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

多时间尺度GPM降水产品在长江流域的精度评估

孙越 刘莹 严婧 张冰松

Evaluation of GPM precipitation accuracy over Yangtze River Basin at different time scales

SUN Yue，LIU Ying，YAN Jing，ZHANG Bingsong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-113

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

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

基于集合降水预报的长江流域面雨量预报与应用

Prediction and application of area rainfall in the Yangtze River basin based on ensemble precipitation forecasting

暴雨灾害. 2022, 41(5): 571-579 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-029

台风“烟花”影响浙江期间GPM卫星降水产品的评估及订正

Evaluation and correction of GPM satellite precipitation products during Typhoon "In-Fa" affecting Zhejiang

暴雨灾害. 2023, 42(6): 704-715 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-054

2016—2021年长江流域$PM_{2.5}$变化特征及主要影响因素分析

Analysis of $PM_{2.5}$ variation characteristics and main influencing factors in the Yangtze River Basin from 2016 to 2021

暴雨灾害. 2024, 43(3): 342-351 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-192

2020年7月4—10日长江流域极端强降雨过程MCS活动特征分析

Analysis of MCS activity characteristics during extreme heavy rainfall in the Yangtze River Basin from July 4 to 10, 2020

暴雨灾害. 2020, 39(6): 593-602 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.007

基于机器学习算法的多源月尺度融合降水产品在中国区域的检验评估

Examination and evaluation of multi-source monthly scale fusion precipitation product in China based on machine learning algorithm

暴雨灾害. 2023, 42(5): 595-605 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-006

关注微信公众号，获得更多资讯信息

孙越,刘莹,严婧,等.2026.多时间尺度 GPM 降水产品在长江流域的精度评估[J].暴雨灾害,45(2):252−262. SUN Yue, LIU Ying, YAN Jing, et al. 2026. Evaluation of GPM precipitation accuracy over Yangtze River Basin at different time scales [J]. Torrential Rain and Disasters,45(2):252−262 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−113

多时间尺度 GPM 降水产品在长江流域的精度评估

孙越, 刘莹, 严婧, 张冰松
(湖北省气象信息与技术保障中心, 武汉 430074)

摘　要: 高时空分辨率卫星降水产品可以弥补地面降水观测的不足, 对长江流域降水监测与水文模型有重要作用。基于 2014—2021 年长江流域国家级地面气象站的降水观测数据, 采用均方根误差 (RMSE)、相对均方根误差 (RRMSE)、相关系数 (CC)、相对偏差 (Bias)、命中率 (POD)、误报率 (FAR)、关键成功指数 (CSI) 等指标, 对比评估全球降水观测计划 (Global precipitation measurement, GPM) 两种卫星降水产品 (GSMaP 和 IMERG) 在该流域的精度, 分析 GSMaP 和 IMERG 小时、日、月降水产品在长江流域的适用性, 并探讨其误差的季节变化。结果表明: (1) GSMaP 和 IMERG 卫星降水产品总体误差指标量级基本一致, 月、日、小时尺度的平均 RMSE 分别约为 40 mm、7 mm 和 0.9 mm, 平均 RRMSE 分别约为 0.4、2 和 7, 平均 CC 分别约为 0.9、0.7 和 0.4, 两种降水产品均表现为总体高估月和日累积降水; (2) GSMaP 和 IMERG 卫星降水产品在月尺度上的适用性优于日和小时尺度, 在长江中下游的适用性优于上游; (3) GSMaP 降水产品在月、日、小时尺度上的误差程度、高估程度以及命中率表现优于 IMERG, 而在小时降水相关性和误报率指标上 IMERG 性能更优。总体上, GSMaP 降水产品精度优于 IMERG, 基本能反映长江流域日和月时间尺度降水特征。

关键词: GPM 卫星降水; 多时间尺度; 精度评估; 长江流域
中图法分类号: P412　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−113

Evaluation of GPM precipitation accuracy over Yangtze River Basin at different time scales

SUN Yue, LIU Ying, YAN Jing, ZHANG Bingsong

(*Hubei Meteorological Information and Technological Support Center*, *Wuhan* 430074)

Abstract: Satellite precipitation data with high temporal and spatial resolution can effectively address the shortcomings of ground-based observations, playing a pivotal role in precipitation monitoring and hydrological modeling within the Yangtze River Basin. This study aims to evaluate the performance of two satellite precipitation products (GSMaP and IMERG) at hourly, daily and monthly time scales by a series of metrics, such as root mean square error (RMSE), relative root mean square error (RRMSE), correlation coefficient (CC), relative error (Bias), hit rate (POD), false alarm rate (FAR), and critical success index (CSI), in comparison with ground-based observations along the Yangtze River Basin during 2014-2021. The results are as follows. (1) The overall error metrics of the two GPM satellite precipitation products are basically the same, with an average RMSE of about 40 mm, 7 mm, and 0.9 mm at the monthly, daily, and hourly scales, and an average RRMSE of about 0.4, 2, and 7, respectively. The average correlation coefficients are about 0.9, 0.7, and 0.4, respectively. Both GSMaP and IMERG show an overall overestimation of monthly and daily precipitation. (2) Both GSMaP and IMERG exhibit better performance on a monthly scale compared to daily and hourly scale. Furthermore, they perform better in the middle and lower of the Yangtze River than in the upper regions. (3) On monthly, daily, and hourly scales, GSMaP precipitation prodcurts outperform IMERG in terms of errors, bias, and hit rate, while the IMERG demenstrates better correlation and false alarm rate than GSMaP on hourly scale. Overall, the GSMaP precipitation demonstrates higher accuracy than IMERG and can capture the daily and monthly precipitation characteristics in the Yangtze River basin more precisely.

Key words: GPM satellite precipitation; multi-time scale; accuracy evaluation; the Yangtze River Basin

收稿日期: 2024−06−05; **定稿日期**: 2024−10−31
资助项目: 湖北省自然科学基金联合基金项目 (2022CFD133)
第一作者: 孙越, 主要从事气象观测数据质量评估与应用研究。E-mail: sunyue24@foxmail.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

引　言

降水代表了地球表层与大气之间至关重要的能量和水分交换 (Skofronick et al., 2018), 是天气气候相关研究的关键变量 (Shawky et al., 2019)。地面气象站观测虽可获得小范围较为准确的降水数据, 但存在空间分布不均匀以及部分地区测站稀少等问题, 难以准确反映大尺度降水的时空分布 (Kidd, 2001; Testik and Gebremichael, 2010)。卫星遥感技术能够克服传统观测方法在时空上的局限性, 实现全方位、多时相、大范围的连续降水观测。2014 年, 由美国航空航天局 (NASA) 和日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 联合实施的全球降水观测计划 (Global precipitation measurement, GPM), 是热带降水测量计划 (TRMM) 的后续卫星降水计划 (唐国强等, 2015; Hou et al., 2014)。GPM 降水卫星携带了全球第一个 Ku/Ka 波段双频测雨雷达 (Prakash et al., 2016), 能够更加精准地监测微量降水 (<0.05 mm·h^{-1})和固态降水 (Guo et al., 2016)。与 TRMM 相比, GPM 卫星降水产品覆盖范围更广, 时空分辨率更高 (曾岁康等, 2019)。

近年来, 国内外众多学者对 GPM 降水产品的精度进行了评估分析, 认为 GPM 系列产品可以在全球、区域和流域尺度下的水文模拟、气候变化、天气监测等研究中发挥重要作用 (傅云飞等, 2022; 蔡志颖等, 2023; 李洪兵等, 2024; 王号等, 2025)。GPM 的两种主流卫星降水产品分别为 GPM 多卫星反演融合产品 (Integrated multi-satellite retrievals for GPM, IMERG) 和全球卫星降水分布 (Global satellite mapping of precipitation, GSMaP) (Tian et al., 2010)。针对 IMERG 降水产品的精度, 金晓龙等 (2016)、王思梦等 (2018) 分别在天山和黑河流域分析了地形和季节差异对 IMERG 精度的影响, 结果表明 IMERG 产品在降水充沛的夏季和中等海拔地区精度较高。同时一些学者对 IMERG 和 GSMaP 也进行了比较研究, 例如 Lu 和 Yong (2018) 发现站点校正产品在青藏高原具有较高的精度, 特别是 GSMaP; Ning 等 (2017) 发现 IMERG 和 GSMaP 产品在中国东部具有完全不同的总偏差空间分布, 其中 GSMaP 在盆地尺度上精度相对高于 IMERG; 尚明等 (2023) 对比了 IMERG 和 GSMaP 对中国极端降水的监测能力, 指出这两种产品在低海拔区域表现更优, 且 GSMaP 对于弱降水的探测能力优于 IMERG。可见不同区域卫星降水产品表现有所不同 (曲学斌等, 2020; 张茹等, 2021; 万昊旻等, 2024)。通过对比研究不仅能明确不同产品的适用性, 还能对卫星降水产品算法的改进和误差订正提供科学参考。

长江流域覆盖青海、西藏、四川、云南、重庆、湖北、湖南、江西等多个省区市, 包含金沙江、岷沱江、嘉陵江、汉江、乌江等多个子流域, 是长江经济带的重要组成部分。该区域地形气候复杂, 降水充沛, 也极易发生洪涝、泥石流和山体滑坡等自然灾害。特别是在金沙江上游地区, 地势险峻, 气象观测站十分稀疏, 难以获得准确降水数据。在当前全球气候变化加剧的背景下, 长江流域水资源脆弱性增强, 水文极端事件频发给流域安全带来挑战, 亟需连续的时空降水信息用于天气监测、水文模型和流域气候预测。而 GPM 卫星降水产品高分辨率、高时效性和全覆盖的优势能够有效补充长江流域上游站点稀疏地区的降水数据 (黄瑶等, 2024)。对于卫星降水产品在长江流域的准确评估是合理使用该数据的前提, 例如余菲等 (2024) 评估了 GSMaP、IMERG 以及其他 4 种卫星降水日值产品在长江流域的数据质量, 表明 GSMaP 的精度高于其他产品; 杨震宇等 (2019) 量化分析了 GSMaP 和 IMERG 日降水在长江流域的性能, 发现 GSMaP 总体优于 IMERG。但现有研究大多针对日时间尺度, 而对 GPM 卫星小时降水产品在长江流域适用性评估鲜有涉及, 同时缺乏对卫星降水监测能力多时间尺度的对比评估。因此, 在现有研究基础上, 本文进一步细化评估指标, 针对 GPM 卫星降水在小时、日、月三种时间尺度的适用性问题, 以 2014—2021 年国家级地面气象自动观测站逐小时降水观测为基准, 采用 4 种定量误差指标和 3 种分类评分指数对比分析相同时间段内 GPM GSMaP 和 IMERG 两种卫星降水产品的准确性, 评估 GSMaP 和 IMERG 小时、日、月降水产品在长江流域的适用性, 并分析其误差的季节变化, 以期为这两种降水产品在长江流域不同时间尺度、不同区域、不同目的的使用提供科学参考, 同时为长江流域降水监测及卫星降水驱动水文模型的模拟研究提供数据参考。

1　资料与方法

1.1　研究数据

1.1.1　卫星降水数据

本文评估的卫星数据为 IMERG 的 Final 产品 (https://disc.gsfc.nasa.gov/) 和GSMaP 的GSMaP_MVK 算法产品(http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index.htm)。IMERG 的 Final 产品经过月尺度气候资料校正, 数据精度要优于 Early、Late 产品。本文使用 Final 产品中经过全球降水气候中心站点校正后的数据集 IMERG_Cal, 其空间分辨率为 0.1°×0.1°, 时间分辨率

为 30 min。对于 GSMaP 产品，是在 GSMaP_MVK 基础上。采用全球雨量站点、地形和气候等信息校正后的 GSMaP_Gauge 产品，其空间分辨率为 0.1°×0.1°，时间分辨率为 1 h。

1.1.2 地面降水观测数据

本文选择湖北省气象信息与技术保障中心大数据云平台提供的 2014—2021 年长江流域国家级气象观测站逐小时降水观测数据作为评估检验基准，站点分布如图 1 所示。本文关注的研究区域是长江流域，包括长江干流 (FA) 及其 8 个子流域：金沙江流域 (FB)、岷沱江流域 (FC)、嘉陵江流域 (FD)、乌江流域 (FE)、洞庭湖流域 (FF)、汉江流域 (FG)、鄱阳湖流域 (FH) 和太湖流域 (FI)。这 9 个流域国家级气象观测站个数分别为 170、81、70、62、44、129、68、85 和 37。

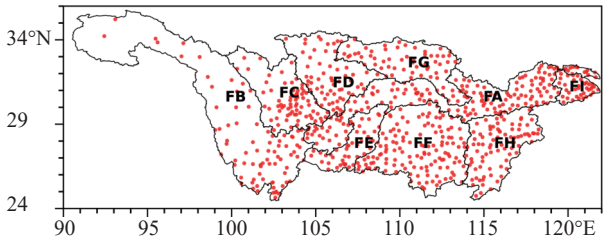


图 1 长江流域国家级气象观测站 (红色圆点) 分布

Fig. 1 Spatial distribution of national weather observation stations (red circles) over the Yangtze River Basin

1.2 研究方法

1.2.1 时空匹配

时间尺度上，将卫星降水数据和地面观测数据时区统一为世界时。本文评估对象为小时降水量、日降水量和月降水量，其中日降水量和月降水量由小时降水数据累积计算得到。

空间尺度上，卫星降水产品为网格数据，地面自动站观测为站点数据，为便于比较，采用最邻近点插值方法 (施丽娟等, 2022) 将网格数据插值到站点所在的经纬度位置上，以站点观测为基准，评估卫星降水产品的精度。

1.2.2 定量评估指标

采用 4 种定量误差指标综合评估 IMERG 和 GSMaP 降水产品在长江流域的精度，评估指标包括：均方根误差 (RMSE，记为 E_{RMS})，用于量化卫星降水与站点观测降水之间的离散度，反映卫星降水产品整体误差水平和精度；相对均方根误差 (RRMSE，记为 E_{RRMS})，在 RMSE 的基础上可以进一步比较卫星降水产品在不同尺度和不同地区的精度；相关系数 (CC，记为 C_{C})，用于量化卫星降水与站点观测降水的线性相关程度；相对偏差 (Bias，记为 B_{ias})，可以衡量卫星降水产品高估或低估降水的现象；当卫星降水与观测相比呈现低 Bias、RMSE、RRMSE 和较高的 CC 时，表明其精度较好。各项指标计算公式如下

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

$$C_{\mathrm{C}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(G_i-\overline{G})(S_i-\overline{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(G_i-\overline{G})^2}\times\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i-\overline{S})^2}} \tag{2}$$

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

$$E_{\mathrm{RRMS}}=\frac{E_{\mathrm{RMS}}}{\overline{G}} \tag{4}$$

其中 S 代表卫星降水数值，G 代表地面降水观测数值，i 为地面观测站点序号，n 为地面观测站点个数。

采用分类评分指数评估卫星数据对真实降水事件的辨识能力，包括：降水命中率 (POD，记为 P_{OD})，表示正确检测到的降水事件与地面站观测到的总事件的比率；降水误报率 (FAR，记为 R_{FA})，给出卫星检测到的总事件中假警报事件的分数；关键成功指数 (CSI，记为 I_{CS})，测量卫星正确检测到的事件与观测到和检测到的事件总数的比率 (Xu et al., 2017; Zhou et al., 2020)。各项指标计算公式如下

$$P_{\mathrm{OD}}=H/(H+M) \tag{5}$$

$$R_{\mathrm{FA}}=F/(H+F) \tag{6}$$

$$I_{\mathrm{CS}}=H/(H+M+F) \tag{7}$$

其中，H 为地面观测和卫星观测同时记录的降水事件次数，M 为地面观测记录但卫星产品未检测到的降水事件次数，F 为卫星检测但地面观测未记录的降水事次件数 (表 1)。POD 越高表示卫星降水数据对降水事件的漏测率越低，FAR 越低表示降水事件被

表 1 卫星降水与地面观测降水列联表

Table 1 Contingency table of satellite precipitation and observations

地面观测降水	卫星观测降水	
	观测值≥阈值	观测值<阈值
观测值≥阈值	H	M
观测值<阈值	F	/

注：本文以0.1 mm·h^{-1}作为是否发生小时降水事件的阈值，以 0.1 mm·d^{-1}作为是否发生日降水事件的阈值。

错误估计的概率越小, CSI 指数综合反映了卫星降水数据探测实际降水实际的能力。最优 POD、FAR 和 CSI 的值分别为 1、0 和 1。

2 不同时间尺度 GSMaP 和 IMERG 降水产品精度对比评估

对 GSMaP 和 IMERG 产品分别进行小时、日和月时间尺度精度评估, 通过定量误差指标和分类评分指标的空间分布对比评估两种卫星降水产品在长江流域的适用性。

2.1 小时降水精度评估

为定量评估卫星小时降水量精度, 图 2 和表 2 给出 GSMaP 和 IMERG 小时降水量的 RMSE、CC、RRMSE 和 Bias 的空间分布。从中看到, 两种卫星产品 RMSE 的空间分布 (图 2a、b) 基本一致, 主要表现为从长江流域东南到西北逐渐减小的特点; GSMaP 和 IMERG 平均 RMSE 分别为 0.92 和 0.97, IMERG 在长江中下游的 RMSE 明显高于 GSMaP。卫星产品的小时降水和观测相关性在整个流域分布较为一致 (图 2c、d), 超过 99% 的站点相关性均小于 0.60, 其中 IMERG 平均相关性 (0.45) 略优于 GSMaP。由于长江中下游地区降水频次和量级大于上游地区, 绝对误差 (RMSE) 的大小无法直接反映卫星产品在不同地区的适用程度。通过计算绝对误差与平均降水量的比值进一步衡量卫星降水误差相对于当地降水量级的比例, 图 2e、f 对比了两种卫星产品相对误差 (RRMSE) 的空间分布, 可见 GSMaP 和 IMERG 平均 RRMSE 分别为 6.41 和 7.51, 在每个子流域 GSMaP 的相对误差均低于 IMERG; 同时可以看出两种卫星产品在岷沱江和嘉陵江的 RRMSE 明显偏高, 表明 GPM 对这些区域小时降水监测的效果差于其他地区。由偏差分布 (图 2g、h) 可知, GSMaP 和 IMERG 的偏差程度差异较大, 特别是在金沙江和岷沱江流域 IMERG 为明显的负偏差。GSMaP 小时降水主要表现为高估, 平均偏差为 5.85%, 其中约 70% 站点偏高, 30% 偏低, IMERG 小时降水主要表现为低估, 平均偏差-2.51%, 其中约 48% 站点偏高, 52% 偏低。

由小时降水的分类评估指标分布 (图 3a、b) 可知, 各子流域 GSMaP 正确监测到小时降水的概率明显大于 IMERG, 两种卫星产品的平均 POD 分别为 0.72 和 0.49, 它们均表现在长江下游 POD 高于上游地区。从图 3c、d 可见, GSMaP 误报率总体高于

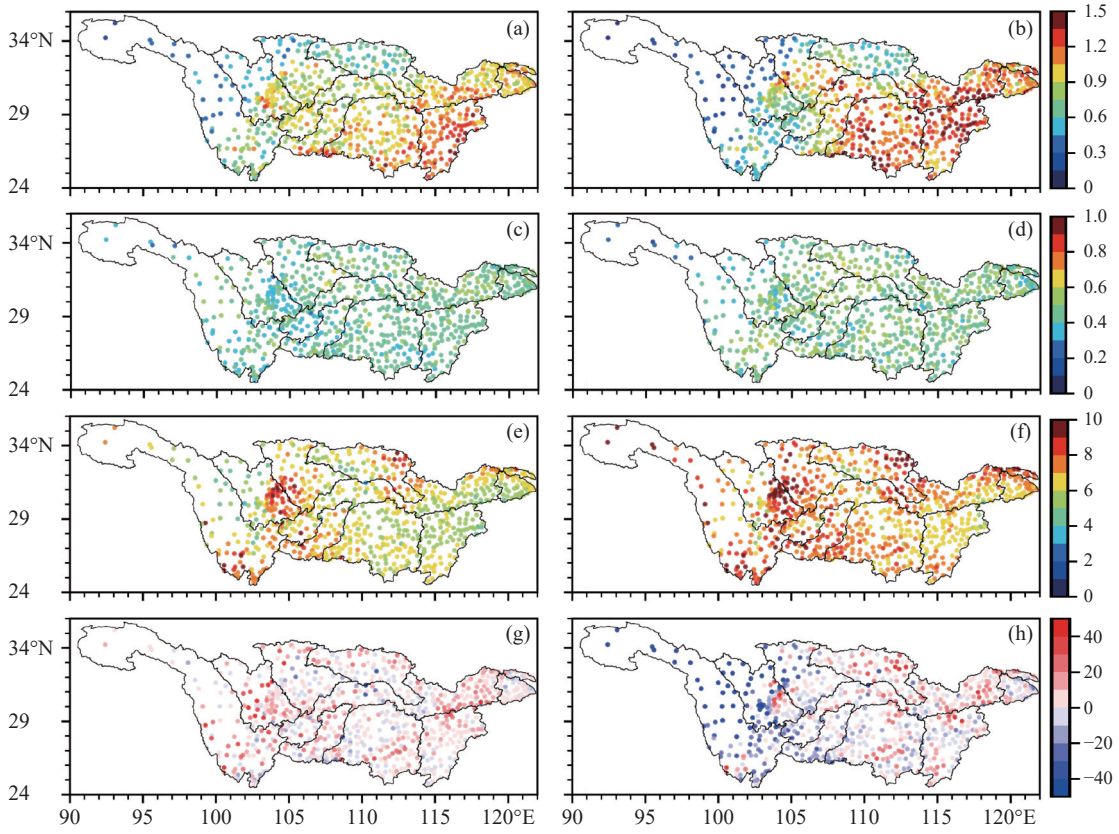


图 2 2014—2021 年长江流域 GSMaP (a、c、e、g) 和 IMERG (b、d、f、h) 小时降水产品 RMSE (a、b, 单位: mm)、CC (c、d)、RRMSE (e、f) 和 Bias (g、h, 单位: %) 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of (a, b) RMSE (unit: mm), (c, d) CC, (e, f) RRMSE and (g, h) Bias (unit: %) of (a, c, e, g) GSMaP and (b, d, f, h) IMERG 's hourly precipitation over the Yangtze River Basin from 2014 to 2021

表 2 2014—2021 年长江流域 GSMaP 和 IMERG 产品小时降水量定量评估结果

Table 2 Evaluation indices of hourly precipitation of GSMaP and IMERG in the Yangtze River Basin from 2014 to 2021

子流域	RMSE		CC		RRMSE		Bias		POD		FAR		CSI	
	G	I	G	I	G	I	G	I	G	I	G	I	G	I
FA	0.98	1.09	0.47	0.48	6.27	7.33	5.77	5.33	0.74	0.51	0.61	0.51	0.34	0.33
FB	0.67	0.51	0.43	0.45	6.80	8.06	8.24	−22.09	0.68	0.50	0.68	0.55	0.27	0.30
FC	0.84	0.71	0.42	0.46	6.95	8.08	12.83	−15.19	0.68	0.43	0.68	0.56	0.27	0.27
FD	0.80	0.87	0.45	0.49	6.93	8.02	3.80	−8.56	0.67	0.44	0.64	0.54	0.30	0.29
FE	0.96	0.88	0.43	0.48	7.02	8.13	6.95	−8.41	0.62	0.36	0.68	0.52	0.26	0.26
FF	1.03	1.20	0.44	0.48	6.10	7.21	3.81	0.52	0.74	0.46	0.64	0.51	0.32	0.31
FG	0.71	0.76	0.48	0.49	6.57	7.65	3.98	10.04	0.72	0.52	0.59	0.53	0.35	0.32
FH	1.19	1.26	0.46	0.47	5.78	6.75	6.06	3.48	0.80	0.56	0.63	0.49	0.34	0.36
FI	1.00	1.10	0.48	0.47	5.95	7.07	0.03	−1.83	0.74	0.56	0.56	0.52	0.38	0.35

注: G表示GSMaP, I表示IMERG, 下同; 填色表示评估指标相对更优, 下同。

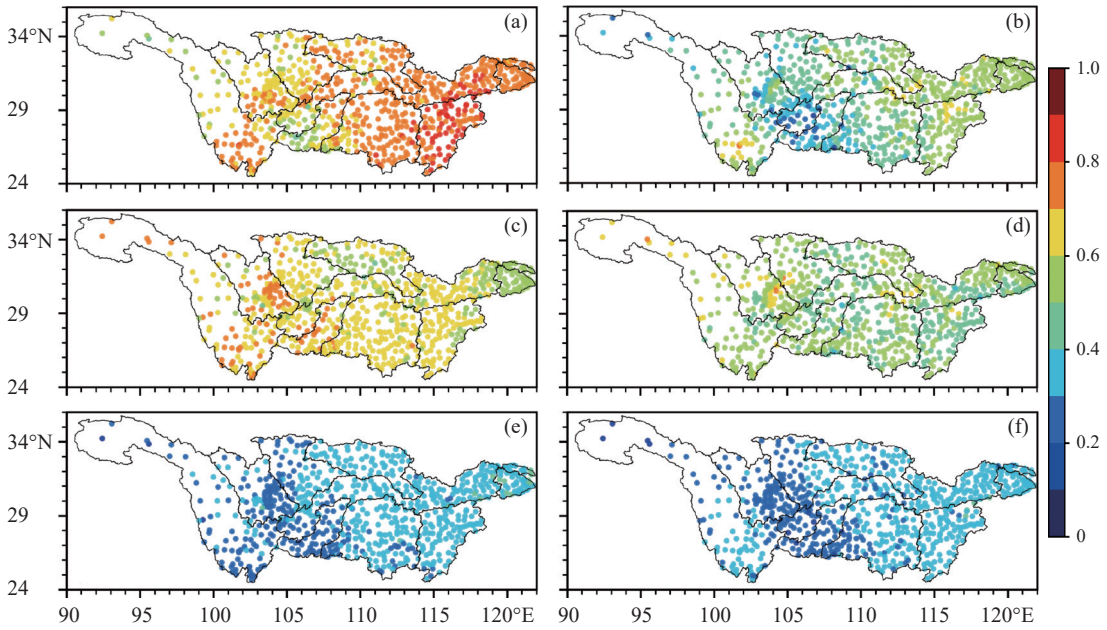


图 3 2014—2021 年长江流域 GSMaP (a、c、e) 和 IMERG (b、d、f) 小时降水产品的 POD (a、b)、FAR (c、d) 和 CSI (e、f) 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of (a, b) POD, (c, d) FAR and (e, f) CSI of (a, c, e) GSMaP and (b, d, f) IMERG's hourly precipitation over the Yangtze River Basin from 2014 to 2021

IMERG, 平均 FAR 分别为 0.63 和 0.53, 在长江上游区域 GSMaP 明显监测到更多的虚假小时降水。GSMaP 和 IMERG CSI 的空间分布 (图 3e、f) 基本一致, 平均值分别为 0.32 和 0.31, 均表现为在岷沱江、干流上游和乌江流域偏低。

综上, GSMaP 和 IMERG 小时降水的 RMSE、CC、RRMSE 量级基本一致, 而 GSMaP 整体为正偏差、IMERG 整体为负偏差; 综合分析 POD、FAR 和 CSI 发现, GSMaP 产品中小时降水的频次偏多, 导致 POD 和 FAR 均偏高。

2.2 日降水精度评估

将上文同样的方法用于卫星日降水产品精度评估, 图 4 和表 3 给出 GSMaP 和 IMERG 日累积降水 RMSE、CC、RRMSE 和 Bias 的空间分布。从中可见, 两种产品日降水误差分布 (图 4a、b) 中, GSMaP 平均 RMSE 为 6.45 mm, 约 80% 的站点 RMSE 低于 5 mm; IMERG 平均 RMSE 为 7.65 mm, 约 80% 的站点 RMSE 低于 9 mm, 超过 50% 的站点误差位于 7~9 mm 之间。GSMaP 和 IMERG 降水产品在整个流域都与观测数据呈现出较高的相关性 (图 4c、d), GSMaP 平均 CC 为 0.75, 约 28% 的站点 CC 高于 0.80, IMERG 平均 CC 为 0.72, 约 3% 的站点 CC 高于 0.80。相对误差的空间分布 (图 4e、f) 和定量评估指标 (表 3) 表明, 两种卫星产品在长江中下游的洞庭湖、鄱阳湖、太湖和干流下游流域的日降水误差程度优于上游区域, 同时在各个子流域 GSMaP 的相对误

差小于 IMERG。如图 4g、h 所示, 卫星降水在整体上均高估了长江流域的日累积降水: GSMaP 平均 Bias 为 7.49%, 其中 78% 的站点表现为高估观测降水, 22% 的站点表现为低估观测降水; IMERG 平均 Bias 为 12.26%, 其中约 86% 的站点表现为高估观测降水, 14% 的站点表现为低估观测降水。总体平均的统计结果表明, 和 IMERG 相比, GSMaP 的在长江各流域日降水和观测的偏差程度更小、相关性更好、高估程度更小, 这与余菲等 (2024) 和杨震宇等 (2018) 研究结果一致, 同时定量指标进一步表明了卫星产品在长江中下游的适用性优于上游区域。

通过分类评估指标评估了 GPM 卫星降水产品对长江流域日降水事件的命中率、误报率和关键成功指数, 其结果见图 5。GSMaP 的降水命中率空间变化不明显, 在整个长江流域的命中率均较高, 平均为 0.94 (图 5a)。IMERG 的降水命中率在长江中下游较高, 干流上游和乌江大多数站点 POD 低于 0.70, 整个流域平均 POD 为 0.79 (图 5b)。POD 空间分布表明长江流域 GSMaP 对日降水事件的监测能力优于 IMERG。FAR 可以用来表示降水事件被错误估计的

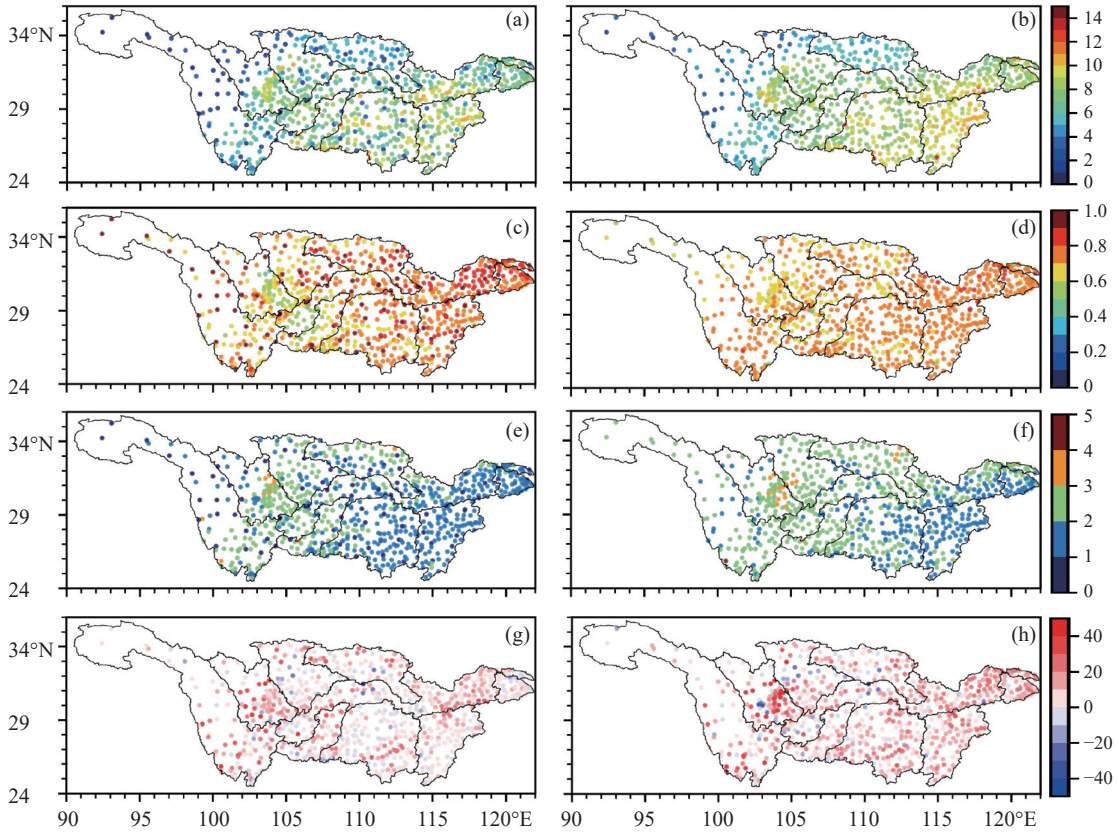


图 4 同图 2, 但为日降水产品

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the daily precipitation data

表 3 同表 2, 但为日降水产品

Table 3 Same as Table 2, but for the daily precipitation data

区域	RMSE		CC		RRMSE		Bias		POD		FAR		CSI	
	G	I	G	I	G	I	G	I	G	I	G	I	G	I
FA	7.04	8.25	0.78	0.74	1.79	2.10	7.53	12.27	0.94	0.83	0.25	0.35	0.72	0.56
FB	4.22	5.22	0.76	0.71	1.79	2.28	10.69	12.31	0.94	0.80	0.32	0.32	0.66	0.58
FC	6.72	7.40	0.67	0.69	2.24	2.52	15.41	18.31	0.95	0.74	0.35	0.34	0.63	0.53
FD	5.96	6.97	0.74	0.70	2.07	2.45	5.07	9.33	0.92	0.77	0.30	0.35	0.66	0.54
FE	6.86	7.62	0.69	0.72	1.98	2.23	9.15	8.36	0.91	0.62	0.25	0.28	0.70	0.50
FF	7.31	8.67	0.75	0.73	1.69	2.03	4.97	12.16	0.94	0.79	0.23	0.30	0.73	0.59
FG	4.91	6.10	0.79	0.71	1.87	2.33	6.89	9.77	0.92	0.83	0.28	0.42	0.68	0.51
FH	7.95	9.61	0.78	0.75	1.51	1.84	6.22	13.22	0.95	0.87	0.24	0.31	0.73	0.63
FI	6.94	8.16	0.80	0.76	1.61	1.90	1.45	14.62	0.96	0.90	0.22	0.37	0.75	0.59

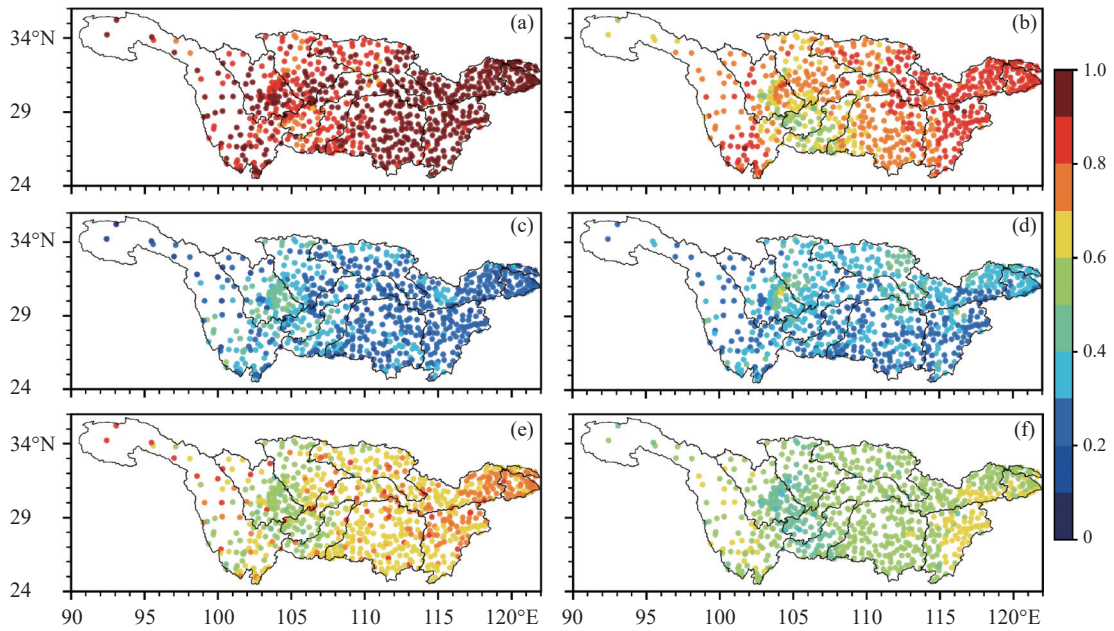


图 5 同图 3, 但为日降水产品

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the daily precipitation data

概率, GSMaP 和 IMERG 的平均 FAR 分别为 0.27 和 0.34。长江上游的金沙江、岷沱江、嘉陵江和乌江流域, 两种卫星降水产品降水误报率分布基本一致, 平均 FAR 均为 0.31; 长江中下游的汉江、洞庭湖、鄱阳湖、太湖和干流下游流域, GSMaP 的误报率明显小于 IMERG (图 5c、d)。通常长江中下游降水充沛, 而 IMERG 却检测到过多虚假的日降水事件。GSMaP 和 IMERG 的平均 CSI 分别为 0.70 和 0.56, GSMaP 的 CSI 在各子流域明显高于 IMERG (图 5e、f); 其中图 5f 显示 IMERG 的 CSI 由东南向西北减小, 特别是在岷沱江流域的四川盆地、乌江流域的云贵高原东侧等区域小于 0.50, 表明卫星在这些地形复杂区域日降水探测能力较弱。以上结果表明 GSMaP 正确监测日降水事件的能力好于 IMERG。综合分析 RRMSE、CC、Bias 和分类评估指标发现, 长江中下游卫星日降水的精度总体优于上游区域。这一现象可能是由于海拔、坡度、坡向等地形因素导致的上游区域降水时空异质性强, 监测难度大, 同时受长江上游地形复杂区域天气系统影响卫星传感器探测能力降低, 导致卫星日降水产品在长江上游误差总体大于中下游区域。

以上分析表明, GSMaP 日降水的 RMSE、CC、RRMSE、Bias、POD、FAR 和 CSI 指标总体优于 IMERG。GSMaP 和 IMERG 日降水在长江中下游的相对误差小于上游地区。

2.3 月累积降水精度评估

为评估两种卫星月降水产品的精度问题, 图 6 给出 GSMaP 和 IMERG 月累积降水在各气象站点检验精度指标的空间分布, 表 4 为相关统计结果。GSMaP 和 IMERG 降水产品的四个定量误差指标的空间分布形态基本一致。GSMaP 的平均 RMSE 为 39.18 mm, 22% 的站点 RMSE 小于 20 mm; IMERG 平均 RMSE 为 42.21 mm, 4% 的站点 RMSE 小于 20 mm (图 6a、b)。两种卫星产品的相对误差在大部分区域小于 0.5, 明显的相对误差主要出现在金沙江和岷沱江流域下游 (图 6e、f)。两种卫星降水的月累积值和观测有较好的相关性, 平均相关系数均高于 0.90, 表明它们能很好地体现长江流域月降水的整体变率 (图 6c、d)。两种卫星降水均高估了长江流域的月累积降水: GSMaP 的平均 Bias 为 4.16%, 约 65% 的站点表现为高估, 35% 的站点表现为低估; IMERG 的平均 Bias 为 10.58%, 约 83% 的站点表现为高估, 17% 的站点表现为低估 (图 6g、h)。其中 IMERG 在岷沱江的低估和高估现象更明显。

综上, GSMaP 和 IMERG 月累积降水的 RMSE、CC、RRMSE、Bias 指标量级基本一致, GSMaP 适用性略优于 IMERG。

2.4 误差指标的季节变化

基于月累积降水, 进一步分析卫星降水产品误差的季节性变化特点。通过计算多年每个月的 RMSE、CC、RRMSE 和 Bias, 得到误差指标的季节变化特征 (图 7)。GSMaP 和 IMERG 的 RMSE (图 7a) 和 CC (图 7b) 均有明显的季节变化, 冬季到夏季 RMSE 增加、CC 减小的特点, 说明卫星降水产品在夏季的误差大于冬季。对比两种卫星降水产品发

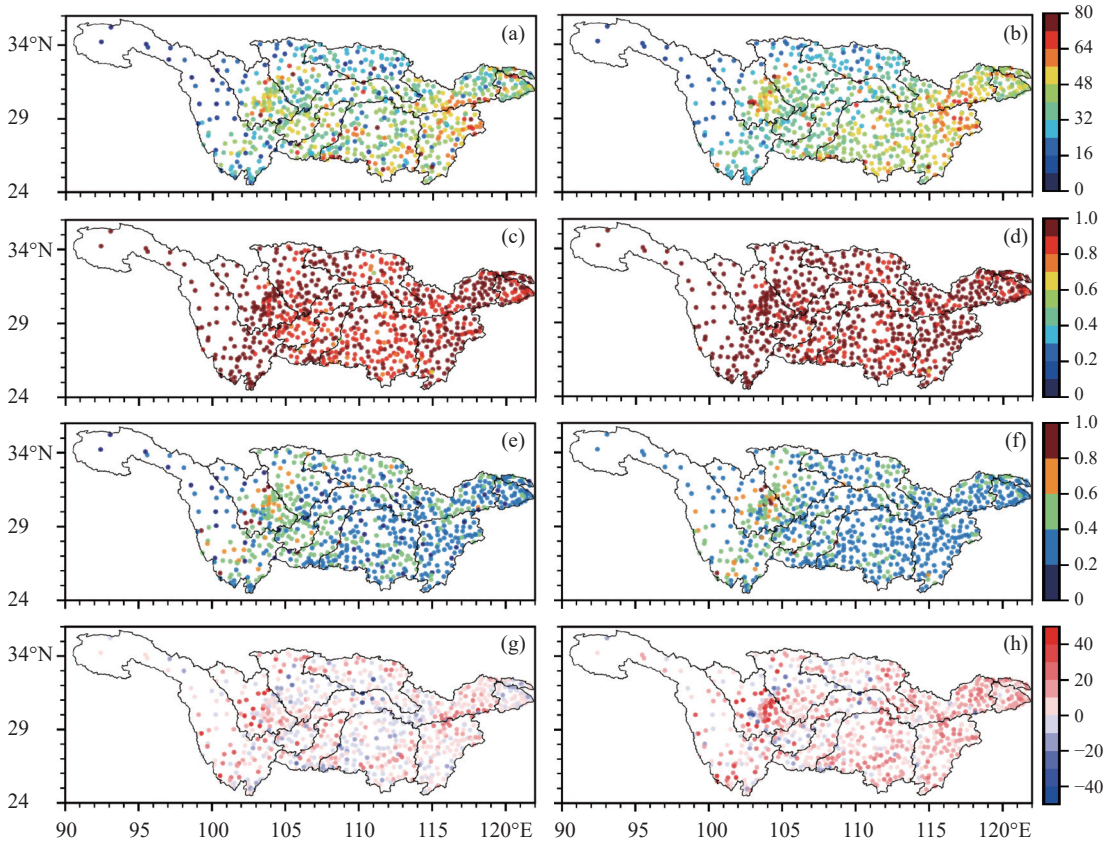


图 6 同图 2, 但为月降水产品

Fig. 6 Same as Fig. 2, but for the monthly precipitation data

表 4 同表 2, 但为月降水产品

Table 4 Same as Table 2, but for the monthly precipitation data

子流域	RMSE		CC		RRMSE		Bias	
	G	I	G	I	G	I	G	I
FA	42.45	45.66	0.90	0.91	0.37	0.37	3.80	10.58
FB	27.05	28.62	0.94	0.95	0.41	0.43	6.68	10.59
FC	41.45	43.60	0.91	0.93	0.51	0.50	11.81	16.53
FD	33.67	36.78	0.91	0.92	0.42	0.43	1.69	7.69
FE	40.48	40.53	0.89	0.91	0.40	0.39	5.20	5.85
FF	44.35	45.97	0.87	0.90	0.36	0.36	1.81	10.51
FG	30.86	32.75	0.89	0.91	0.39	0.39	2.89	7.92
FH	49.70	52.22	0.91	0.92	0.32	0.33	5.01	11.82
FI	42.60	45.94	0.90	0.91	0.32	0.34	−1.47	12.86

现, 冬季 GSMaP 月累积降水和观测的误差更小、相关性更高, 而春、夏和秋季 IMERG 的表现略好于 GSMaP。其中, IMERG 的相对误差在 12、1、2 和 3 月远高于 GSMaP (图 7c), 表明 IMERG 冬季误差程度远大于 GSMaP。冬、春和夏季 GSMaP 对月降水的高估程度小于 IMERG, 秋季 GSMaP 对月降水的高估程度大于 IMERG (图 7d)。

以上结果表明 GSMaP 和 IMERG 夏季误差较大, 而冬季两者误差特征差异显著, 下面以夏季和冬季作为典型季节进一步分析卫星降水和地面观测降水的量级分布差异。图 8 为 GSMaP 和 IMERG 夏季和冬季月累积降水高斯核密度散点图。在夏季 (图 8a、b), 大多数站点的月降水集中在 50~200 mm, 而这些区间的降水大概率出现在对角线的下方, 即卫星高估了多数站点的夏季月累积降水。同时, 随着降水量级的增加, 散点的离散度增加, 表明卫星对大量级降水的监测存在更大的不确定性。GSMaP 和 IMERG 的误差定量统计指标相差不大, GSMaP 的 RMSE、CC 和 Bias 分别为 69.57 mm、0.83 和 4.94%, IMERG 的 RMSE、CC 和 Bias 分别为 66.87 mm、0.85

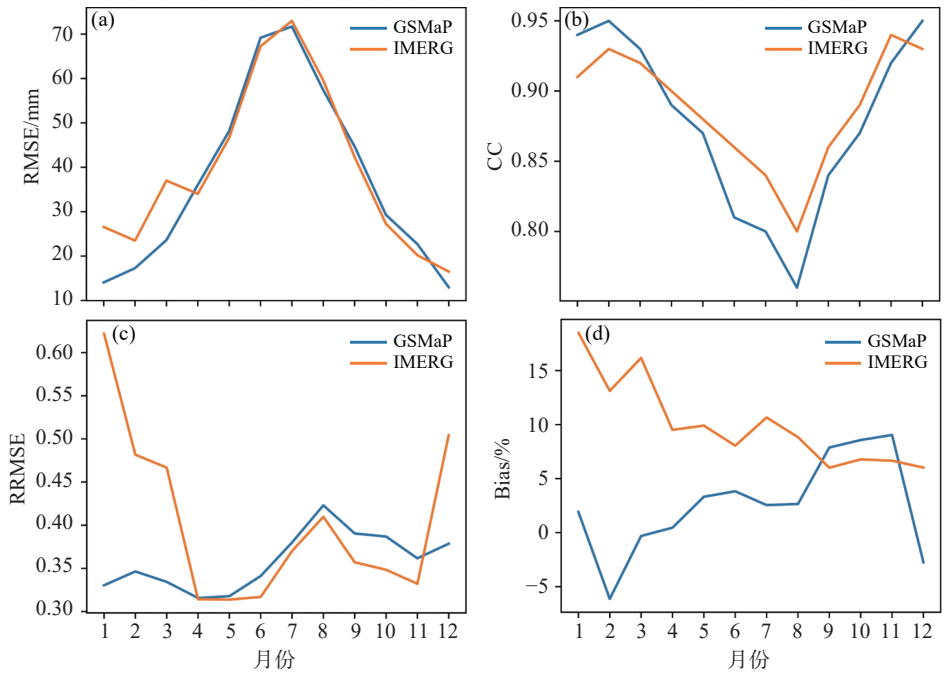


图 7 2014—2021 年 GSMaP 和 IMERG 产品月累积降水多年平均 RMSE (a)、CC (b)、RRMSE (c) 和 Bias (d) 的月变化

Fig. 7 Seasonal variation of multi-year average (a) RMSE, (b) CC, (c) RRMSEand (d) Bias of GSMaP and IMERG's monthly precipitation over 2014-2021

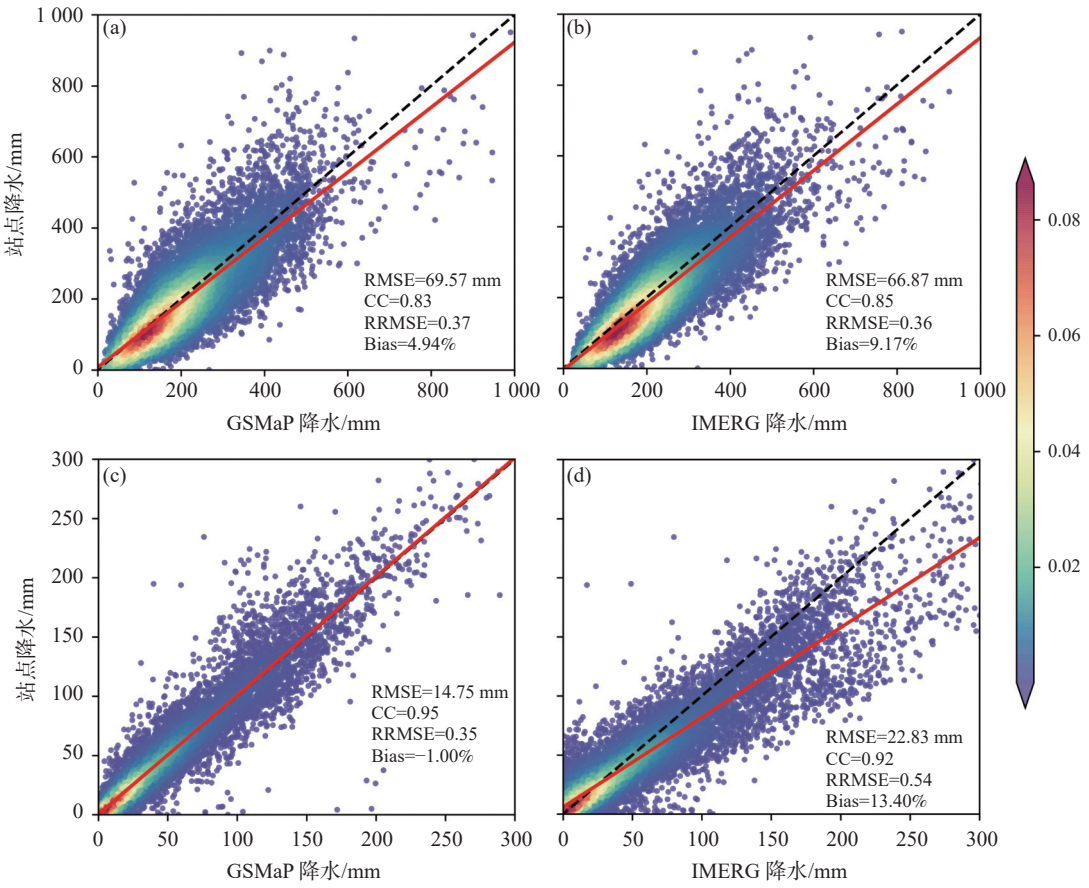


图 8 2014—2021 年长江流域夏季 (a、b) 和冬季 (c、d) GSMaP (a、c) 和 IMERG (b、d) 产品月累积降水概率密度散点分布 (红色实线为线性回归拟合线，黑色虚线为 1:1 参考线)

Fig. 8 Distribution of probability density scatter of monthly precipitation of (a, c) GSMaP and (b, d) IMERG in the Yangtze River Basin in (a, b) summer and (c, d) winter from 2014 to 2021 (The red solid line represents the linear regression fit and the black dashed line denotes the 1:1 reference line)

和 9.17%。冬季 (图 8c、d), 大多数站点的月累积降水集中在 0~50 mm, 同时散点分布相对夏季更集中, 这表明卫星在小量级降水监测上的不确定性更小。对比 GSMaP 和 IMERG 的散点分布看出, GSMaP 的散点离散度小且均匀地集中在对角两侧, 回归线和对角线几乎重合, RMSE、CC 和 Bias 分别为 14.75 mm、0.95 和−1.00%。而 IMERG 散点的离散度更大, 明显高估了大多数站点的月降水, RMSE、CC 和 Bias 分别为 22.83 mm、0.92 和 13.40%。

3 结论与讨论

本文以 2014—2021 年国家级气象观测站逐小时降水观测为基准, 通过误差评估指标 (RMSE、CC、RRMSE 和 Bias) 和分类评分指标 (POD、FAR 和 CSI) 对比了两种卫星产品 IMERG 和 GSMaP 在长江流域小时、日、月三种尺度的适用性, 并研究其误差的季节变化。得到以下主要结论:

(1) 在小时尺度上, GSMaP 和 IMERG 卫星降水产品平均 RMSE 约为 0.9 mm, 平均 RRMSE 约为 7, 平均相关系数约 0.4, GSMaP 总体表现为高估小时降水, IMERG 则总体表现为低估小时降水。在日尺度上, IMERG 和 GSMaP 卫星降水产品平均 RMSE 约为 7 mm, 平均 RRMSE 约为 2, 平均相关系数约为 0.7, 总体高估了长江流域的日降水量。在月尺度上, IMERG 和 GSMaP 卫星降水产品平均 RMSE 约为 40 mm, 平均 RRMSE 约为 0.4, 和观测的相关性较高 (0.9), 对月降水量级总体表现为高估。

(2) 空间分布上, GPM 卫星降水产品在长江流域中下游的绝对误差大于上游地区, 但是对当地降水量级程度来说, 在长江流域中下游的相对误差更低; GPM 卫星对长江上游的降水高估程度大于中下游区域。从时间尺度来看, 结合 RRMES 和 CC, GPM 卫星降水产品对月、日和小时尺度降水量级的监视能力依次递减。从季节变化来看, IMERG 和 GSMaP 卫星降水产品在夏季的误差大于冬季, 在夏季月累积降水表现为偏高的特点。

(3) 对比 GSMaP 和 IMERG 在长江流域的精度, GSMaP 小时降水产品偏差小于 IMERG, 而 IMERG 小时降水和地面观测的相关性以及对降水事件的误报率优于 GSMaP; 和 IMERG 相比, GSMaP 的日降水和观测的偏差程度更小、相关性更好、高估程度更小, 且 GSMaP 正确监测日降水事件的能力好于 IMERG; GSMaP 月降水的平均误差和偏差程度均好于 IMERG, 特别是在冬季, GSMaP 月累积降水产品的适用性远优于 IMERG。

GPM 卫星降水产品可优先用于月尺度和日尺度的降水趋势及变率分析, 但对总降水量存在高估现象, 在实际应用中需结合地面观测数据进行校正。GPM 小时降水量的平均误差较大, 但其对降水事件发生与否仍具有较强的的监测能力, 可为观测稀疏区域降水变化及实时天气形势研判提供有价值的参考。下一步研究可结合地形、气候及降水量级等关键因子, 开展产品算法改进与误差订正工作 (Beria et al., 2017), 尤其在金沙江、岷沱江上游等站点稀疏区域, 需通过偏差订正方法降低卫星观测的偏差。

参考文献 (References):

蔡志颖,郑艳,段晶晶,等.2023.台风“烟花”影响浙江期间 GPM 卫星降水产品的评估及订正[J].暴雨灾害,42(6):704−715. Cai Z Y, Zheng Y, Duan J J, et al. 2023. Evaluation and correction of GPM satellite precipitation products during Typhoon "In-Fa" affecting Zhejiang [J]. Torrential Rain and Disasters,42(6):704−715 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−054

傅云飞,罗晶,罗双,等.2022.GPM 卫星 DPR 和 GMI 探测的 2018 年 5 月重庆超级单体云团降水结构特征分析[J].暴雨灾害,41(1):1−14. Fu Y F, Luo J, Luo S, et al. 2022. Rainstorm structure of a supercell cloud occurred in Chongqing in May 2018 measured by GPM DPR and GMI [J]. Torrential Rain and Disasters,41(1):1−14 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.01.001

黄瑶,刘自牧,宋雯雯,等.2024.全球降水观测计划 IMERG 对金沙江下游极端降水反演效果评估[J].高原山地气象研究,44(3):76−84. Huang Y, Liu Z M, Song W W, et al. 2024. Evaluation of GPM IMERG precipitation product on extreme precipitation in the lower reaches of Jinsha River [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(3):76−84 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.03.009

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]. Journal of natural resources,31(12):2074−2085 (in Chinese). doi:10.11849/zrzyxb.20160057

李洪兵,枚雪彬,夏羽.2024. IMERG 降水产品在 2021 年台风“烟花”降水过程的检验分析[J].暴雨灾害,43(1):73−83. Li H B, Mei X B, Xia Y. 2024. Verification and analysis of IMERG during the precipitation process of Typhoon In-Fa in 2021 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):73−83 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−046

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

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 China's mainland [J]. Meteorological Monthly,48(11):1428−1438 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.091601

尚明,任阳阳,宋宏利,等.2023. IMERG 和 GSMaP 对中国极端降水监测

能力评估[J].地球信息科学学报,25(9):1813−1826. Shang M, Ren Y Y, Song H L, et al. 2023. Evaluation of IMERG and GSMaP's monitoring capability for extreme precipitation in China [J]. Journal of Geo-information Science,25(9):1813−1826 (in Chinese). doi:10.12082/dqxxkx.2023.220056

唐国强,龙笛,万玮,等.2015.全球水遥感技术及其应用研究的综述与展望[J].中国科学: 技术科学,45(10):1013−1023. Tang G Q, Long D, Wan W, et al. 2015. An overview and outlook of global water remote sensing technology and applications [J]. Scientia Sinica Technologica, 45(10):1013−1023 (in Chinese). doi:10.1360/N092015−00024

万昊旻,李建,李妮娜.2024.基于小时降水资料的华西秋雨精细化特征分析[J].暴雨灾害,43(2):168−175. Wan H M, Li J, Li N N. 2024. Fine-scale analysis of hourly precipitation of West China autumn precipitation [J]. Torrential Rain and Disasters,43(2):168−175 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−139

王号,隆霄,王雨恬,等.2025. GPM 降水资料在祁连山地区的适用性分析[J].沙漠与绿洲气象,19(3):104−112. Wang H, Long X, Wang Y T, et al. 2025. Analysis of the applicability of GPM precipitation data in Qilian Mountains [J]. Desert and Oasis Meteorology,19(3):104−112 doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2401.01001

王思梦,王大钊,黄昌,等.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):1847−1861. Wang S M, Wang D Z, Huang C, et al. 2018. Evaluating the applicability of GPM satellite precipitation data in Heihe River Basin [J]. Journal of natural resources,33(10):1847−1861 (in Chinese). doi:10.31497/zrzyxb.20171180

杨震宇,宁少尉,金菊良.2018.最新 GSMap-gauged 与 GPM-IMERG 卫星降水产品性能评估及其在长江流域中的应用[J].水电能源科学,36(11):5−8. Yang Z Y, Ning S W, Jin J L. 2018. Performance Evaluation of the latest GPM-era precipitation products and their application over the Yangtse River [J]. Water resources and power, 36(11):5−8 (in Chinese). doi:1000−7709(2018)11−0005−04

余菲,沈定涛,谭德宝,等.2024.多种卫星降水产品在长江流域的数据质量评价[J].人民长江,56(2): 65-74. Yu F, Shen D T, Tan D B, et al. 2024. Evaluation of data quality for six satellite precipitation products in the Changjiang River Basin [J]. Yangtze River,56(2):65-74 (in Chinese). doi:10.16232/j.cnki.1001−4179.2025.02.009

曾岁康,雍斌.2019.全球降雨计划 IMERG 和 GSMaP 反演降雨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 Geographica Sinica, 74(7):1305−1318 (in Chinese). doi:10.11821/dlxb201907003

张茹,雍斌,曾岁康.2021. GPM 卫星降水产品在中国大陆的精度评估[J].人民长江,52(5):10. Zhang R, Yong B, Zeng S K. 2021. Evaluation of GPM satellite precipitation products over Mainland China [J]. Yangtze River,52(5):10 (in Chinese). doi:10.16232/j.cnki.1001−4179.2021.05.009

Beria H, Nanda T, Bisht D S, et al. 2017. Does the GPM mission improve the systematic errorcomponent in satellite rainfall estimates over TRMM? An evaluation at a pan-India scale [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions,21(12):6117−6134. doi:10.5194/hess−21−6117−2017

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

Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al. 2014. The global precipitation measurement mission [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,95(5):701−722. doi:10.1175/BAMS−D−13−00164.1

Kidd C. 2001. Satellite rainfall climatology: A review [J]. International Journal of Climatology,21(9):1041−1066. doi:10.1002/joc.635

Lu D, Yong B. 2018. Evaluation and hydrological utility of the latest GPM IMERG V5 and GSMaP V7 precipitation products over the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing,10(12):2022. doi:10.3390/rs10122022

Ning S, Song F, Parmeshwar U, et al. 2017. Error Analysis and Evaluation of the latest GSMaP and IMERG precipitation products over eastern China [J]. Advances in Meteorology,2017:1−16. doi:10.1155/2017/1803492

Prakash S, Mitra A K, Pai D S, et al. 2016. From TRMM to GPM: How well can heavy rainfall be detected from space? [J]. Advances in Water Resources,88:1−7. doi:10.1016/j.advwatres.2015.11.008

Skofronick-Jackson G, Kirschbaum D, Petersen W, et al. 2018. The global precipitation measurement (GPM) mission's scientific achievements and societal contributions: Reviewing four years of advanced rain and snow observations [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,144(51):27−48. doi:10.1002/qj.3313

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

Testik F Y, Gebremichael M. 2010. Rainfall: State of the science [M]. the United States: American Geophysical Union: 127-158.

Tian Y, Peters-Lidard C D, Adler R F, et al. 2010. Evaluation of GSMaP precipitation estimates over the contiguous United States [J]. Journal of Hydrometeorology,11(2):566−574. doi:10.1175/2009JHM1190.1

Xu R, Tian F, 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]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,122(2):910−924 doi:10.1002/2016JD025418

Zhou Z T, Guo B, Xing W X, 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 唐国瑛)