IMERG 产品降水频次明显高于地面观测, 且其中大部分为弱降水 (图 2), 因此, 其平均降水强度被低估。

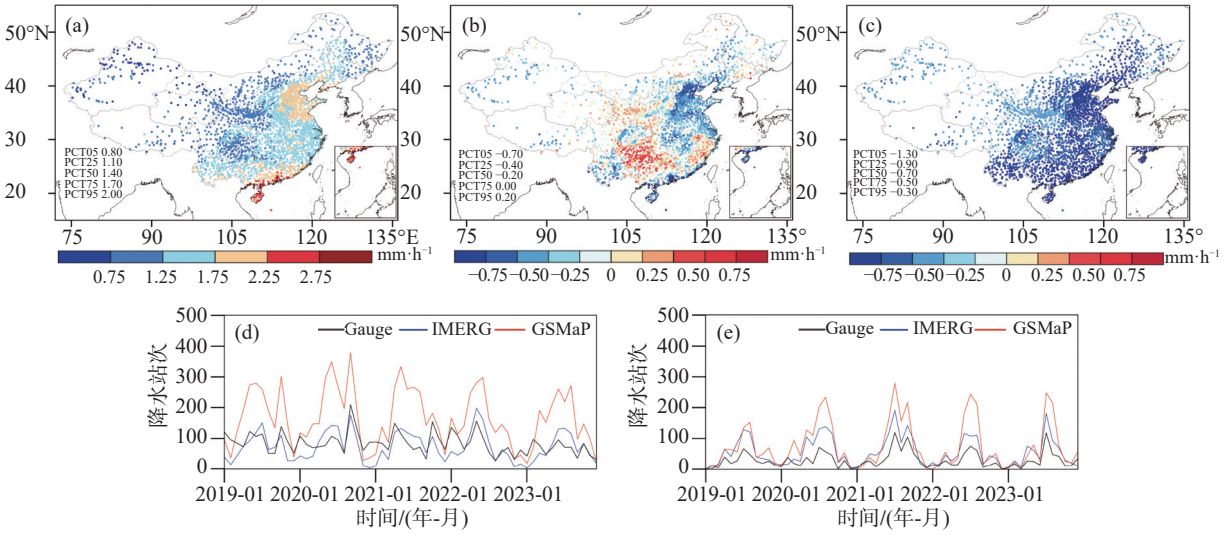


图 3 2019—2023 年中国大陆地面观测 (Gauge) 平均小时雨强 (a) 及 IMERG (b) 和 GSMaP (c) 产品与地面观测平均小时雨强之差分布, 以及贵州 (d)、北京 (e) 地面观测 (Gauge) 及 IMERG 和 GSMaP 产品逐月降水频次分布 (图中左下角标值 PCT05、PCT25、PCT50、PCT75、PCT95 分别代表差值 5%、25%、50%、75% 和 95% 分位值)

Fig. 3 Distribution of (a) mean hourly rainfall intensity of ground observations (Gauge), differences of mean hourly rainfall intensity of (b) IMERG and (c) GSMaP to ground observations Gauge over mainland China, the monthly precipitation frequency of ground observations Gauge, IMERG and GSMaP products in (d) Guizhou and (e) Beijing during 2019-2023 (The values of PCT05, PCT25, PCT50, PCT75, PCT95 in the lower-left corners of each panel represent the 5th, 25th, 50th, 75th, and 95th quantiles of the differences)

综上所述，上述两种卫星反演降水产品在中国大陆大部区域的平均小时雨强普遍低于地面观测，且降水强度越大，偏弱越明显。其中，GSMaP 产品较 IMERG 产品偏弱更明显。但受不同区域特定天气气候条件影响，各地偏差特征存在一定差异。

2.1.3 平均雨强月分布

图 4 展示了中国大陆地面观测 (Gauge)、IMERG 产品和 GSMaP 产品卫星反演降水产品总体平均小时雨强月分布特征。地面观测结果表明，中国大陆降水具有显著的季节变化特征，表现为夏季降水强、冬季降水弱，这一特征与中国典型的季风气候密切相关。相比之下，IMERG 产品在反映降水季节变化方面表现更为优越，其夏季降水强度峰值与地面观测更为接近，但冬季普遍高估了降水强度。GSMaP 产品虽然同样能够能反映季节变化趋势，但其夏季降水强度峰值明显低于地面观测，季节变化不如 IMERG 产品和地面观测明显。另外，不同年份上述两种卫星反演降水产品与地面观测的差异存在波动，呈现一定的年际变化特征，表明降水的年际波动对卫星反演降水评估结果具有一定影响。

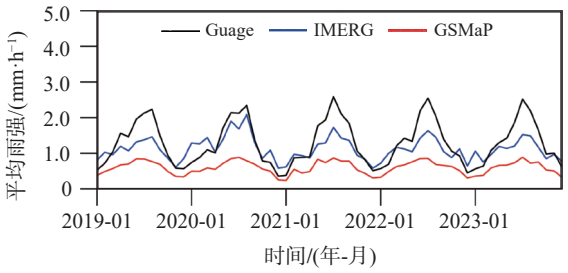


图 4 2019—2023 年中国大陆地面观测 (Gauge) 和 IMERG、GSMaP 产品平均小时雨强逐月演变图

Fig. 4 Monthly variations of mean hourly precipitation intensity from ground observations (Gauge) and IMERG, GSMaP products over mainland China during 2019-2023

2.2 晴雨事件判识能力

2.2.1 空间分布

图 5 展示了 2019—2023 年中国大陆不同区域 IMERG 产品和 GSMaP 产品晴雨判识能力统计结果。从其整体表现看，两种产品在江南地区对晴雨的判识性能优于其他区域，多项评价指标在该区域表现最优，而在西藏地区表现较差。具体而言，各区域 IMERG 产品的关键成功指数 CSI 中位数普遍高于 GSMaP 产品，表明 IMERG 产品在晴雨判识能力方面整体优于 GSMaP 产品。然而，在西北、西藏及西南等区域，两者的 CSI 值存在明显重叠，IMERG 产品较 GSMaP 产品优势不及其他区域明显 (图 5a)。进一步结合命中率 POD (图 5b) 和误警率 FAR (图 5c) 分析发现，虽然 GSMaP 产品在中国大陆大部地区的 POD 明显高于 IMERG 产品，但其 FAR 也显著高于 IMERG 产品。这说明 GSMaP 产品较高命中率的同时必定伴随较高误警率，这可能与其降水判识方案 (Seto et al., 2008) 较 IMERG 产品更易判识出降水事件有关 (图 2)。此外，在西北、西藏等地，上述两种卫星反演降水产品整体命中率偏低，且离散程度较大。其中，西南地区 IMERG 产品的命中率 (中位数 0.51) 显著低于 GSMaP 产品的命中率 (中位数 0.70)，而在西藏地区误警率均处于较高水平。值得注意的是，在华南地区，GSMaP 产品误警率显著高于 IMERG 产品，进一步体现了其较高误警倾向。

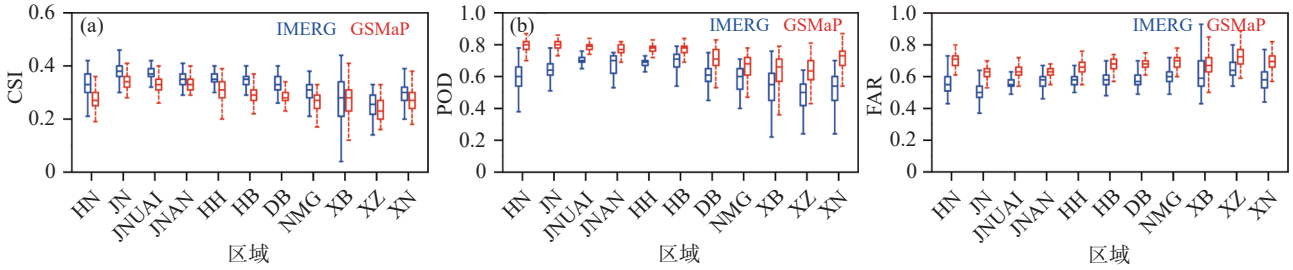


图 5 2019—2023 年 IMERG 和 GSMaP 小时降水产品在中国大陆不同区域的晴雨判识关键成功指数 CSI (a)、命中率 POD (b) 和误警率 FAR (c) 箱线图

Fig. 5 Boxplots of (a) critical success index, (b) hit rate, and (c) false alarm rate of IMERG and GSMaP hourly precipitation products for rain/no-rain identification in different regions of mainland China during 2019-2023

2.2.2 季节变化

图 6a—f 给出 2019—2023 年中国大陆不同区域不同月份 IMERG 和 GSMaP 小时降水产品晴雨判识能力不同统计指标分布情况。总体而言，IMERG 产品在主要雨季晴雨判识能力优于冬季，其关键成功指数 CSI 随月份自南向北逐渐提高，与中国降水主雨季由南向北的空间分布特征较为一致，显示出较好的时空响应能力(图 6a)。相比之下，GSMaP 产品在华北、东北、内蒙古、西北及西藏等地亦表现出主雨季晴雨判识能力优于冬季，但在黄淮及其以南地

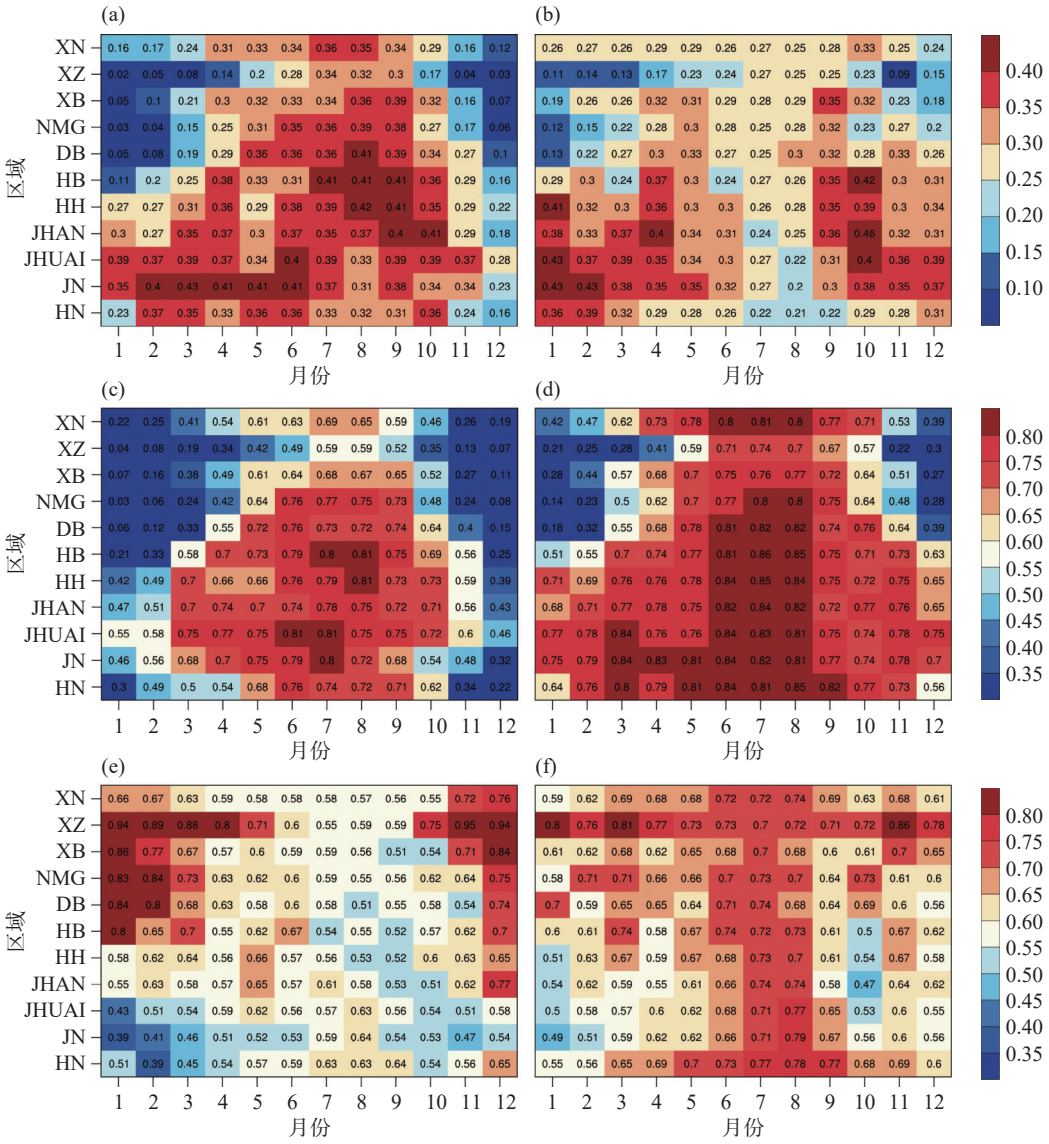


图 6 2019—2023 年中国大陆不同区域 IMERG (a, c, e) 和 GSMaP (b, d, f) 小时降水产品晴雨判识关键成功指数 (a, b)、命中率 (c, d) 和误警率 (e, f) 月热力图

Fig. 6 Monthly heatmaps of (a, b) critical success index, (c, d) hit rate, and (e, f) false alarm rate of (a, c, e) IMERG and (b, d, f) GSMaP hourly precipitation products for rain/no-rain identification in different regions of mainland China during 2019-2023

区则相反, 即主雨季晴雨判识能力不如冬季 (图 6b)。对比来看, IMERG 产品在主雨季的晴雨判识能力整体优于 GSMaP 产品; 而在冬季, GSMaP 产品晴雨判识能力则优于 IMERG 产品。进一步结合命中率 POD 和误警率 FAR 分析可知, 两种产品在主雨季对晴雨判识的命中率普遍高于冬季月份, 其中 IMERG 产品的季节差异尤为显著, 其在黄淮及其以北和西藏地区等区域的冬季 POD 显著下降 (图 6c), 同时在这些区域的冬季 FAR 相对较高 (图 6e), 导致其 CSI 在冬季低于 GSMaP 产品。虽然 GSMaP 产品在主雨季的 POD 也较高 (图 6d), 但其同时也伴随较高的 FAR, 尤其在 7 月至 8 月, 全国大部区域晴雨判识 FAR 达到年内最高 (图 6f)。相较而言, GSMaP 产品在黄淮及其以南地区的冬季 FAR 较低 (图 6f), 因而在这些区域冬季的晴雨判识综合能力优于其他主雨季表现。

针对上述两种卫星反演降水产品在华北及其以北地区冬季晴雨判识能力普遍偏低的现象, 结合区域气候特征分析认为, 这些区域正好处于中国大陆冬季降雪高频带, 说明 IMERG 产品在判断由降雪引发的降水事件存在局限。相对而言, GSMaP 产品在该方面表现更优。

2.2.3 日变化

图 7a—f 展示了 2019—2023 年中国大陆不同区域 IMERG 和 GSMaP 小时降水产品晴雨判识能力日变化统计分析结果。从中可见, IMERG 产品和

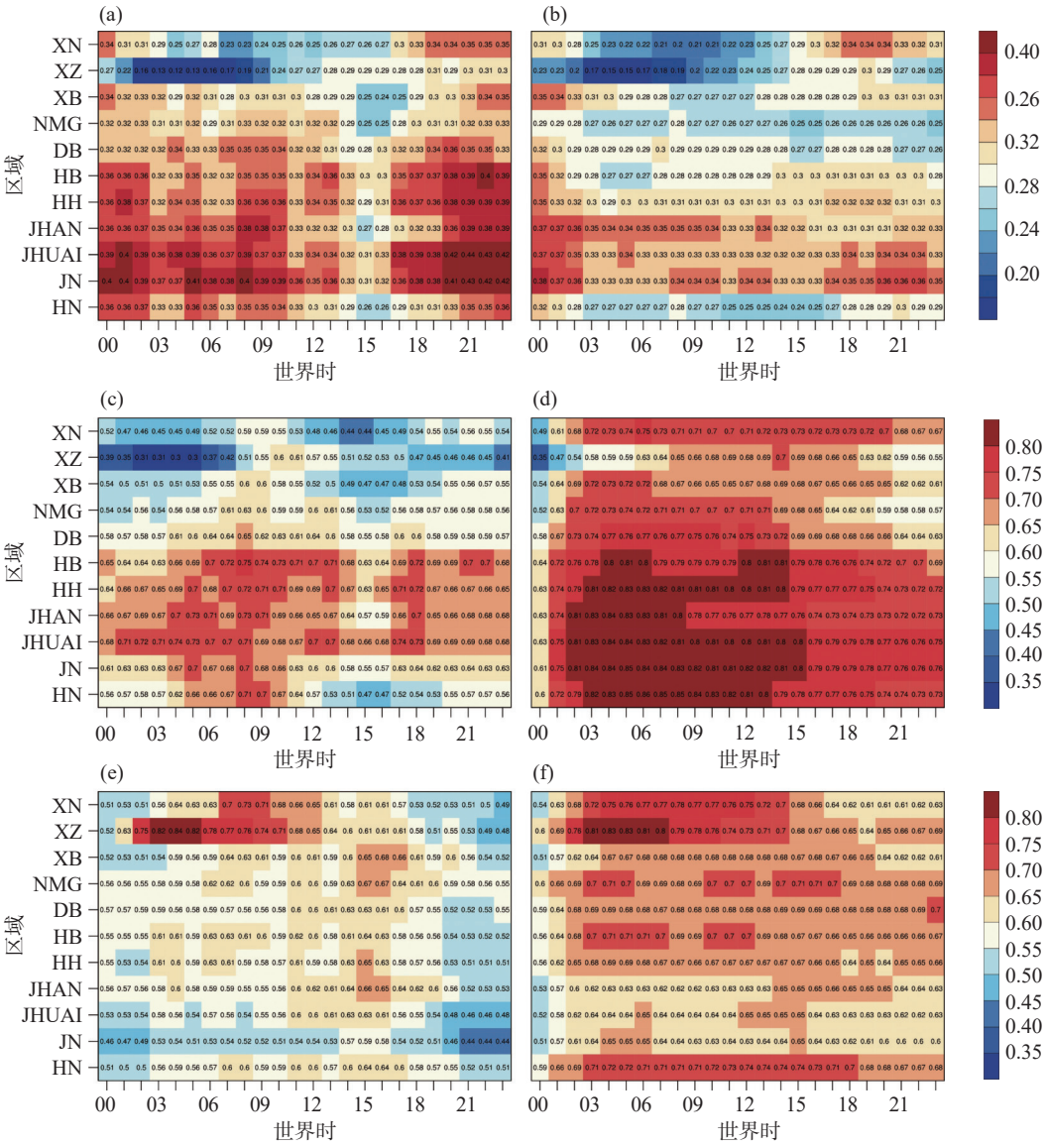


图 7 2019—2023 年中国大陆不同区域 IMERG (a, c, e) 和 GSMaP (b, d, f) 小时降水产品晴雨判识关键成功指数 (a, b)、命中率 (c, d) 和误警率 (e, f) 日变化热力图

Fig. 7 Daily variation heatmaps of (a, b) critical success index, (c, d) hit rate, and (e, f) false alarm rate of (a, c, e) IMERG and (b, d, f) GSMaP hourly - precipitation products for rain/no-rain identification in different regions of mainland China during 2019–2023

GSMaP 产品的晴雨判识能力具有一定的日变化特征。其中, IMERG 产品日变化特征尤为显著, 表现为在后半夜至清晨时段具备较强的判识能力, 尤其对江南和江淮地区的夜雨, 具有全区域、全时段中最优的判识表现, 相较之下, 其在 12:00—15:00 (世界时, 下同) 时段的 CSI 评分明显偏低 (图 7a), 该时段亦对应中国降水日变化中的谷值区 (宇如聪和李建, 2016)。此外, IMERG 产品对江汉、江淮及江南等地的午后至傍晚降水判识能力也表现更优 (图 7a)。GSMaP 产品晴雨判识能力的日变化特征相对较弱, 尤其在后半夜至清晨及午后至傍晚前后两个峰值降水时段, 其晴雨判识能力均明显低于 IMERG 产品 (图 7b)。特别是在西藏和西南地区, 二者在白天至傍晚前后的降水判识能力均较差, 但对西南地区的夜间降水均具备较好的判识能力, 然而总体上仍不及其在中东部地区的判识效果。进一步结合 POD 和 FAR 分析晴雨辨识能力发现, 两种产品普遍在午后至傍晚前后表现出较高的 POD, IMERG 产品在华北及其以南的中东部地区于该时段的表现尤为突出 (图 7c), 而 GSMaP 产品则在全天范围内维持相对较高的 POD (图 7d), 但其高命中率通常也伴随着较高的 FAR (图 7f)。虽然 IMERG 产品的 POD 低于 GSMaP 产品, 但其 FAR 也低于后者,尤其在后半夜至清晨时段, IMERG 产品 FAR 优势更为明显 (图 7e)。因此, IMERG 产品在后半夜至清晨对晴雨的判识能力优于 GSMaP 产品。

2.3 误差分析

2.3.1 空间分布

图 8 展示了中国大陆不同区域 IMERG 和 GSMaP 小时降水产品基于地面观测降水的相关系数、均方根误差及相对偏差的统计分析结果。总体来看, IMERG 产品和 GSMaP 产品在江淮和黄淮地区的相关性普遍略高于其他区域, 而在西藏地区则相关性最差。这一现象主要归因于高原地区地形复杂、多积雪覆盖等因素对卫星反演降水精度的干扰 (Aonashi et al., 2009; Kummerow et al., 2015)。对比来看, IMERG 产品在除西藏、西北地区以外的大多数区域相关系数中位数普遍高于 GSMaP 产品, 且其相关系数的离散程度整体小于 GSMaP 产品 (图 8a)。从相对偏差 (图 8b) 可见, 两种卫星降水产品均较地面观测系统性偏高, 这可能与卫星降水产品中降水空报现象有关 (图 2)。其中, IMERG 产品在多数区域的相对偏差普遍高于 GSMaP 产品, 且其离散程度也相对较大, 表明 IMERG 产品在降水量估计上更容易产生高估。分析均方根误差 (图 8c) 可见, IMERG 产品反演降水的均方根误差在各区域普遍高于 GSMaP 产品。两种卫星降水产品的均方根误差最大值均出现在降水强度较大的华南地区, 而最小值则位于降水量较少的西藏地区。

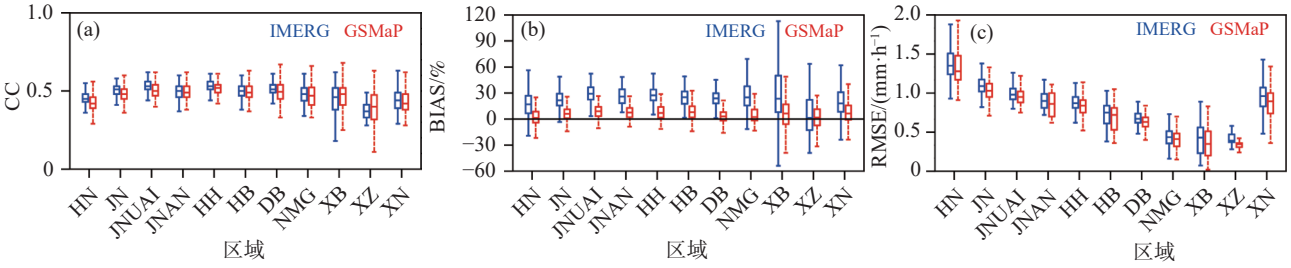


图 8 2019—2023 年基于地面观测降水的 IMERG 和 GSMaP 小时降水产品在中国大陆不同区域相关系数 CC (a)、相对偏差 BIAS (b) 和均方根误差 RMSE (c) 分布箱线图

Fig. 8 Boxplots of (a) correlation coefficient, (b) root mean square error, and (c) relative bias of IMERG and GSMaP hourly precipitation products in different regions of mainland China during 2019-2023

2.3.2 季节变化

图 9a—f 展示了 2019—2023 年中国大陆不同区域不同月份 IMERG 和 GSMaP 小时降水产品基于地面观测降水的相关系数、均方根误差及相对偏差统计结果。从中可见, IMERG 产品和 GSMaP 产品反演降水误差特征受季节变化与空间分布显著影响。总体可见, 春季和秋季相关性普遍高于盛夏季节 (图 9a、b), 与 Yu 等 (2021) 对 IMERG-V06_Final 产品的评估结果一致。具体而言, 4 月前中国大陆尚未进入主汛期, 黄淮及其以南地区反演降水与地面观测的相关性较高, 江汉、江淮及黄淮等地相关系数可达 0.60 以上。5 月起随着南海季风爆发, 自华南向北进入主汛期, 对流性降水增强, 导致卫星反演降水和地面观测降水的相关性下降, 尤其在 6—8 月。相较之下, IMERG 产品在夏季的相关性略优于 GSMaP 产品。进入秋季 (9—11 月), 对流性减弱, 相关性变好, 如黄淮区域在“淮河秋雨”影响下, 其和地面观测降水的相关系数达 0.63 以上。这种季节性变化可能是由于春、秋季以稳定性冷云系统为主, 此类系统中冷云降水率与亮温关系紧密, 且卫星反演降水中的运动矢量外推方法 (Huffman et al., 2023) 能较准确地刻画稳定性降水。而夏季多为中尺度对流性暖云系统, 降水反演误差较大。冬季 (12 月—次年 2 月), 华北、东北、内蒙古、西北及西藏等地区降雪频繁, 反演相关性显著降低, IMERG 产品偏低更为明显, 因此, 降雪仍然是卫星反演降水的重大挑战。相对偏差方面, 两种卫星反演降水产品普遍高估降水 (图 9c、d), 且在主汛期偏差更大, 比较而言, IMERG 产品高估程度普遍大于 GSMaP 产品, 但其在东北、内蒙古、西北、西藏等区域的冬季表现为偏低。GSMaP 产品在全国大部区域偏小更明显。均方根误差方面, 呈现自南向北递减趋势, 主雨季较大, 冬季降雪区域则相对较小 (图 9e、f)。总体上, IMERG 产品基于地面观测的均方根误差略高于 GSMaP 产品。

2.3.3 日变化

图 10a—f 展示了中国大陆 IMERG 产品和 GSMaP 产品不同区域基于地面观测降水的相关系数、均方根误差及相对偏差日变化统计结果。总体来看, IMERG 产品和 GSMaP 产品与地面观测的相关性在后半夜及上午时段较高, 午后至傍晚前后相对较低, 尤其在华南、西藏及西南地区的午后至前半夜时段, 其低相关性最为显著 (图 10a、b), 反映当前卫星降水产品在刻画午后局地热对流降水方面存在不足。比较而言, IMERG 产品一天中绝大多数时段相关性普

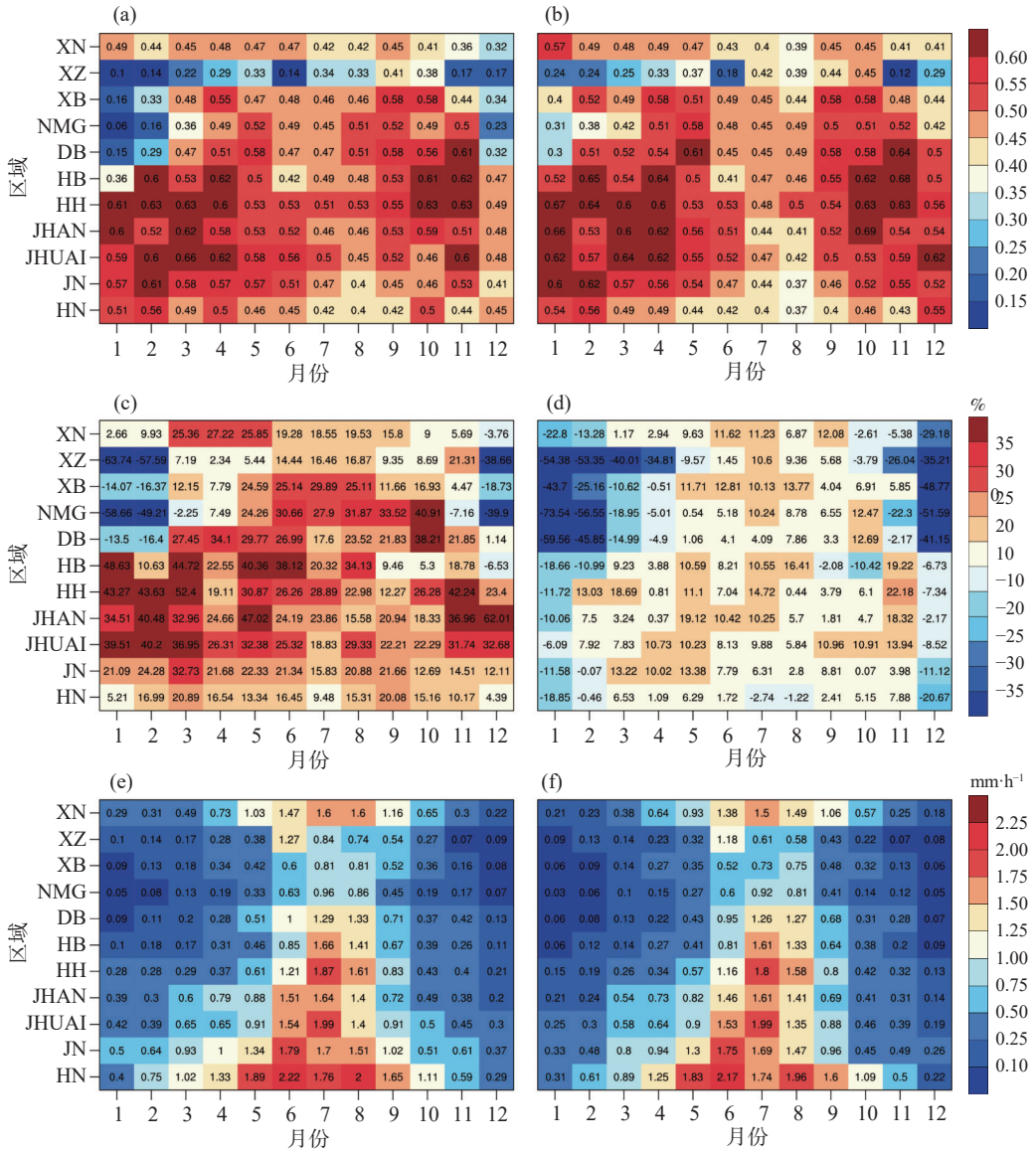


图 9 2019—2023 年中国大陆不同区域 IMERG (a、c、e) 和 GSMaP (b、d、f) 小时降水产品相关系数 (a、b)、相对偏差 (c、d) 和均方根误差 (e、f) 月变化热力图

Fig. 9 Monthly variation heatmaps of (a, b) correlation coefficient, (c, d) relative bias, and (e, f) root mean square error of (a, c, e) IMERG and (b, d, f) GSMaP hourly precipitation products in different regions of mainland China during 2019–2023

遍高于 GSMaP 产品。相对偏差方面，二者在各时段均存在一定程度的偏差，其中，IMERG 产品总体偏差大于 GSMaP 产品，且偏大情况主要集中在午后至前半夜 (图 10c、d)。GSMaP 产品则在 02:00—05:00 及 12:00—15:00 两个时段偏差较大，尤其在西北、西藏及西南地区上午时段存在显著高估。同时，GSMaP 产品对华南午后降水以及西南、西藏地区夜间降水相对偏差表现为负值，进一步表明其对这些区域和时段降水的反演能力仍有不足。均方根误差方面，二者在午后至前半夜时段误差普遍较大，且呈现由南向北减递减的趋势，尤其在华南地区，午后强对流降水导致误差更为明显 (图 10e、f)。相较之下，内蒙古、西北及西藏地区后半夜至上午时段的均方根误差较小。此外，IMERG 产品和 GSMaP产品对西南地区夜间降水均方根误差普遍较大，进一步说明其对该区域复杂降水过程的探测能力有限。

3 适用性分析

中国降水类型多样，区域差异显著，直接影响卫星反演降水产品在不同区域的表现。不同于以往侧重日、月尺度的研究 (廖荣伟等, 2015; Navarro et al., 2019; Trinh-Tuan et al., 2019; 曲学斌等, 2020)，本文从统计角度分析了地面订正后的 IMERG 产品和 GSMaP 产品小时尺度的误差特征，旨在获得更精细时间尺度的产品评估结果，为区域性天气系统演变及降水监测提供依据。

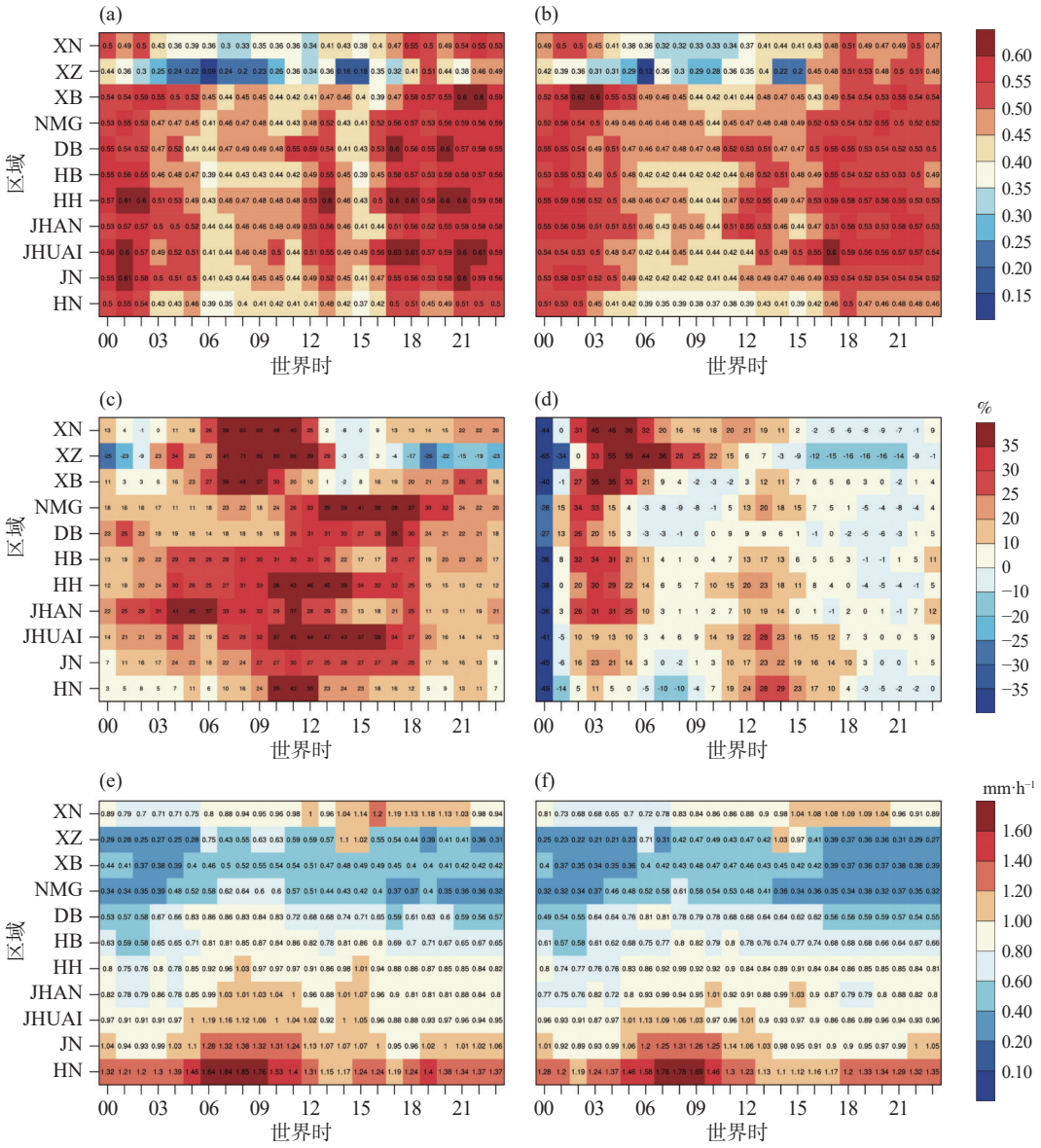


图 10 2019—2023 年中国大陆不同区域 IMERG (a, c, e) 和 GSMaP (b, d, f) 小时降水产品相关系数 (a, b)、相对偏差 (c, d) 和均方根误差 (e, f) 日变化热力图

Fig. 10 Daily variation heatmaps of (a, b) correlation coefficient, (c, d) relative bias, and (e, f) root mean square error of (a, c, e) IMERG and (b, d, f) GSMaP hourly precipitation products in different regions of mainland China during 2019-2023

本文研究结果表明, 两种卫星产品均存在高估弱降水, 低估强降水的倾向, 这与其他研究结论基本一致 (Shawky et al., 2019; Yang et al., 2020; Yu et al., 2021; Lu, 2022)。IMERG 产品的频次分布更接近地面观测, GSMaP 产品对弱降水空报偏多, 导致其降水强度更扁平化, 季节与日变化特征不如 IMERG 产品明显。

尽管 Ka 波段雷达提高了卫星降水反演产品对绵阴雨和固态降水的识别能力, 但两类产品在该类天气条件下仍表现出显著差异。GSMaP 产品由于降水判识方案阈值更小, 更容易辨识出降水, 因此, 在多绵阴雨和降雪天气下的晴雨判识能力优于 IMERG 产品, 特别是在西南地区秋冬季及黄淮以北冬季降雪区; 而 IMERG 产品在强降水频次与地面观测更接近, 主汛期表现优于 GSMaP 产品。

与以往有关卫星反演降水产品夏季精度优于冬季的结论 (廖荣伟等, 2015; Navarro et al., 2019) 不同, 本文研究结果显示, 需结合当地天气气候特征具体分析。黄淮以北地区冬季确实降水产品精度较低, 但黄淮及其南的中东部地区秋冬季精度优于夏季 (Yu et al., 2021), 说明降雪仍是卫星反演降水的重要挑战。

从其主要雨季表现可见, IMERG 产品在江南春雨、淮河秋雨等雨季其晴雨判识效率、相关性等方面

略优于 GSMaP 产品，但偏差和均方根误差较大。华南前汛期因暖区对流系统 (谌芸等, 2019) 发生比例高，卫星反演降水表现相对较差，其误差也最大。江淮梅雨期综合表现优于华南前汛期，IMERG 产品在命中率与相关性方面优势明显。华北主汛期 (7—8 月) IMERG 产品晴雨判识效率显著优于 GSMaP 产品，关键成功指数评分高 0.14~0.15，表现最佳。

总体上，IMERG 产品在主汛期晴雨判识能力和相关性等指标整体优于 GSMaP 产品，特别是强降水频发的时段。需要注意的是，评估基于国家基本站开展，不同区域站点密度可能影响结果 (Tian et al., 2018)，高海拔及弱降水的反演能力也受限制 (Girons et al., 2015; Tian et al., 2018)。此外，红外与微波降水融合过程中的权重分配和观测时次的差异亦影响结果的参考性 (Tan et al., 2016)，更深入理解卫星产品误差及成因，仍有赖于更细致的分析。

4 结论与讨论

为评估卫星反演降水产品在中国大陆地区的适用性，本文基于 2019—2023 年国家气象站逐小时观测资料，对 IMERG 和 GSMaP 小时降水产品在中国大陆不同区域、月份及日变化的误差特征进行了系统分析，并探讨了其在不同气候区域的适用性。主要结论如下：

(1) 从总体误差上看，两种卫星产品均存在对弱降水高估、强降水低估的现象，其中 GSMaP 产品对弱降水高估更显著，其平均小时雨强呈现出全国范围内普遍偏弱的特征，且季节与日变化相对平缓；IMERG 产品在降水频次上更接近地面观测，尽管其平均雨强整体亦偏弱，但在西北地区东部及西南地区等地表现出一定程度的偏强，其季节与日变化特征与地面观测更加一致。

(2) 从主要雨季适用性上看，两种产品在江南春雨、江淮梅雨以及淮河秋雨等典型雨季中的表现优于其他雨季，而在华南前汛期，特别是午后至前半夜时段的晴雨判识效果相对较差。对比分析表明，IMERG 产品整体优于 GSMaP 产品，尤其在 7—8 月，其空报率较低，导致其关键成功指数显著优于 GSMaP 产品，且在多数区域主汛期中表现出更高的相关性。

(3) 从冬季降水适用性上看，在西南地区秋冬季的绵阴雨天气以及黄淮以北地区冬季的降雪天气条件下，两种卫星产品均存在一定误差，但 GSMaP 产品表现出更优的晴雨判识能力与更小的系统误差，其更适用于上述地区和时段的降水监测；相比之下，IMERG 产品在该类天气中命中率较低，误警率较高，整体判识效率偏低，尚存在较大改进空间。

综上所述，IMERG 产品与 GSMaP 产品在中国大陆不同区域和时段的晴雨判识能力存在显著差异，需根据具体应用需求与气候背景择优选用。同时，针对现有产品在特定天气类型下的系统性偏差，仍需进一步改进其反演算法与误差校正机制，尤其是加强其对降雪和强降水的反演能力，以提升其在气象监测预报的实际应用价值。

参考文献 (References):

陈爱军,孔宇,陆大春.2018.应用 CGDPA 评估中国大陆地区 IMERG 的降水估计精度[J].大气科学学报,41(6):797−806. Chen A J, Kong Y, Lu D C. 2018. Evaluation of the precipitation estimation accuracy of IMERG over main- land China with CGDPA [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,41(6):797−806 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20161207001

谌芸,陈涛,汪玲瑶,等.2019.中国暖区暴雨的研究进展[J].暴雨灾害,38(5):483−493. Chen Y, Chen T, Wang L Y, et al. 2019. A review of the warm-sector rainstorms in China [J]. Torrential Rain and Disasters, 38(5):483−493 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.010

何爽爽,汪君,王会军.2018.基于卫星降水和 WRF 预报降水的 “6.18” 门头沟泥石流事件 的回报检验研究[J].大气科学,42(3):590−606. He S S, Wang J, Wang H J. 2018. Hindcast study of “6.18” Mentougou debris-flow event based on satellite rainfall and WRF forecasted rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,42(3):590−606 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1804.18148

李伶杰,胡庆芳,黄勇,等.2018.近实时卫星降水数据对南京“20170610”极端性强降水过程的监测分析[J].高原气象,37(3):806−814. Li L J, Hu Q F, Huang Y, et al. 2018. Monitoring and analysis of the extreme heavy rainfall process on June 10, 2011 in Nanjing using five near real time satellite rainfall estimations [J]. Plateau Meteorology, 37(3):806−814 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2017.00080

廖荣伟,张冬斌,沈艳.2015. 6 种卫星降水产品在中国区域的精度特征评估[J].气象,41(8):970-979. Liao R W, Zhang D B, Shen Y, 2015. Validation of six satellite-derived rainfall estimates over China [J]. Meteorological Monthly,41(8):970-979 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2015.08.006

曲学斌,付亚男,袁秀芝,等.2020. GPM-IMERG 日降水数据在内蒙古地区的适用性分析[J].暴雨灾害,39(3):293−299. Qu X B, Fu Y N, Yuan X Z, et al. 2020. Applicability analysis of GPM-IMERG daily precipitation data in Inner Mongolia [J]. Torrential Rain and Disasters,39(3):293−299 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.03.010

孙继松.2017.短时强降水和暴雨的区别与联系[J].暴雨灾害,36(6):498−506. Sun J S. 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall [J]. Torrential Rain and Disasters,

36(6):498−506 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2017.06.002

姚莉,赵声蓉,赵翠光,等.2010.我国中东部逐时雨强时空分布及重现期的估算[J].地理学报,65(3):293−300. Yao L, Zhao S R, Zhao C G, et al. 2010. Temporal and spatial distributions of hourly rain intensity and recurrence periods in eastern and central China [J]. Acta Geographica Sinica,65(3):293−300 (in Chinese). doi:10.11821/xb201003004

宇如聪,李建.2016.中国大陆日降水峰值时间位相的区域特征分析[J].气象学报,74(1):18−30. Yu R C, Li J. 2016. Regional characteristics of diurnal peak phases of precipitation over contiguous China [J]. Acta Meteorologica Sinica,74(1):18−30 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2016.011

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):1035-1318. Zeng S K, Yong B. 2019. Evaluation of the GPM-based IMERG and GSMaP precipitation estimates over the Sichuan region [J]. Acta Geographica Sinica,74(7):1305-1318 (in Chinese). doi:10.11821/dlxb201907003

张顺谦,马振峰,陈文秀,等.2014.西南地区秋绵雨变化趋势与周期性特征的区域差异[J].自然资源学报,29(2):275−284. Zhang S Q, Ma Z F, Chen W X, et al. 2014. Area-differentiation of changing trend and periodic characteristics of autumn continous rainy days in southwest China [J]. Journal of Natural Resources,29(2):275−284 (in Chinese). doi:10.11849/zrzyxb.2014.02.009

中国气象局预测减灾司.2006.中国气象地理区划手册[M].北京:气象出版社. Department of Forecasting and Disaster Reduction of China Meteorological Administration. 2006. Handbook of Meteorological and Geographical Zoning in China [M]. Beijing:China Meteorological Press (in Chinese)

朱乾根,林锦瑞,寿绍文等.2000.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 2000. Principles and Methods of Synoptic Meteorology [M]. Beijing:China Meteorological Press (in Chinese)

Aonashi K, Awaka J, Hirose M, et al. 2009. GSMaP passive microwave precipitation retrieval algorithm: Algorithm description and validation [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan,87A:119-136. doi:10.2151/jmsj.87A.119

Barrett E C, Beaumont M J. 1994. Satellite rainfall monitoring: An overview [J]. Remote Sensing Reviews,11(1-4):23−48. doi:10.1080/02757259409532257

Chen F, Li X. 2016. Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 monthly precipitation products over mainland China [J]. Remote Sensing,8(6):472. doi:10.3390/rs8060472

Ebert E E, Janowiak J E, Kidd C. 2007. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,88(1):47−64. doi:10.1175/BAMS−88−1−47

Girons Lopez M, Wennerström H, Nordén L, et al. 2015. Location and density of rain gauges for the estimation of spatial varying precipitation[J]. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography,97(1):167-179. doi:10.1111/geoa.12094

Guo H, Chen S, Bao A, et al. 2016. Early assessment of integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement over China [J]. Atmospheric Research,176:121−133. doi:10.1016/j.atmosres.2016.02.020

Huffman G J, Bolvin D T, Joyce R J, et al. 2023. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi−satellitE Retrievals for GPM (IMERG) Version 07 [R]. NASA Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 47.

Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution [J]. Journal of Hydrometeorology,5(3):487−503. doi:10.1175/1525−7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2

Kidd C, Levizzani V. 2011. Status of satellite precipitation retrievals [J]. Hydrology and Earth System Sciences,15(4):1109−1116. doi:10.5194/hess−15−1109−2011

Kummerow, C D, Randel D L, Kulie M, et al. 2015. The evolution of the Goddard Profiling Algorithm to a fully parametric scheme [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,32(12):2265−2280. doi:10.1175/JTECH−D−15−0039.1

Lu N. 2022. Evaluation of IMERG precipitation products in the southeast coastal urban region of China [J]. Remote Sensing,14(19):4947. doi:10.3390/rs14194947

Naud C M, Jeyaratnam J, Booth J F, et al. 2020. Evaluation of modeled precipitation in oceanic extratropical cyclones using IMERG [J]. Journal of Climate,33(1):95−113. doi:10.1175/JCLI−D−19−0369.1

Navarro A, Garcia-Ortega E, Merino A, et al. 2019. Assessment of IMERG precipitation estimates over Europe [J]. Remote Sensing,11(21):2470. doi:10.3390/rs11212470

Pradhan R K, Markonis Y, Godoy M R V, et al. 2022. Review of GPM IMERG performance: A global perspective [J]. Remote Sensing of Environment,268:112754. doi:10.1016/j.rse.2021.112754

Randel D L, Kummerow C D, Ringerud S, et al. 2020. The Goddard Profiling (GPROF) precipitation retrieval algorithm [J]. Satellite Precipitation Measurement,1:141−152. doi:org/10.1007/978−3−030−35798−6_9

Seto S, Kubota T, Takahashi N, et al. 2008. Advanced rain/no-rain classification methods for microwave radiometer observations over land [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,47(11):3016−3029. doi:10.1175/2008JAMC1895.1

Shawky M, Moussa A, Hassan Q K, et al. 2019. Performance assessment of sub-daily and daily precipitation estimates derived from GPM and GSMaP products over an arid environment [J]. Remote Sensing,11(23):2840. doi:10.3390/rs11232840

Shige S, Yamamoto T, Tsukiyama T, et al. 2009. The GSMaP precipitation retrieval algorithm for microwave sounders—Part I: Over-ocean algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,47(9):3084−3097. doi:10.1109/TGRS.2009.2019954

Su J, Lyu H, Ryu D, et al. 2019. Assessment and comparison of TMPA

and IMERG products over the major basins of mainland China [J]. Earth and Space Science,6(12):2461−2479. doi:10.1029/2019EA000977

Sun Q H, Miao C Y, Duan Q Y, et al. 2018. A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons [J]. Reviews of Geophysics,56:79−107. doi:10.1002/2017RG000574

Tan J, Petersen W A, Tokay A. 2016. A novel approach to identify sources of errors in IMERG for GPM ground validation [J]. Journal of Hydrometeorology,17(9):2477−2491. doi:10.1175/JHM−D−16−0079.1

Tian F, Hou S, Yang L, et al. 2018. How does the evaluation of the GPM IMERG rainfall product depend on gauge density and rainfall intensity? [J]. Journal of Hydrometeorology,19(2):339−349. doi:10.1175/JHM−D−17−0161.1

Trinh-Tuan L, Matsumoto J, Ngo-Duc T, et al. 2019. Evaluation of satellite precipitation products over Central Vietnam [J]. Progress in Earth and Planetary Science,6:54. doi:10.1186/s40645−019−0297−7

Villarini G, Mandapaka P V, Krajewski W F, et al. 2008. Rainfall and sampling uncertainties: A rain perspective [J]. Journal of Geophysical Reserch, 113(D11). doi:10.1029/2007JD009214

Wang X, Ding Y, Zhao C, et al. 2019. Similarities and improvements of GPM IMERG upon TRMM 3B42 precipitation product under complex topographic and climatic conditions over Hexi region, Northeastern Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Research,218:347−363. doi:10.1016/j.atmosres.2018.12.011

Wang Y, Li Z, Gao L, et al. 2023. Comparison of GPM IMERG Version 06 final run products and its latest version 07 precipitation products across scales: similarities, differences and improvements [J]. Remote Sensing,15(23):5622. doi:10.3390/rs15235622

Wedajo G K, Muleta M K, Awoke B G, et al. 2020. Performance evaluation of multiple satellite rainfall products for Dhidhessa River Basin (DRB), Ethiopia [J]. Atmospheric Measurement Techniques,14(3):2299−2316. doi:10.5194/amt−14−2299−2021

Wilheit T, Kummerow C D, Ferraro R. 2003. NASDA rainfall algorithms for AMSR-E [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,41(2):204−214. doi:10.1109/TGRS.2002.808312

Wu L, Xu Y, Wang S. 2018. Comparison of TMPA-3B42RT legacy product and the equivalent IMERG products over mainland China [J]. Remote Sensing.10(11):1778. doi:10.3390/rs10111778

Yang M, Liu G, Chen T, et al. 2020. Evaluation of GPM IMERG precipitation products with the point rain gauge records over Sichuan, China [J]. Atmospheric Research,246:105101. doi:10.1016/j.atmosres.2020.105101

Yu L, Leng G, Python A, et al. 2021. A comprehensive evaluation of latest GPM IMERG V06 early, late and final precipitation products across China [J]. Remote Sensing,13:1208. doi:10.3390/rs13061208

Zhou Z, Guo B, Xing W, et al. 2020. Comprehensive evaluation of latest GPM era IMERG and GSMaP precipitation products over mainland China [J]. Atmospheric Research,246:105132. doi:10.1016/j.atmosres.2020.105132

(责任编辑 张 文)