

GPM 和 CMORPH 卫星产品在重庆暴雨过程中的应用评估

张新科, 何跃

(1. 重庆市荣昌区气象局, 重庆荣昌 402460; 2. 重庆市气象台, 重庆 重庆 401147)

摘要: 基于 2020 年 6 月重庆地区连续 3 次暴雨过程期间地面高时空分辨率加密雨量观测资料, 评估了 IMERG (GPM) 和 CMORPH 两种主流卫星降水产品对重庆暴雨强降水的估测精度。结果表明, IMERG 和 CMORPH 总体上能较好的捕捉到重庆地区暴雨强降水的时间和空间分布特征, 但两种卫星产品均表现为高估过程降水量, IMERG 的相对误差 RB 在 0.7%~41.6%, CMORPH 的 RB 在 23.7%~82.8%, CMORPH 较 IMERG 高估更为显著。同时, 两种卫星产品对雨强小于 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水估测精度具有显著的系统性误差, 表现为出低估雨强小于 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水, 高估雨强 $4.0\sim 19.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水, 且 IMERG 的估测精度要优于 CMORPH。对雨强超过 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的极端强降水, 两种卫星产品均表现出极大的不稳定性, 探测率 (POD) 和临界成功指数 (CSI) 均小于 0.1, 误报率 (FAR) 均大于 0.85, 估测能力有限, 需要进一步改进算法。

关键词: 暴雨; 卫星产品; GPM; CMORPH; 应用评估

暴雨灾害一直是最严重威胁人类生存和发展的自然灾害之一, 随着人类社会经济的不断发展, 在全球范围内暴雨极端降水事件发生的频率和强度均有不同程度的增加趋势^[1-2], 因此, 针对暴雨极端降水的监测及研究一直以来受到广泛关注^[3-5]。

暴雨过程中的强降水主要由中小尺度天气系统造成, 即使观测技术显著进步的今天, 要准确获取高时空分辨率的可靠降水信息, 仍然面临许多的困难和挑战。目前降水观测方式主要有两种: 一是地面雨量站直接测量, 由于受到复杂地形、站点布局等影响, 地面雨量站观测通常空间连续性差^[6-7], 导致对降水分布不均的对流性降水观测效果不佳。二是遥感方式测量, 包括天气雷达主动遥感和卫星被动遥感来获取降水信息。其中地面天气雷达通过发射脉冲的主动遥感方式建立回波强度与降水量之间的关系, 来间接反演降水, 但由于雷达自身的局限及地物

收稿日期: 2022-5-5; 定稿日期:

资助项目: 重庆市自然科学基金面上项目 (cstc2021jcyj-msxmX0057); 重庆市气象部门业务技术攻关项目 (YWJSGG-202117)

回波等影响^[8]，观测范围有限。同时地面雨量站和天气雷达等地基观测方式在极端恶劣天气期间也会受到显著影响^[9]。

相较于地面雨量站和天气雷达等地基观测，卫星能够提供全方位、高时空分辨率的连续降水观测资料，且不受恶劣天气等外部环境因素影响，在强降水监测中可以弥补地基观测的不足。近年来随着卫星探测技术的不断进步，各种卫星产品在灾害性天气的监测预报预警方面得到广泛的应用^[10-11]。同时，国内外专家学者对 GPM (IMERG)、CMOPRH、TMPA、TRRM 等多种主流卫星定量降水估测产品，在台风^[12-14]、暴雨^[15-17]及龙卷强降水^[18]等极端降水事件的监测精度评估发现，不同卫星产品对极端降水事件的监测能力有限，但各地区存在着明显的系统性误差。在多种卫星降水产品中，IMERG 和 CMORPH 是当前时间分辨率最高的卫星降水产品^[19-20]，可以提供时间分辨率为 30 min 降水数据，且具有较高的可信度，对生命史短的中小尺度系统引发的极端降水监测具有重要意义。

重庆是“一带一路”、长江经济带和成渝双城经济圈的交汇点和核心城市，地处四川盆地东部（28° N~32.5° N，105° E~110.5° E），是青藏高原到长江中下游地区的过渡地带，因其特殊的地理位置导致该区域暴雨极端降水灾害频发，给当地人民生命财产安全带来严重危害^[21]。然而，由于在重庆辖区内地形复杂多变，海拔落差极大（图 1），大面积山地区域地面雨量站相对稀疏，天气雷达观测范围有限，IMERG (GPM) 和 CMORPH 两种主流的高精度、高时空分辨率的卫星降水产品，为该区域暴雨极端降水观测提供了更为全面和方便的信息。因此本文基于 2020 年 6 月重庆地区 3 次暴雨过程期间高时空分辨率的地面雨量加密观测资料，评估了 IMERG (GPM) 和 CMORPH 在重庆暴雨强降水的估测精度，以期为深入认识卫星产品对极端降水的探测能力和系统性误差特征，改善卫星降水产品在该区域的应用质量和及监测能力。

1 研究数据及方法

1.1 研究数据

研究所用数据包括：（1）地面雨量站降水观测数据（Gauge），由国家信息中心 CIMISS 系统获取的重庆 34 个国家地面气象观测站及 1686 个地面加密站逐小时降水观测数据，该数据经过极值检查、内部一致性检查和时间一致性检查等方法进行质量控制，数据真实可靠。（2）IMERG (GPM) 是 GPM (Global Precipitation

Measurement)所设计的最新一代多卫星融合反演降水数据的三级产品^[20]，目前最新版本为 VB06，主要提供了时间分辨率分别为半小时、日及月平均降水的格点资料，是目前降水估测中最常用的产品^[22]。其根据滞后时间的长短，包括 Early Run, Late Run 和 Final Run 产品，分别滞后时间为 4h、14h 和 3.5 个月。研究极端降水应用中需要数据的及时性，文中采用准实时产品中经过气候参数校正降水产品 (IMERG_ERCa1)，时间分辨率 30 min，空间分辨率 0.1°。(3) CMORPH 卫星数据是由美国气候预测中心 (Climate Prediction Center, CPC) 提出的一种新技术，该技术主要思路是利用地球同步卫星的红外数据与极地卫星的微波数据联合估计降水 (Joyce et al., 2004)，覆盖范围为 60° S~60° N，文中采用的是时间分辨率 30 min，空间分辨率 8 km 的数据。

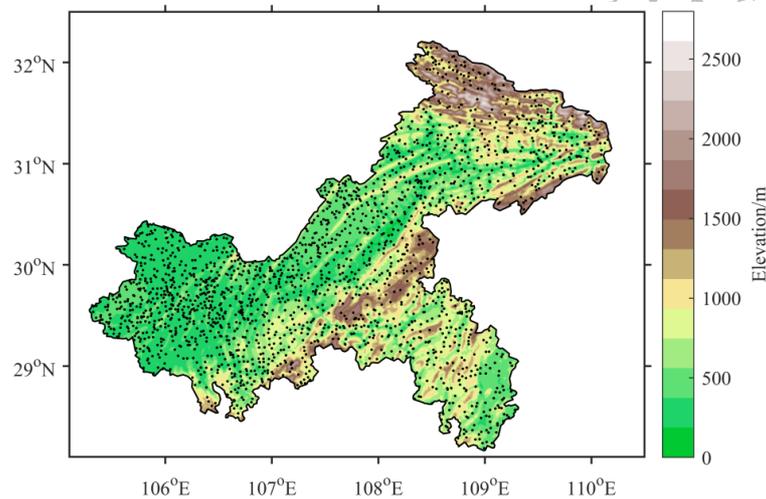


图1 重庆地区地形分布及地面雨量观测站

1.2 方法介绍

由于地面降水观测数据与卫星估测的格点数据时间和空间上不匹配，使用前需要对数据做预处理。鉴于重庆地形复杂多变，将地面降水站点数据插值为格点数据时，采用适用于复杂地形的克里金插值算法 (Kriging Interpolation)，它不仅能考虑各个已知数据点的空间相关性，给出待估测点的数值，还能将待估测点精度的方差计算出来^[23]。目前，克里金插值方法广泛运用在降水、土壤以及地面风场等领域^[24]。在处理卫星数据时，将原 30min 时间分辨率的 IMERG 和 CMORPH 处理成 1 h，原空间分辨率 8 km 的 CMORPH 用克里金插值成 0.1°。经过处理最终形成时间分辨率为 1h，空间分辨率为 0.1° × 0.1° 的地面观测 (Gauge)、CMORPH 和 IMERG 共 3 种雨量格点数据集，用于后续研究工作。

1.2.1 评估指标

选择相对偏差(RB)、相关系数(CC)和均方根误差 ($RMSE$)3种评估指标来衡量卫星降水量与地面观测降水量之间的差异。其中, RB 是描述卫星产品和地面观测之间的系统偏差的指标, 其值越接近 0 越精确, CC 是用来表示卫星产品与地面观测一致性程度, 其绝对值越大表示一致性越高, $RMSE$ 用于表示平均误差幅度, 其值越小越精确。

同时, 为了检测卫星产品描述不同量级降水事件的能力, 采用了探测率(POD)、误报率(FAR)以及临界成功指数(CSI)。其中, POD 表示卫星降水产品正确估测降水事件的概率, FAR 表示降水事件被错误估测的概率, CSI 综合考虑了 POD 和 FAR , 可以真实反映卫星产品的降水估测水平, 三者均介于 0~1 之间, POD 越大, FAR 越小, CSI 越大, 表明卫星对降水的估测效果越好, 以上各指标如表 1 所示。

表 1 用于量化卫星降雨产品性能的统计指标列表

评估指数	单位	计算公式	取值范围	最佳值
相对偏差 (Relative Bias)	%	$RB = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i} \times 100$	(- ∞, ∞)	0
相关系数 (Correlation Coefficient,)	/	$CC = \frac{[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}) \cdot (G_i - \bar{G})]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2}$	[0, 1]	1
均方根误差 (Root-Mean-Squared Error)	mm	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2}$	[0, ∞]	0
探测率 (Probability of Detection)	/	$POD = \frac{A}{A + C}$	[0, 1]	1
误报率 (False Alarm Ration)	/	$FAR = \frac{B}{A + B}$	[0, 1]	0
临界成功指数 (Critical Success Index)	/	$CSI = \frac{A}{A + B + C}$	[0, 1]	1

注: 式中 n 为卫星产品及地面观测数据的样本数, i 是第 i 个样本数据, G_i 和 \bar{G} 是地面观测值及其平均值, S_i 和 \bar{S} 卫星估计值及其平均值。 A 表示卫星探测到的降水事件数量 (即卫星探测到某量级降水并地面雨量站观测有), B 表示卫星漏报的降水事件数量 (即地面雨量站观测到有某量级降水但卫星估测无), C 表示卫星误报的降水事件数量 (即卫星探测到某量级降水而地面雨量站观测无)。

1.2.2 个例简介

暴雨是重庆地区夏季的最为主要灾害之一，在 2020 年 6 月 11—28 日短短 18 天时间内，重庆地区连续发生 3 次区域性暴雨极端降水过程，集中表现为降水强度大，影响范围广，加之 3 次过程间隔时间较短，降水持续叠加导致全市多地出现暴雨洪涝等灾害，造成了严重的经济损失和人员伤亡。研究时根据暴雨过程发生的主要时段，将 3 次过程分别命名为“6.12”、“6.17”和“6.27”暴雨天气过程。

其中，“6.12”暴雨过程强降水主要集中在重庆东北部和东南部地区，持续影响 48 h（6 月 11 日 14—13 日 14 时），全市有 4 个雨量站超过 200 mm，308 个雨量站超过 100 mm，861 个雨量站超过 50 mm。“6.17”暴雨过程强降水主要集中在长江沿线以南地区，持续影响 36 h（16 日 20—18 日 08 时），有 23 个雨量站超过 100 mm，340 个雨量站超过 50 mm。“6.27”暴雨过程强降水主要集中在长江沿线以南地区，过程持续影响 42 h（6 月 26 日 20—28 日 14 时），有 2 站超过 250 毫米，427 个雨量站超过 100 mm，895 个雨量站超过 50 mm。3 次暴雨过程的强降水落区分布重庆东北、东南及长江沿线以南及以北地区，囊括了重庆各个区域的暴雨特征，具有很好的代表性。

2 结果分析

2.1 过程降水时空分布

图 2 给出了 3 次暴雨过程影响期间 Gauge、IMERG 和 CMORPH 的累计雨量空间分布特征。可以看出，IMERG 和 CMORPH 两种卫星降水产品基本上捕捉了 3 次暴雨过程的降水落区空间分布，但对不同过程中心降水强度估测具有一定差异。在“6.12”暴雨过程中，IMERG 和 CMORPH 均完美的捕捉了东北和东南部 2 个强降水落区，IMERG 对降水中心强度估测更接近 Gauge，CMORPH 对东南部强降水中心强度有一定高估。在“6.17”暴雨过程中，IMERG 和 CMORPH 估测的强降水落区范围较 Gauge 偏大，降水中心偏东，对中心强度均有一定高估。“6.27”暴雨过程中，IMERG 和 CMORPH 均高估东部的强降水中心，低估西部的强降水中心。可见，两种卫星产品对重庆地区同暴雨过程降水的估测具有一定的误差，但总体上能够较好的反映暴雨过程降水量的空间分布特征。

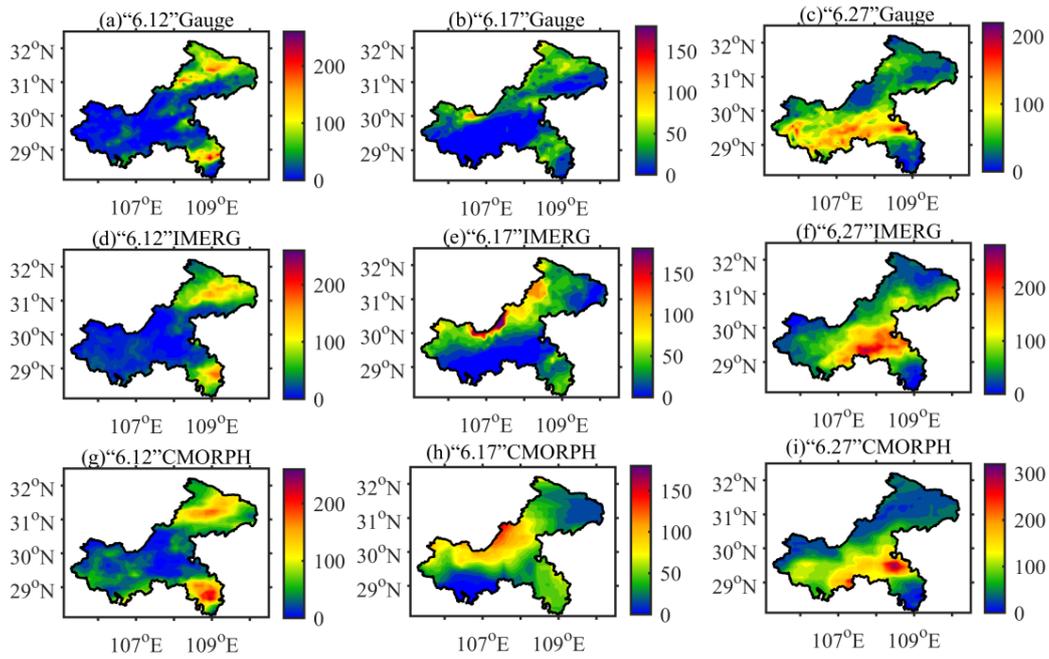


图 2 3 次暴雨过程中 Gauge、IMERG 和 CMORPH 的累计雨量分布(单位: mm)

为了量化两种卫星产品对暴雨过程降水量估测误差, 图 3 给出了 3 次暴雨过程期间格点上 CMORPH 和 IMERG 估测降水量与 Gauge 值散点分布。结果显示, 在 3 次暴雨过程中, 两种卫星产品较好的估测了过程降水量, 卫星产品与 Gauge 具有较强的空间相关性, 在“6.12”、“6.17”、“6.27”暴雨过程中, IMERG 与 Gauge 的 CC 分别为 0.74、0.54、0.63, CMORPH 与 Gauge 的 CC 分别为 0.74、0.34、0.75, 其中“6.17”过程相关系数较小的原因可能是两种卫星估测降水落区中心位置偏东有关。

同时, 两种卫星产品均表现为高估降水量特征, 在“6.12”、“6.17”、“6.27”暴雨过程中, IMERG 与 Gauge 的 RB 分别为 0.7%、41.6%、20.5%, $RMSE$ 分别为 29.59mm、30.97mm、44.03mm, CMORPH 与 Gauge 的 RB 分别为 45.5%、82.8%、23.7%, $RMSE$ 分别为 37.92mm、37.90mm、40.60mm。可见, CMORPH 相较于 IMERG 高估更为显著, IMERG 对 3 次暴雨过程估测能力更优。

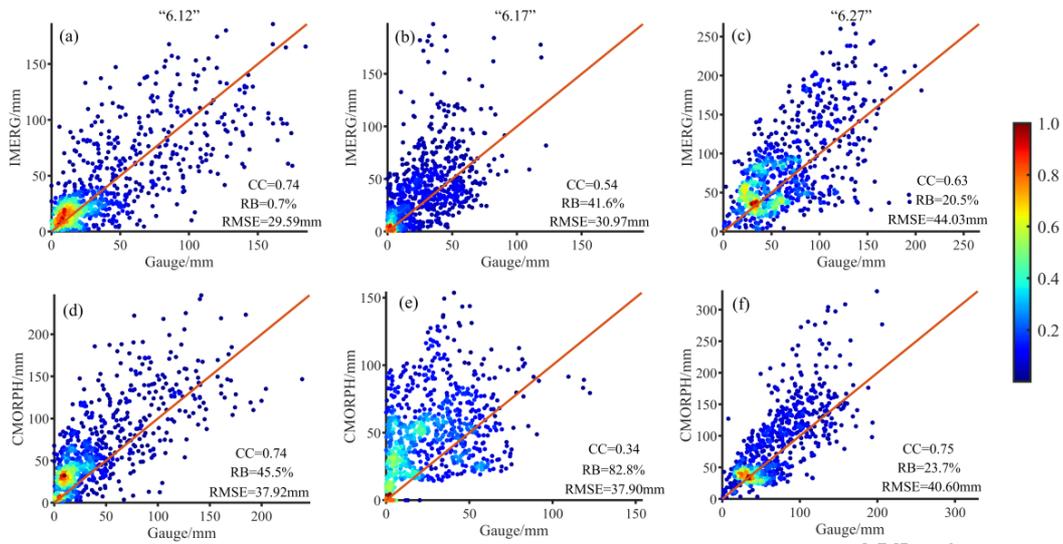


图 3 3 次暴雨过程中卫星产品与 Gauge 的降水量散点分布

面雨量是描述整个区域（流域）内单位面积上的平均降水量的物理量，能较客观地反映整个区域的降水情况，开展面雨量计算和面雨量预报能更好地为各级政府组织防汛抗洪以及水库等决策提供重要的依据[25]。

图 4 给出了 3 次暴雨过程中 Gauge、IMERG、CMORPH 逐小时面雨量和累积面雨量变化特征。结合表 2 可以看出，在 3 次暴雨过程中，两种卫星产品能够很好的捕捉过程期间面雨量的时间变化，与 Gauge 时间变化具有较高的相关性，在“6.12”、“6.17”、“6.27”暴雨过程中，IMERG 与 Gauge 的 CC 分别为 0.94、0.84、0.80，CMORPH 与 Gauge 的 CC 分别为 0.86、0.88、0.82。但是，两种卫星产品对面雨量峰值普遍存在高估。在“6.12”暴雨过程中，IMERG 的逐小时累积面雨量变化更接近 Gauge(图 3a)，CMORPH 对前两个峰值具有明显的高估，且累积面雨量曲线远高于 Gauge（图 3d）。在“6.17”和“6.27”暴雨过程，两种卫星产品均显著高估了第一个面雨量峰值（图 3b 和 3c），累积面雨量变化曲线均高于 Gauge（图 3e 和 3f）。值得注意的是，CMORPH 的面雨量峰值到达时间通常超前于地面雨量峰值时间，尤其是在“6.27”过程的第一个峰值，超前约 4h 之久，而 IMERG 与 Gauge 更为吻合。

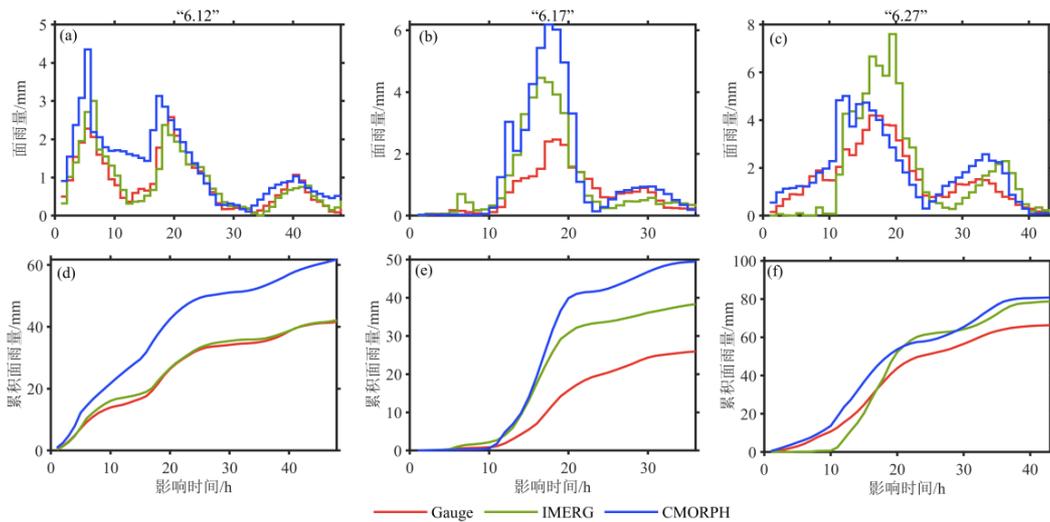


图 4 重庆地区“6.12”(a,d)、“6.17”(b,e)和“6.27”(c,f) 3 次区域暴雨过程 Gauge、IEMRG、CMORPH 逐小时和累积逐小时面雨量变化

综上所述，IMERG 和 CMORPH 两种卫星产品能够较好的捕捉到 3 次暴雨过程期间降水量时空分布特征，但卫星产品总体上对过程累积雨量以及面雨量时间峰值具有高估现象，但相对而言，IMERG 较 CMORPH 的估测效果更优。

2.2 分级检验

降雨强度是描述暴雨特征的重要指标，也是决定暴雨径流的重要因素。通过以上分析发现，IMERG 与 CMORPH 两种卫星产品对 3 次暴雨过程的降水量均具有一定的高估。为了详细分析两种卫星产品对不同雨强的估测能力，按照王曙东等^[26]提出的短时临近气象服务降水量等级标准，进一步将小时雨强 R 划分为以下 6 个等级，包括短时小雨 ($R < 2 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)、短时中雨 ($2 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1} \leq R < 3.9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)、短时大雨 ($4 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1} \leq R < 7.9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)、短时暴雨 ($8 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1} \leq R < 19.9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)、短时大暴雨 ($20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1} \leq R < 45 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$) 以及短时特大暴雨 ($45 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1} \leq R$)。

图 5 给出了 3 次暴雨过程期间两种卫星产品和 Gauge 在不同雨强间隔内的累计降水量及其相对误差 (RB)，间隔为 $0.1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。结果显示，当雨强小于 $2.0 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时，IMERG 和 CMORPH 两种卫星产品累计雨量均小于 Gauge，同时与 Gauge 的相对误差均为负值，但 IMERG 较 CMORPH 的相对偏差小，说明两种卫星产品低估了雨强小于 $2.0 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时小雨，IMERG 的 RB 在 $-50\% \sim 0\%$ 以内，CMORPH 的 RB 在 $-75\% \sim 0\%$ ，CMORPH 低估更显著。当雨强超过 $2.0 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，IMERG 与 CMORPH 累计雨量的变化趋势具有一定的差异特征，在 3 次暴雨过程中，CMORPH 值在 $2.0 \sim 20.0 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 区间内始终大于 Gauge，相对误差为正值，

其高估了这个区间的降雨。“6.12”和“6.17”过程中，IMERG 高估了雨强 2.0~20.0 mm.h⁻¹ 的降雨，“6.27”过程中，高估了雨强 4.0~20.0 mm.h⁻¹ 区间的降雨，对 2.0~4.0 mm.h⁻¹ 的短时中雨低估。对雨强超过 20.0 mm.h⁻¹ 短时暴雨，卫星产品估测具有极大的不稳定性，未表现出统一的高估或低估特征，且随系统的变化而变化。

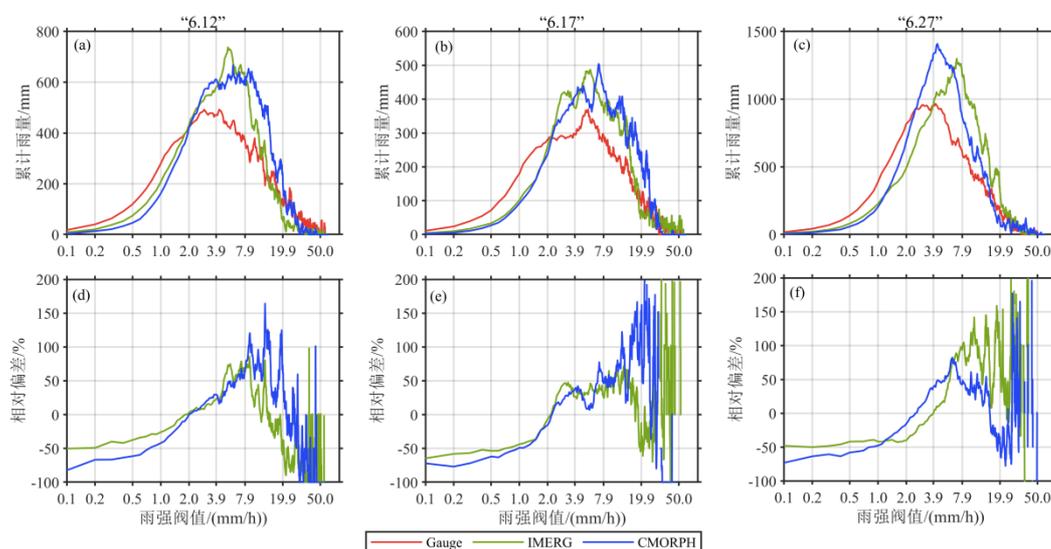


图 5 3 次暴雨过程不同降雨强度区间内 Gauge、IMERG、CMORPH 的累计雨量 (a-c) 及相对偏差 (d-f)

图 6 给出了 3 次暴雨过程中两种卫星产品对不同雨强等级的 *POD*、*FAR* 以及 *CSI*。结果显示，3 次暴雨过程中，IMERG 的 *POD* 在 0~0.53 之间，*CSI* 在 0~0.34 之间，*FAR* 在 0.55~1 之间，CMORPH 的 *POD* 在 0~0.42 之间，*CSI* 在 0~0.25 之间，*FAR* 在 0.49~1 之间。随着雨强的增大，两种卫星产品的 *POD* 和 *CSI* 呈下降趋势，*FAR* 呈逐渐增加趋势。在同一次过程中，雨强小于 20 mm.h⁻¹ 的短时暴雨以下量级，IMERG 估测效果要总体好于 CMORPH，其具有更大的 *POD* 和 *CSI*，*FAR* 更小，zhang et al^[27]评估了 GPM, TRMM, and CMORPH 在天山山区的估测精度发现，GPM (IMERG) 在探测降水事件方面表现更优，尤其是在轻度和中度强度的降水表现最好，这可能是由于新增了 Ka 波段和高频微波通道的缘故。同时，对雨强 20 mm.h⁻¹ 的短时大暴雨以上量级，两种卫星产品估测效果均较差，*POD* 和 *CSI* 均小于 0.1，*FAR* 大于 0.85，雨强 50 mm.h⁻¹ 的短时特大暴雨以上量级几乎探测不到，*FAR*=1，说明两种卫星产品的对雨强大于 20 mm.h⁻¹ 的短时大暴雨及以上量级的降水探测能力较差。

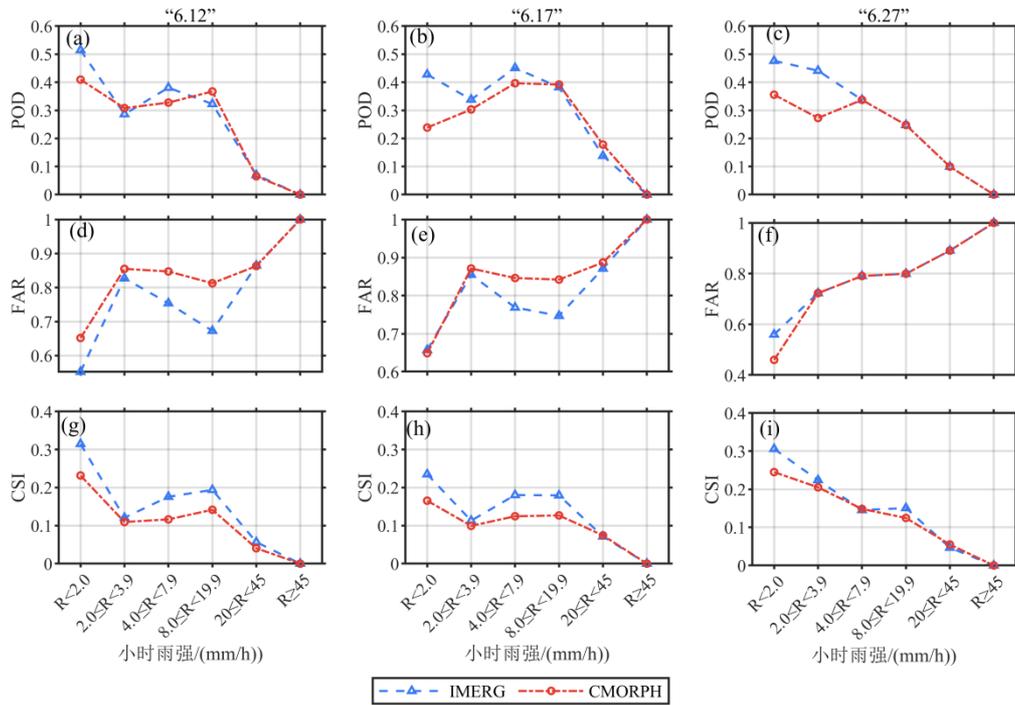


图 6 3 次暴雨过程 IMERG、CMORPH 基于不同降水量等级的 POD (a-c)、FAR (d-f) 以及 CSI (g-i)

3 结论与讨论

在 2020 年 6 月 11—28 日 18 天内,重庆地区连续出现 3 次暴雨强降水过程,引发严重的暴雨洪涝灾害。本文利用 3 次暴雨过程期间高时空分辨率的地面降水加密观测资料,对 GPM (IMERG) 和 CMORPH 两种卫星产品在重庆暴雨强降水的估测精度进行了评估,得到了以下主要结论:

1) 两种卫星降水产品较好的反映了 3 次暴雨过程的降水空间分布,与 Gauge 具有较高的空间相关性,在“6.12”、“6.17”、“6.27”过程中,IMERG 的 CC 分别为 0.74、0.54、0.63,CMORPH 的 CC 分别为 0.74、0.34、0.75。同时,两种卫星产品均高估了 3 次过程的总体降水强度,IMERG 的相对误差 RB 在 0.7%~41.6%, $RMSE$ 在 29.59~44.03 mm,CMORPH 的 RB 在 23.7%~82.8%, $RMSE$ 在 37.90~40.60 mm,IMERG 的估测效果更优。

2) 两种卫星降水产品较好的捕捉到了 3 次过程面雨量的时间演变特征,与 Gauge 时间变化具有极高的相关性,在“6.12”、“6.17”、“6.27”过程中,IMERG 的 CC 分别为 0.94、0.84、0.80,CMORPH 的 CC 分别为 0.86、0.88、0.82。但是,两种卫星产品对面雨量峰值普遍存在高估,CMORPH 高估更为显著。值得注意的是,CMORPH 的面雨量峰值到达时间通常超前于地面雨量峰值时间。

3) 两种卫星产品对过程期间雨强小于 $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水估测具有显著的系统性误差,均表现出低估雨强小于 $2.0 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时小雨,高估雨强 $4.0\sim 19.9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时大雨到暴雨,整体累积降水量的高估主要来自此部分降水高估的贡献。总体上,IMERG 的准确性要高于 CMORPH。对雨强超过 $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 量级的强降水,两种卫星产品均表现出极端的不稳定性,探测率(POD)和临界成功指数(CSI)均小于 0.1,误报率(FAR)均大于 0.85,估测能力有限。

以上研究表明,IMERG 和 CMORPH 两种卫星降水产品能够基本上反映出重庆地区暴雨强降水过程降水量的时空分布特征,对雨强小于 $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水估测具有明显的系统误差,在今后的研究工作中需要进一步误差订正,提高估测准确性。同时,对雨强超过 $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的极端强降水的估测具有极大不稳定性,这可能与卫星观测参数及自身算法等因素有关^[28-29]。同时,重庆地区复杂地形地貌也可能对卫星观测精度产生影响,赵伟平等^[30]对 IMERG 在云南复杂地形区域的评估检验发现,其估测精度随坡度和起伏度增大呈变差趋势, Kim et al^[31]评估了 CMORPH 降水产品在韩国地区的适用性发现,沿海地区和海岛的质量不如内陆低海拔地区,可见地形及海拔差异对卫星降水估测能力具有显著影响。因此在今后的工作中,需要进一步深入研究重庆地区复杂地形对卫星降水估测能力的影响,以提高卫星资料在重庆地区的适用水平。

参考文献:

- [1] Allan R P, Soden B J, 2008. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes[J]. *Science*, 321(5895): 1481-1484.
- [2] 李铭宇, 韩婷婷, 郝鑫, 2020. 欧亚大陆极端降水事件的区域变化特征[J]. *大气科学学报*, 43(04): 687-698.
- [3] Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, et al, 2016. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions[J]. *Nature Climate Change*, 6(5): 508-513.
- [4] 马洁华, 孙建奇, 汪君, 等, 2019. 2018 年夏季我国极端降水及滑坡泥石流灾害预测[J]. *大气科学学报*, 42(01): 93-99.
- [5] Tabari H, 2020. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability[J]. *Scientific reports*, 10(1): 1-10.
- [6] Guo H, Chen S, Bao A, et al., 2016a. Comprehensive evaluation of high-resolution satellite-based precipitation products over China[J]. *Atmosphere*, 7(1): 6.
- [7] 王磊, 陈仁升, 宋耀选, 2017. 高寒山区面降水量获取方法及影响因素研究进展[J]. *高原气象*, 36(06): 1546-1556.
- [8] Krajewski W F, Ntelekos A A, Goska R, 2006. A GIS-based methodology for the assessment of weather radar beam blockage in mountainous regions: Two examples from the US NEXRAD network[J]. *Computers & geosciences*, 32(3): 283-302.
- [9] Guo H, Chen S, Bao A, et al, 2016b. Early assessment of integrated multi-satellite

-
- retrievals for global precipitation measurement over China[J]. *Atmospheric Research*, 176: 121-133.
- [10] Lu X, Tang G, Wei M, et al, 2018. Evaluation of multi-satellite precipitation products in Xinjiang, China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 39(21): 7437-7462.
- [11] 徐小红, 余兴, 刘贵华, 等, 2022. 冰雹云卫星早期识别与自动预警[J]. *大气科学*, v. 46(01): 98-110.
- [12] Chen S, Hong Y, Cao Q, et al, 2013. Performance evaluation of radar and satellite rainfalls for Typhoon Morakot over Taiwan: Are remote-sensing products ready for gauge denial scenario of extreme events[J]. *Journal of hydrology*, 506: 4-13.
- [13] 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.
- [14] 唐飞, 陈凤娇, 诸葛小勇, 等, 2021. 利用卫星遥感资料分析台风“烟花”(202106)的影响过程[J]. *大气科学学报*. 44. 5: 703. 716.
- [15] Jiang Q, Li W, Wen J, et al, 2018. Accuracy evaluation of two high-resolution satellite-based rainfall products: TRMM 3B42V7 and CMORPH in Shanghai[J]. *Water*, 10(1): 40.
- [16] Zhang A, Xiao L, Min C, et al, 2019. Evaluation of latest GPM-Era high-resolution satellite precipitation products during the May 2017 Guangdong extreme rainfall event[J]. *Atmospheric Research*, 216: 76-85.
- [17] 魏栋, 刘丽伟, 田文寿, 等, 2021. 基于卫星资料的西北地区高原涡强降水分析[J]. *高原气象*, 2021, v. 40(04): 829-839.
- [18] 黄朝盈, 张阿思, 陈生, 等, 2020. GPM 卫星和地面雷达对江苏盐城龙卷风强降水估测的对比[J]. *大气科学学报*. 43. 2: 370-380.
- [19] 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.
- [20] Huffman G J, Bolvin D T, Braithwaite D, et al, 2015. NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) [J]. *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version*, 4: 26.
- [21] 黄会杰, 2018. 重庆市区域性暴雨危险度与灾情综合评估研究[D]. 西南大学. Huang H J, 2018.
- [22] 方勉, 何君涛, 符永铭, 等, 2019. 基于 GPM 卫星降水产品对 1808 号超强台风“玛利亚”降水结构的分析[J]. *大气科学学报*, 42(06): 845-854.
- [23] 何红艳, 郭志华, 肖文发, 2005. 降水空间插值技术的研究进展[J]. *生态学杂志*, 24(10): 1187 - 1191.
- [24] 李海涛, 邵泽东, 2019. 空间插值分析算法综述[J]. *计算机系统应用*, 28(7): 1 - 8.
- [25] 高琦, 徐明, 李武阶, 等, 2014. 我国面雨量研究及业务应用进展[J]. *气象科技*, 4(02): 66-69.
- [26] 王曙东, 惠建忠, 张国平, 等, 2017. 短时临近气象服务降水量等级标准研究[C]//第 34 届中国气象学会年会 S11 创新驱动智慧气象服务——第七届气象服务发展论坛论文集. :368-369.

-
- [27] Zhang C, Chen X, Shao H, et al. Evaluation and intercomparison of high-resolution satellite precipitation estimates—GPM, TRMM, and CMORPH in the Tian shan Mountain Area[J]. Remote Sensing, 2018, 10(10): 1543.
- [28] 许时光, 牛铮, 沈艳, 等, 2014. CMORPH 卫星降水数据在中国区域的误差特征研究[J]. 遥感技术与应用, 29(2): 189-194.
- [29] Oliveira R, Maggioni V, Vila D, et al. Using satellite error modeling to improve GPM-Level 3 rainfall estimates over the central Amazon region[J]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 336.
- [30] 赵平伟, 李斌, 王佳妮, 等, 2021. GPM IMERG 和 ERA5 降水数据精度在云南复杂地形区域的评估检验[J]. 气象科技, v. 49;No. 284(01):114-123.
- [31] Kim J, Han H. Evaluation of the CMORPH high-resolution precipitation product for hydrological applications over South Korea[J]. Atmospheric Research, 2021, 258: 105650.

2022 年气候预测与气候应用技术