

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 Zhiying, ZHENG Yan, DUAN Jingjing, 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

台风“烟花”影响浙江期间GPM卫星降水产品的评估及订正

蔡志颖¹,郑艳²,段晶晶^{1,3},朱皓清⁴,吴俊杰¹

(1.宁波市气象台,宁波 315000;2.宁波市镇海区气象局,宁波 315200;3.中国气象局上海台风研究所,上海 200030;
4.江苏省启东市气象局,启东 226200)

摘要:为了解和提高GPM (Global Precipitation Measurement)卫星降水产品在台风降水过程中的表现和质量,基于地面气象观测站雨量资料,分别采用逐步订正法和最优插值法订正卫星反演降水产品,并从不同时间尺度评估2021年台风“烟花”登陆浙江期间GPM(第六版)反演产品在订正前后的监测能力。结果表明:未订正的GPM反演降水产品未能描述浙江省内高大地形处的强降水中心,对过程降水量低估约45%,主要源于对浙江东北部降水大值区的低估,降水分级检验显示,未订正的GPM产品除对小雨有较好反映能力外,其余各级别探测能力均较差;经逐步订正法和最优插值法分别订正后,反演产品的过程累计、逐日及逐时降水的评估结果均有提升,且逐步订正法订正后效果更优,最优插值法订正后对实际降水略有高估,两种方法订正后的产物不仅可描述与高大地形相关的强降水中心,也可反映大暴雨和小时雨强大于 $23 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水。

关键词:台风“烟花”;GPM卫星降水;逐步订正;最优插值订正;雨量评估

中图法分类号:412.27 文献标志码:A DOI:10.12406/byzh.2023–054

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

CAI Zhiying¹, ZHENG Yan², DUAN Jingjing^{1,3}, ZHU Haoqing⁴, WU Junjie¹

(1. Ningbo Meteorological Observatory, Ningbo 315000; 2. Ningbo Zhenhai Meteorological Bureau, Ningbo 315200;
3. Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030;
4. Jiangsu Qidong Meteorological Bureau, Qidong 226200)

Abstract: To understand and improve the performance and quality of Global Precipitation Measurement (GPM) satellite-derived precipitation products during the typhoon process, with gauge observations from ground meteorological stations, this study used the successive and optimal interpolation correction methods to correct the GPM precipitation products. The performance of GPM products (Version 6) before and after the correction at different time scales are evaluated with the products during the two landfalls of Typhon "In-Fa". Results show that the original GPM precipitation products fail to describe the strong rainfall center over the high terrain area, which significantly underestimates the precipitation by approximately 45%. This is mainly due to the underestimation of the large values in the northeast region of Zhejiang province. The analysis of precipitation classification inspection suggests that the uncorrected GPM satellite-derived products have good capability for light rain, but poor for other rainfall levels. After the successive and optimal interpolation correction, significant improvement can be found in the cumulative, daily, and hourly rainfall products. The products with successive correction are better, while the product with optimal interpolation slightly overestimates the actual precipitation. The corrected GPM products can not only describe the heavy precipitation center related to the terrain but also reflect heavy rainstorms and heavy precipitation with hourly rainfall intensity greater than $23 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$.

Key words: Typhoon "In-Fa"; GPM satellite-derived precipitation products; successive correction; optimal interpolation correction; rainfall evaluation

收稿日期:2023-03-21;定稿日期:2023-07-03

资助项目:宁波市自然科学基金项目(2018A610210);宁波市气象局青年基金项目(NBQX2022002C)

第一作者:蔡志颖,主要从事天气预报服务研究。E-mail: nbqx_czy@163.com

通信作者:段晶晶,主要从事台风动力学及数值模拟研究。E-mail: duanduan1110@163.com

引言

降水是天气预报、气候变化和全球水文研究关注的热点。传统降水观测来源于地面气象观测站,观测结果虽然准确,但其空间分布不连续。为弥补这一不足,诸多研究者将目光转向天气雷达和卫星等遥感探测技术(Guo et al., 2015)。地基天气雷达利用回波强度可定量估测降水,但受电子信号及运行环境等误差来源的影响,如地形遮挡、雷达射线抬升和Z-R关系的不确定性等,所估测的降水精度较低且估测区域有限。与前两种地基观测相比,卫星观测具备覆盖范围广、观测连续等优势。利用卫星所搭载的各种探测器(如星载雷达、主被动微波成像仪、可见/红外辐射仪等)对降水进行监测、反演和融合,可得到多种类型的卫星降水反演产品。近年来,卫星观测数据的时空分辨率大幅提高,卫星定量估测降水算法发展较快(Sorooshian et al., 2000; Hong et al., 2004; Joyce et al., 2004)。其中,热带降水观测卫星TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)作为第一颗专用于定量测量热带和亚热带降水的空间卫星,其资料在气候和水文研究领域得到广泛应用(Huffman et al., 2007; Yong et al., 2010; Xue et al., 2013)。美国航空航天局NASA (National Aeronautics and Space Administration)于2014年启动全球降水观测GPM (Global Precipitation Measurement)计划。GPM继承了TRMM的优势并采用新一代卫星降水融合算法IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM),有效提高了对弱降水、固态降水和降水粒子性质的捕捉能力,产品范围扩大至高纬地区(唐国强等,2015)。但卫星大多通过探测云层温度或云中粒子信息来间接推算降水量,其并不等同于直接观测到的降水量,作为一种间接降水测量手段,产品使用前的评估工作十分必要。对GPM卫星降水产品的评估研究表明,虽然卫星降水产品在年际尺度上的估测能力有显著提高,但在极端降水事件中的估测能力有限(金晓龙等,2016; Chen and Li, 2016; Li et al., 2017; Zhang et al., 2019; 韩芙蓉等,2023)。

台风是产生暴雨的重要天气系统,但受环境因素及台风本身特性影响,台风降水时空分布十分复杂,这给卫星估测台风降水带来较大挑战(Wang et al., 2017; 李晓渝等,2020)。Omranian等(2018)评估了台风“哈维”影响期间GPM估测的降水空间分布,并认为其能够较好地反映暴雨空间分布特征。肖柳斯等(2019)利用三个登陆广东的台风降水过程,对GPM卫星降水产品进行了误差评估,发现卫星降水产品对台风过程降水总体强度存在低估,对强(弱)降水强度存在高(低)

估。陈爱军等(2021)精细化评估了GPM卫星降水产品对台风“妮坦”降水的估测精度,指出GPM虽能较好地估测降水空间分布,但对暴雨严重低估。可见,GPM对极端降水的估测能力仍有较大不确定性,尤其是对台风降水的估测能力有待进一步研究。当卫星估测降水与实际降水有较大偏差时,需引入地面气象观测站资料进行客观订正,以提高卫星降水产品的可应用性。目前国内外直接针对卫星降水产品的订正工作较少(刘少军等,2021),但针对地面雷达联合雨量站的校正工作开展已较为成熟,其常用方法包括平均校正、距离加权、逐步订正和最优插值法等,这对卫星降水数据的订正是重要的借鉴(Cheema and Bastiaanssen, 2012; 孙乐强等,2014; Huffman et al., 2020)。

2021第6号台风“烟花”于7月17日16时(世界时,下同)在西北太平洋洋面上生成,23日夜间进入东海,先后在浙江省舟山市、嘉兴平湖市两次登陆。受“烟花”影响,22—28日浙江省出现持续强降水和大风天气。“烟花”影响时间和过程雨量为1951年以来登陆浙江省的台风之首。本文基于台风“烟花”影响期间的地面气象观测站雨量数据,对GPM卫星降水产品进行评估和订正,既有助于了解“烟花”影响期间GPM卫星反演产品在不同时间尺度上的降水估测能力,又对改进IMERG算法、提高台风降水的估计能力和精度、推进数值模式资料同化及水文研究应用具有重要的科学意义,也为寻求可靠的台风降水估测产品提供有益探索。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

1.1.1 卫星降水数据

由IMERG算法得到的GPM卫星降水估测产品包含ER (Early Run)、LR (Late Run)和FR (Final Run)。ER仅采用前向推演技术,主要用于灾害分析和短临预报业务,LR产品制作过程中增加了后向推演,数据更为丰富,可应用于逐日或更长时间尺度上的分析,两种产品分别延时约4 h和14 h发布。与ER和LR相比,FR虽延时约3个月发布,但利用全球逐月观测降水加以校正,结果在三者中最为准确,是科学的研究的首选产品(Huffman et al., 2020)。本研究所用的GPM卫星降水数据为NASA提供的第六版本FR产品,时空分辨率为30 min、 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,并覆盖全球范围($90^\circ\text{S}—90^\circ\text{N}$)。

1.1.2 地面气象观测站雨量数据

本文使用浙江省内3 742个地面气象观测站(含102个国家站和3 640个区域站)的小时雨量数据,站

点位置和高度分布如图1所示。浙江地形南部多山地,北部以低平的冲积平原为主。小时雨量资料时间范围为2021年7月22日00时—28日00时,即台风“烟花”对浙江省的影响时段。

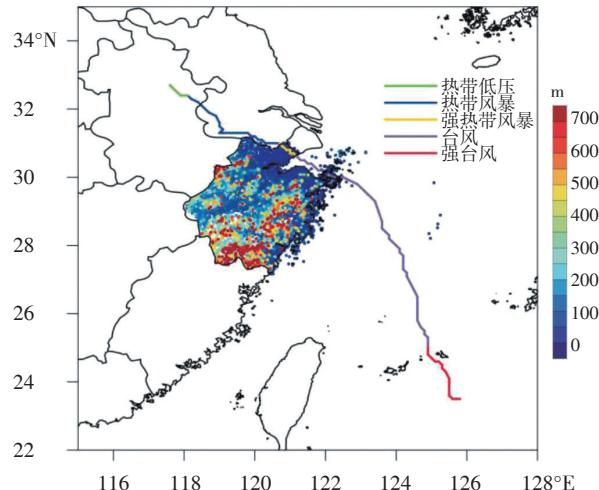


图1 浙江省内地面气象观测站位置(圆点)和高度(色斑)的空间分布及2021年7月22日00时—28日00时台风“烟花”移动路径(曲线,不同颜色表示台风强度等级)

Fig.1 spatial Distribution of meteorological stations position(dot) and altitude (patch) in Zhejiang, along with the best tracks (curve) of Typhoon “In-Fa” from 00 UTC on July 22nd to 00 UTC on July 28th, 2021. Typhoon intensity levels are marked by different colors

1.1.3 资料预处理

由于GPM卫星降水产品为格点数据且分辨率为30 min,而地面气象观测为逐小时站点数据,两者类型、时间和空间尺度均不相同,因此需分别对这两类数据进行预处理。对GPM卫星降水资料而言,将每半

小时一次的产品均值化为逐小时数据。为统一空间尺度,地面气象观测站雨量数据采用Cressman方法插值为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的格点数据(Cressman, 1959),迭代分析半径取为 0.25° 、 0.1° 和 0.05° 。插值方法本身会产生一定的数据误差,但本文暂不考虑。将00时一次日00时定义为一天,该时段内卫星估测和地面观测的小时降水量分别累加可得逐日降水量;7月22日00时—28日00时时段内的小时降水量累加可得过程累计降水量。

1.2 研究方法

1.2.1 评估方法

以插值后的地面格点观测为参考,采用以下指标对GPM卫星降水产品精度进行评估(Chen et al., 2013; 曾岁康和雍斌, 2019)。包括相对偏差RB (Relative Bias)、相关系数CC (Correlation Coefficient)、均方根误差RMSE (Root-Mean-Squared Error) 和 分数标准误差FSE (Fractional Standard Error)。当降水估测具有较低的RB、RMSE、FSE 和 较高的CC 值时,表明卫星反演效果较好。

不同降水阈值下,卫星降水产品表现有所差异,为此引入分类评价指标,如探测率POD (Probability of Detection)、误报率FAR (False Alarm Ratio)和临界成功指数CSI (Critical Success Index)来评估其在小雨($0.1\sim 9.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)、中雨($10\sim 24.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)、大雨($25\sim 49.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)、暴雨($50\sim 99.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 和 大暴雨($\geq 100 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)五个量级下的降水估测能力。以上所有评估指标计算公式及意义见表1。

表1 卫星降水产品评估指标说明

Table 1 Evaluation indicators for the satellite-derived precipitation products

评估指标	计算公式	最优值	指标意义
相对偏差(RB)	$\frac{\sum_{i=1}^n (S - G)}{\sum_{i=1}^n G}$	0	表征卫星估测与地面气象观测站数据的总体偏差
相关系数(CC)	$\frac{C_{ov}(S, G)}{\sigma_S \sigma_G}$	1	表征卫星估测对地面气象观测站数据的空间分布描述能力
均方根误差(RMSE)	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S - G)^2}$	0	表征卫星估测的整体精度和误差水平
分数标准误差(FSE)	$\sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S - G)^2}{A_{vg}(G)}}$	0	表征卫星估测和地面气象观测站数据的均值差距
探测率(POD)	$A/(A + C)$	1	表征卫星估测正确捕捉降水事件的能力
误报率(FAR)	$B/(A + B)$	0	表征卫星估测对降水事件的错误估计程度
临界成功指数(CSI)	$A/(A + B + C)$	1	综合考虑POD、FAR,表征卫星估测真正估测降水事件的能力

注:式中 S 为卫星估测降水, G 为地面雨量站插值到格点的降水数值, n 为格点总数; C_{ov} 为协方差, σ 为标准差, A_{vg} 为平均值。 A 表示卫星正确探测到的降水事件数量, B 表示卫星误报的降水事件数量, C 表示卫星漏报的降水事件数量。 A 、 B 、 C 随降水阈值有所改变,阈值在计算时需给定特定值

1.2.2 订正方法

卫星降水产品订正主要通过卫星与地面气象观测站数据的融合,但考虑实际业务操作难度和使用频次,本文仅尝试逐步订正和最优插值这两种订正方法。

逐步订正法是通过给定一初始场,利用实际观测值加以订正,将订正后的结果称为分析场。这样的订正过程可反复进行,直到分析场逼近观测记录为止。实践和理论表明,多次订正后的分析场会更趋于实际观测值(尹忠海等,2014)。对于给定一初始场 X_0 ,分析第 k 个站点实际值 O_k 与初始场内站点所在网格点 x_{0k} 之差,利用一定的插值方法生成校准因子场,则可得到分析场 X_1

$$x_{1i} = x_{0i} + \frac{\sum W_{ik}(O_k - x_{0k})}{\sum W_{ik}} \quad (1)$$

式中 W 为权重系数, O 为地面气象观测场, i 为网格点序号数, k 为地面气象观测站序号数。 W 的选取采用经典Cressman方案,具体表达式如下

$$W_{ik} = \begin{cases} \frac{R^2 - r_k^2}{R^2 + r_k^2}, & r_k < R \\ 0, & r_k \geq R \end{cases} \quad (2)$$

其中 r_k 为站点到网格点的距离, R 为搜索半径(单位为 $^\circ$)。将得到的分析场 X_1 作为新的初始场,并减小搜索半径 R 重复上述步骤,得第二次分析场 X_2

$$x_{2i} = x_{1i} + \frac{\sum W_{ik}(O_k - x_{1k})}{\sum W_{ik}} \quad (3)$$

如此不断迭代订正。该订正方法计算量少,且不依赖于任何假定。迭代次数太多,虽然误差较小,但机时耗费多,也会削弱气象场强度;迭代次数太少,分析场的误差又太大。迭代次数通常取三或四次。

站点在卫星降水场中的取值 x_{0k} 使用了双线性插值方法,原理如图2。 Q_{11} 、 Q_{12} 、 Q_{21} 、 Q_{22} 分别为站点周围四个网格点的卫星降水。先在 x 方向上插值,再在 y 方向上插值,最终可得站点 P 处的卫星降水:

$$f(x, y_1) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} Q_{11} + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} Q_{21} \quad (4)$$

$$f(x, y_2) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} Q_{12} + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} Q_{22} \quad (5)$$

$$f(x, y) = \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} f(x, y_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} f(x, y_2) \quad (6)$$

最优插值法是国内外常用的雷达雨量计联合校准方法之一,也是客观分析方法的一种(孙乐强等,2014;韩焱红等,2019)。其原理是利用空间内每个格点的初估值加上订正值,从而得到订正场。在该校正方法中,订正值是由格点周围若干个地面气象站观测值与

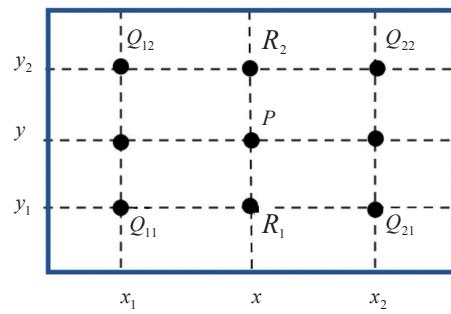


图2 双线性插值示意图

Fig.2 Schematic diagram of the bilinear interpolation

初估值的偏差加权估计得到,公式表达如下:

$$x_{1i} = x_{0i} + \sum_{k=1}^n W_k (O_k - x_{0i}) \quad (7)$$

式中 X_0 为初始降水场, O 为未插值的降水观测场, X_1 为第一次的订正场, W 是权重因子, n 是每个网格点影响半径 R 内的地面气象观测站个数, i 为网格点序号数, k 为地面气象观测站序号数。公式的数学意义为第 k 个站点对第 i 个格点处的校正因子值可以通过影响半径内其他站点校正因子之间的线性组合加预测值而得到,相应的系数就是该站点校正因子对该网格值的贡献权重。权重函数 W 是通过求解矩阵方程组以使得订正场方差达最小值的方程解。实际使用中,最优插值法需假设相关函数 μ 是已知的且各向均匀同性,最优的权重因子 W 利用下式求得

$$\mu_{ik} = \frac{1}{2} \times \sum_{k=1}^n W_k \times \mu_{jk} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

其中 μ_{ij} 表示 i 和 j 两点的相关函数,相关函数通常取以下两种形式

$$\mu_{ij} = \exp\left(\frac{-r_{ij}}{R}\right) \quad (9)$$

$$\mu_{ij} = \exp\left(\frac{-r_{ij}^2}{R}\right) \quad (10)$$

r 是两点间的距离。研究表明(邓雪娇等,1998;韩焱红等,2019),当地面气象观测站在订正格点的搜索半径内分布稀疏时,公式(9)适用;反之,公式(10)更适用。通过(8)式求解以 W 为因变量的 n 维线性方程组可得相应的权重因子 W 。计算中最优插值法要求每个网格点附近至少有2个地面气象观测站,因此本文用2个测站来定义稀疏与密集。

孙乐强等(2014)在针对TRMM卫星降水的订正工作中指出,多次迭代订正可有效提高订正效果并以三次为最佳。在他们的研究中,搜索半径 R 是一个不敏感的参数(可从2.5取至15个经纬度),但当研究区域较小时,如果 R 过大,则(8)式构造的 n 维线性方程组系数将为奇异矩阵,导致方程求解时出现异常解,最终影响订正和评估效果。为全文统一和求解稳健,逐步订

正和最优插值法中的搜索半径 R 与 Cressman 迭代分析半径取为同值并迭代订正三次(0.25° 、 0.1° 和 0.05°)。

2 GPM 反演降水产品评估分析

图3给出台风“烟花”影响浙江期间,地面气象观测站累计降水量和GPM卫星反演降水产品的空间分布。可以看到,台风“烟花”降水在浙江省内呈东北多、西南少的分布特征(图3a),浙东北沿海和浙西北山区为雨量大值区,降水中心与地形高度密切相关,四个大值中心从东到西分别对应四明山、会稽山、

龙门山和天目山(海拔分别为1 018 m、612 m、361 m、1 505 m),累计降水量均在500 mm以上。累积过程雨量最大单点为余姚丁家畈站(四明山附近)1 084 mm,破登陆浙江台风的全省实测降水过程雨量极值。虽然GPM反演的降水分布也呈东北多、西南少特征(图3b),但降水主要位于舟山和宁波沿海,不存在观测中与地形相关的四个强降水中心,且最大累计雨量仅200~300 mm。显然,GPM卫星降水产品未能反演出“烟花”影响期间在浙江出现的极端降水且严重低估累计降水量。

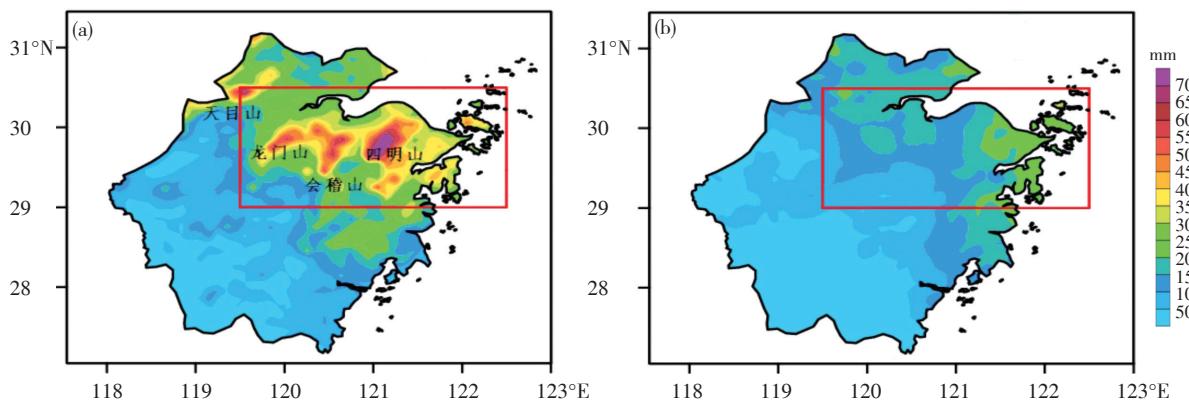


图3 2021年7月22日00时—28日00时浙江省6 d累积降水量地面气象观测(a)和GPM卫星反演(b)的空间分布
(红色框为浙江东北部降水大值区)

Fig.3 Spatial distributions of (a) observational and (b) GPM accumulated precipitation in Zhejiang province during Typhoon “In-Fa” from 00 UTC on July 22nd to 00 UTC on July 28th, 2021. Red frames indicate the heavy rainfall area in the northeast region of Zhejiang

定量检验台风“烟花”影响下GPM过程累计降水量表现,选取浙江省内共981个网格点,计算得到的CC达0.7(图4a),这表明GPM产品能较好抓住“烟花”降水总体分布特征,与前面分析结论一致。RB为-45%,观测与GPM卫星降水的线性回归系数仅0.34,反映出GPM卫星降水产品低估实际降水量。从观测和卫星降水的散点分布看(图4a),散点主要分布在

对角线左下侧,随着累计观测雨量的增大,GPM反演降水偏离对角线越远,对200 mm以上降水明显反映不足。RMSE数值较大,为129.45 mm,主要是由于GPM产品在个别点上严重估计不足。台风“烟花”影响下,浙江省平均雨量179.7 mm,当用FSE指标进行衡量时,可有效减小单点观测出现的极端降水影响,为9.66,表明GPM产品对浙江省平均雨量有一定的描述能力。

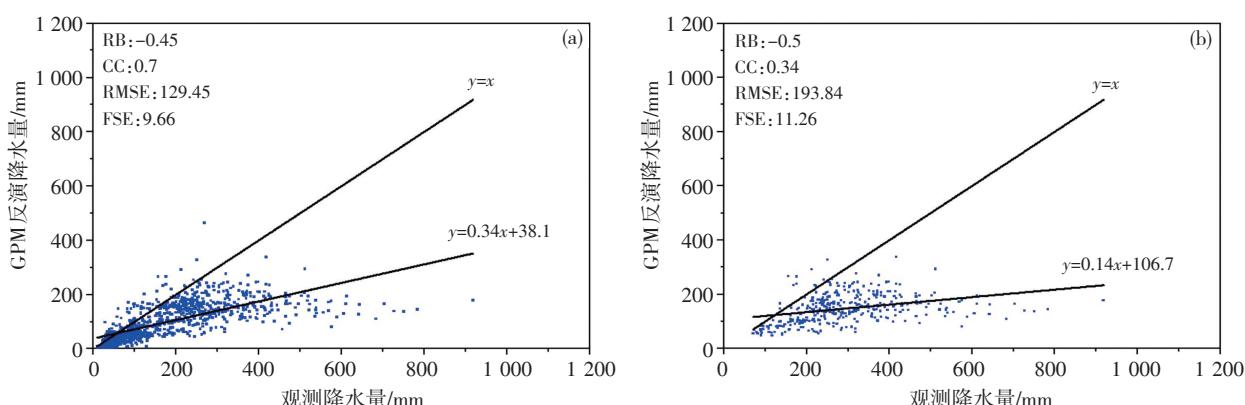


图4 2021年7月22日00时—28日00时浙江省(a)和降水大值区(b)观测及GPM累计降水量
散点分布(实线为线性回归直线)

Fig.4 Scatter plots of observational and GPM accumulated precipitation in (a) Zhejiang and (b) high rainfall area from 00 UTC on July 22nd to 00 UTC on July 28th, 2021. The solid lines are the linear regression lines

由于“烟花”二次登陆前长时间在杭州湾稳定少动,其造成的降水主要在浙江东北部。因此,对降水大值区(图3红色矩形框范围)内的GPM产品也进行了定量评估,区域内格点样本量为348个。可以看到RB、CC和回归系数均有下降(图4b),分别为-0.5、0.34和0.14;RMSE和FSE明显增加,为193.84和11.26,说明GPM产品对降水大值区内累计降水的空间分布、极端和平均降水描述能力均较差,进而导致其对全省降水的低估,这与GPM降水反演产品显著低估极端降水的特征相似(李伶杰等,2018)。

GPM的FR产品是多源资料(逐时红外降水、大约一天两次的主被动微波降水、以及逐月观测降水等)融合结果。在GPM卫星过境时,相对可靠的主被动微波观测可提高FR产品精度;但在其它时刻,FR产品完全依赖红外观测,此时降水描述精度非常低。由于红外波穿透能力不如微波,红外遥感信息主要与云顶特征有关,与云下降水强度关系不密切,单纯依赖红外的降水算法在雨区和雨量估计方面表现较差。IMERG融合算法生成的FR产品中,也给出了不同来源的反演降水

量,可分为红外和微波反演降水(Huffman et al., 2020)。对比红外、微波反演降水场发现(图略),浙江省内过程累计降水主要由红外反演降水贡献,100 mm以上降水区出现在浙江宁波沿海和舟山一带,但对内陆高海拔地形处的强降水未有反映。从融合微波辐射计贡献的反演降水结果看(图略),微波反演降水几乎没有贡献,全省均不足50 mm,只在浙江西北部的湖州、杭州略有反映。因此,由于FR产品本身缺陷:(1)红外降水精度偏低;(2)主被动微波降水的时间分辨率不足,“烟花”影响期间,GPM卫星反演的降水产品对浙江省以及降水大值区内的降水描述效果均不佳,为此有必要对该产品进行相应的订正工作。

3 GPM反演降水产品订正分析

3.1 过程总降水的订正分析

本节对订正后的GPM卫星降水产品进行精度评估。图5给出浙江省内经过逐步订正法和最优插值法订正后的GPM过程累计降水量空间和散点分布。可以看到,逐步订正后GPM卫星降水分布(图5a)与观测

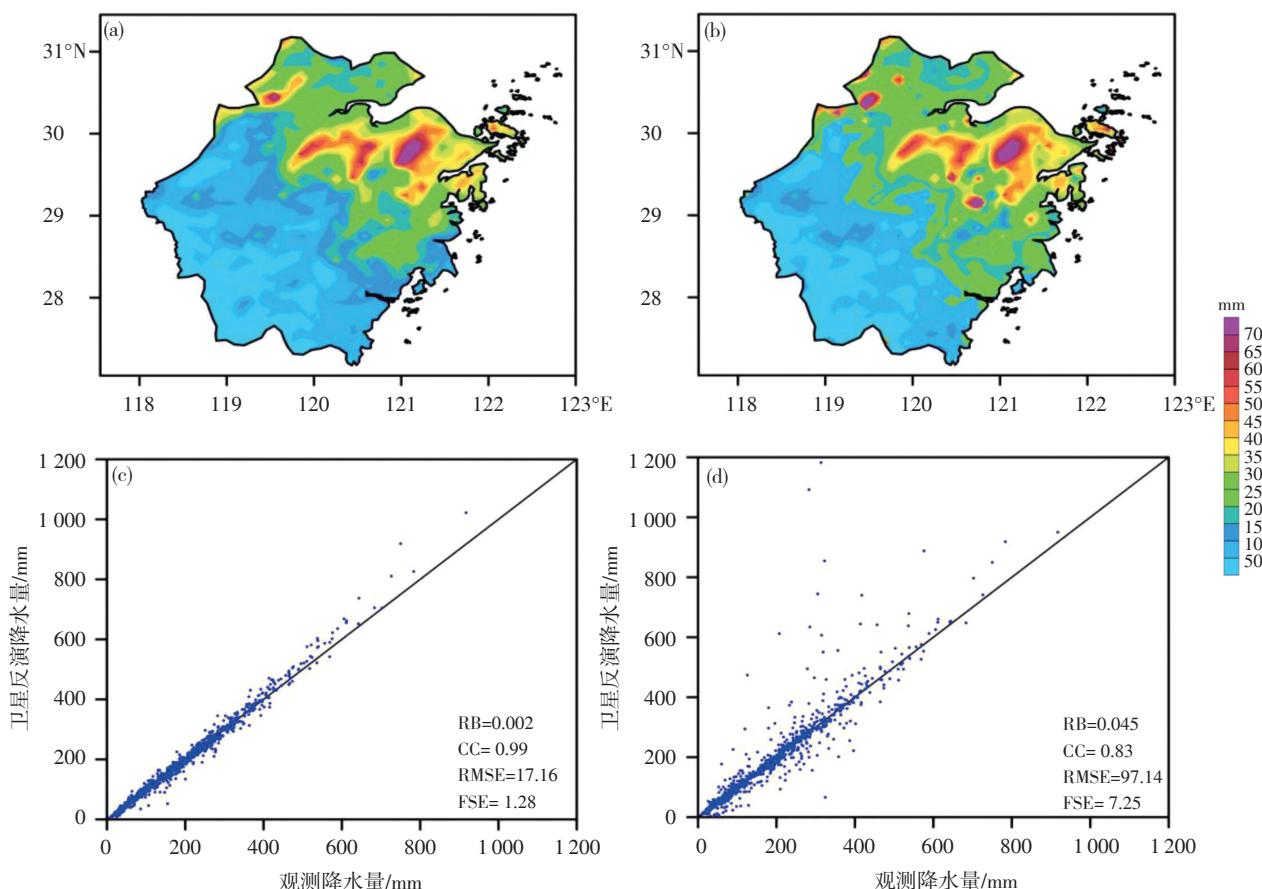


图5 2021年7月22日00时—28日00时经逐步订正(a、c)和最优插值订正(b、d)后的浙江省GPM卫星反演的累计降水量空间分布(a、b)和卫星与观测降水量散点分布(c、d)

Fig.5 (a, b) Spatial distributions and (c, d) scatter plots of the accumulated GPM and observational precipitation after (a, c) the successive and (b, d) optimal interpolation correction from 00 UTC on July 22nd to 00 UTC on July 28th, 2021

(图3a)更为一致,高海拔附近的强降水中心和强度都能较好反演出来,降水量达500 mm以上,订正后的余姚丁家畈站雨量为904 mm。最优插值订正后的结果较未订正前也有明显改善(图5b),能捕捉到高海拔附近的强降水中心,但在会稽山和龙门山附近会出现额外几处零散分布的强降水中心,与观测出入较大,可能与搜索半径取值较大有关。其次,最优插值订正后在浙北嘉兴、湖州、宁波象山和台州区域存在降水强度的低估。因此从空间分布上看,逐步订正法的订正效果要优于最优插值法。

定量检验两种订正方法对GPM卫星过程累计降水的订正能力(图5c、d)。使用逐步订正和最优插值法订正后,CC分别为0.99和0.83,逐步订正法对此次GPM台风累计降水的订正效果更好,与前面主观分析的结论一致(图5a、b)。RB分别为0.2%和4.5%,逐步订正后的雨量点集中于对角线附近,相对偏差小,但当累计雨量达600 mm时,有散点出现在对角线上侧,对强降水略高估(图5c);最优插值订正后,各降水范围内都存在对角线上方的雨量点,分布较零散,导致RB较逐步订正法更大(图5d)。二者RMSE分别为17.16和111.52,相较未订正前的129.45(图3a),逐步订正提升明显,而最优插值变化不大。如前所述,RMSE易受极值影响,相较实况,最优插值法会额外订正出几处

强降水中心,因而在该指标上的改进并不明显。分数标准误差FSE分别为1.28和7.25,与RMSE相似,相较订正前,逐步订正法的订正效果更好。总之,采用两种方法订正后,浙江省内的GPM卫星降水产品反演效果均有所提升,其中逐步订正法效果显著,订正后有较低的RB、RMSE和FSE和较高的CC值,但仍存在对强降水略高估的现象。

3.2 逐日降水的订正分析

为评估台风“烟花”影响期间,订正前、后GPM卫星降水产品对浙江省内逐日降水量的反演效果,图6给出22—27日各评价指标的变化曲线。可见,未订正前RB起伏较大(图6a),26日前对实际降水有明显低估,24和26日偏差较小,约-30%,26日后对降水出现高估。最优插值订正后,RB在0~10%之间,整体有明显改善但对实际降水有高估;通过逐步订正法,RB平稳在0附近。从CC指标看(图6b),未订正前CC在0.3(25、26日)~0.7(24日)之间,经最优插值和逐步订正后,CC分别稳定在0.7~0.9和1附近。订正前、后均方根误差RMSE都在25日达到最大(图6c),订正前RMSE介于20~60,最优插值订正后在10~35之间,而逐步订正后减小至0~5之间。FSE与RMSE变化特征相似,订正后的FSE明显减小,尤其是在逐步订正法情况下(图6d)。

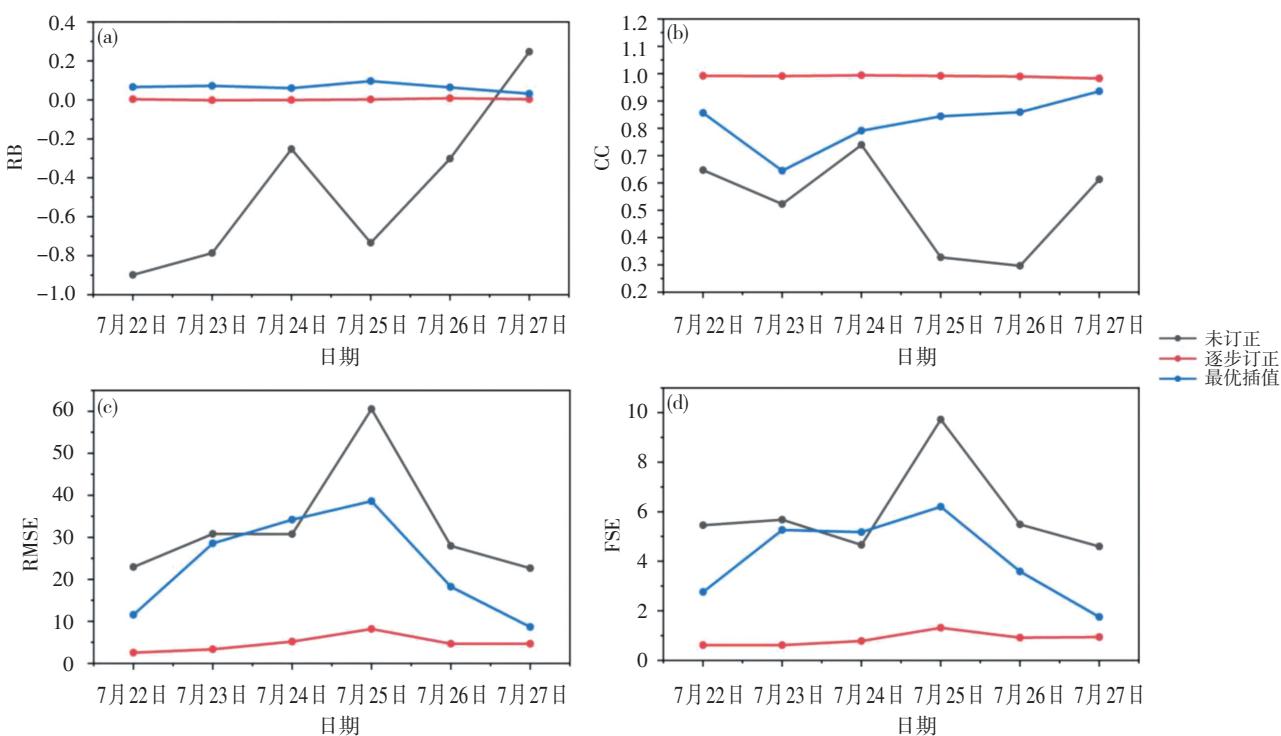


图6 2021年7月22—27日浙江省GPM卫星降水产品逐日降水量未订正、逐步订正和最优插值法订正后的RB(a)、CC(b)、RMSE(c)和FSE(d)指标变化曲线

Fig.6 Variation of evaluation indicators (a) RB, (b) CC, (c) RMSE and (d) FSE of uncorrected, successive corrected and optimal interpolation corrected GPM precipitation products from July 22nd to July 27th, 2021

总体而言,通过逐步订正和最优插值法订正后,GPM反演的浙江省内逐日降水量改善效果明显。逐步订正后的卫星产品能更好地描述台风“烟花”在浙江省内的逐日降水特征,而最优插值法订正后的产品对逐日降水略有高估且在空间分布、极端和平均降水的描述上略差。

特别指出的是,未订正的GPM产品在25日CC下降,RB增加至-70%左右,对实际降水量明显低估(图6a、b)。这一方面是由于复杂地形的影响(Hirpa et al., 2010; Yang et al., 2017),25日实际降水大值区在山区附近(图略);另一方面“烟花”影响过程中,浙江省内卫星降水主要由红外反演降水贡献,25日红外反演降水大值位于宁波沿海和舟山地区,而对宁波北部和地形处的降水大值区完全未能表现(图略),因此卫星降水质量的突然降低,可能与红外反演降水变化有关。进一步分析FNL(Final Operational Global Analysis)大气再分析资料发现,25日“烟花”北侧的强风速将大量水汽输入浙江东北部并在山区附近形成强的水汽通量辐合,云下降水增多,这恰恰是红外反演降水的缺陷所在,最终导致暴雨增幅反演能力表现不佳,和前人研究结果一致(肖柳斯等,2019;唐飞等,2021)。

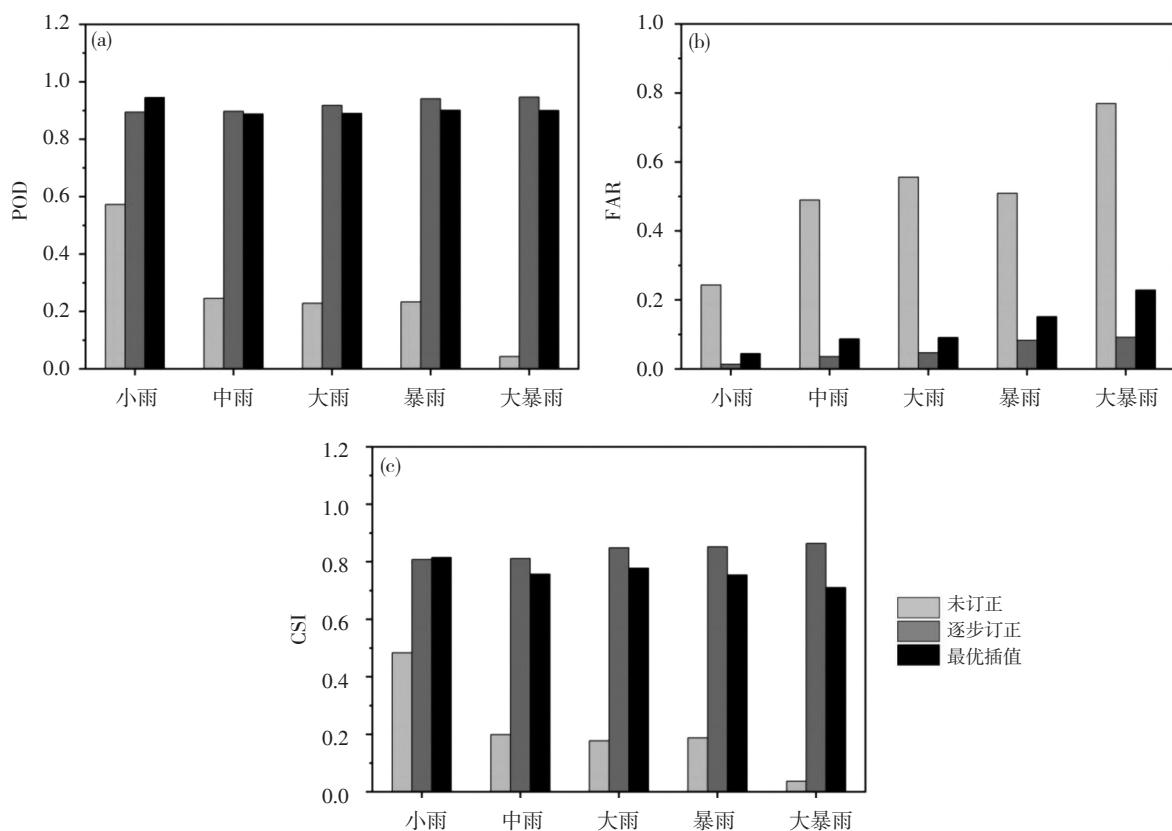


图7 2021年7月22日00时—28日00时浙江省GPM不同量级反演降水产品订正前、逐步订正和最优插值法订正后的探测率POD(a)、误报率FAR(b)和临界成功指数CSI(c)比较

Fig.7 Comparison of (a) POD, (b) FAR and (c) CSI of observational, successive corrected and optimal interpolation corrected GPM precipitation products for different rainfall levels in Zhejiang province from 00 UTC on July 22nd to 00 UTC on July 28th, 2021

图7给出订正前、后浙江省GPM卫星逐日降水产品在小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨五个降水量级下的检验评分。若POD、CSI越大,FAR越小,则说明GPM对分级降水的把握能力更强。未订正前,小雨POD最高约0.6,中到暴雨降至0.2附近,大暴雨则不足0.1,这主要由于GPM对弱降水具有较高的捕捉能力(唐国强等,2015;金晓龙等,2016)。通过两种订正方法,各级别降水POD都接近或超过0.9,除在小雨级别外,其余逐步订正后的POD均比最优插值订正后的高,说明逐步订正对估测降水的订正效果更好(图7a)。未订正前,小雨FAR较小约0.25,中至暴雨则接近或超过0.5,大暴雨增至0.8附近;两种方法订正后,FAR明显减小,随着降水量级增加,FAR同步增加,但逐步订正法较最优插值法在各级别降水的订正效果更佳,逐步订正后的GPM产品小雨FAR接近0,大暴雨仅0.1,而最优插值可达0.2(图7b)。就CSI来看,未订正前CSI整体偏低,仅小雨量级大于0.4,中到暴雨CSI介于0.1~0.2,大暴雨CSI降至0.1以下;但通过逐步和最优插值订正后,各级别CSI都超过0.7,两种订正方法在小雨级别差别不大,其余级别逐步订正法取得的CSI都高于最优插值法,尤其在大暴雨量级上(图7c)。综

合分析,未经订正的卫星降水产品除对小雨有较好反映能力外,其余各级别POD、CSI偏低,FAR偏高,且随着量级增加,存在POD、CSI减小,FAR增加的趋势,反映GPM卫星对小雨以上降水的探测能力较差。两种方法订正后,POD、CSI明显增加,FAR明显减小,且逐步订正比最优插值法订正之后的各项指标更优,说明其订正效果更好。

3.3 逐小时降水的订正分析

短时强降水会带来山洪、山体滑坡等地质灾害,因此进一步分析了浙江省内“烟花”台风小时降水的时序变化(图8)。未订正时,在“烟花”影响的22—23日GPM卫星降水对小时降水低估明显;24日GPM产品的峰值峰谷位置变化与观测大致同步;但25日卫

星反演产品质量下降,明显低估实际降水;27日后期GPM降水与观测较一致。逐步订正后的GPM卫星降水产品与观测降水曲线几乎重合,能够准确捕捉逐时降水量变化;最优插值法订正后,曲线整体位于观测降水曲线上方,明显存在高估的特征,相较未订正前,GPM卫星降水产品反演效果也有提升。从评估指标看,未订正前RB为-45%,逐步和最优插值订正后,RB分别为2%和17%,说明两种订正方法对降水存在高估,最优插值高估特征更明显;订正前RMSE和FSE介于0.7~0.8,逐步和最优插值订正后分别降为0.02和0.2;CC订正前仅0.56,而通过订正,都可达0.98以上。通过对GPM小时降水的订正,同样提升了浙江省内卫星产品对小时降水的反演能力。

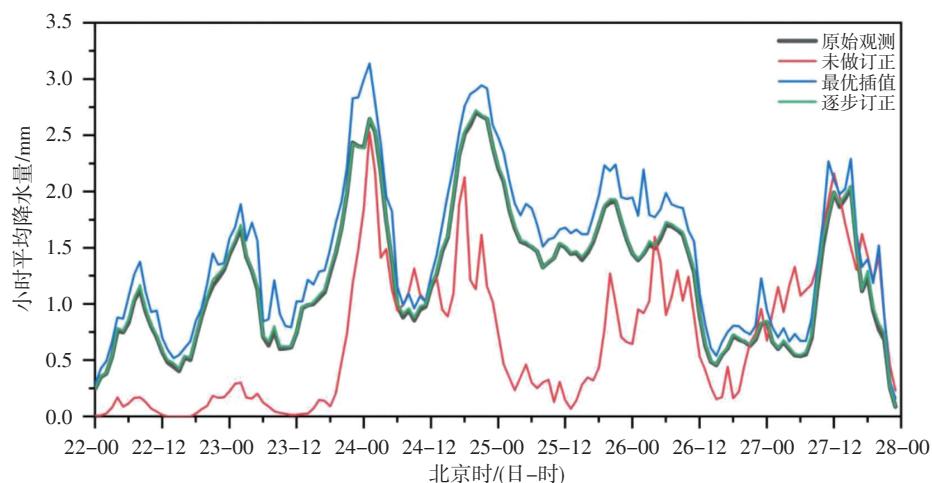


图8 2021年7月22日00时—28日00时浙江省内逐小时平均观测、未做订正、最优插值和逐步订正后的GPM降水产品降水量变化及相关统计参数(RB、RMSE、FSE、CC)平均值演变

Fig.8 The average of hourly rainfall and related statistical parameters (RB, RMSE, FSE, CC) of observational, uncorrected, successive corrected and optimal interpolation corrected GPM precipitation products in Zhejiang province from 00 UTC on July 22nd to 00 UTC on July 28th, 2021

图9是订正前、后浙江省内GPM逐小时降水产品的分级检验结果。按照《短时气象服务降雨量等级》标准(中国气象服务协会,2019),小时降水等级可分为短时小雨($< 2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)、短时中雨($2 \sim 3.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)、短时大雨($4 \sim 7.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)、短时暴雨($8 \sim 19.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)、短时大暴雨($20 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)和短时特大暴雨($> 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)六个等级。未订正前,当降水量仅短时小雨强度时,POD约0.2,CSI约0.1,随着短时降水强度的增强,POD和CSI均呈下降趋势,虽然在 $15 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内有一定探测率,但不稳定性很大。两种方法订正后的产物对小雨的POD提升至0.8左右,且此时最优插值法效果略好于逐步订正,但随着降水强度的增加,在 $2 \sim 23 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 部分,POD逐渐减小,且逐步订正法得到的POD几乎均高于最优插值法,表明量级小于短时大暴雨时,逐步订正对GPM产品的订正效果更好。而当雨强大于 $23 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,两种订正方法的POD都出现了0至1的突变现象,表明短时

大暴雨可被订正后的GPM卫星产品探测到,最优插值法更可探测到 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的短时特大暴雨(图9a)。

由于订正后的POD在量级超过短时大暴雨时出现较多0、1突变,该指标量不稳定性较大,进而通过CSI评估卫星数据真正估测降水事件的能力。可以看到(图9b),CSI与POD变化趋势相似,随降水量级的增加CSI减小。未订正前小雨CSI为0.1,而订正后都可提升至0.6附近,雨强小于 $23 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时两种订正方法提升明显,大于 $23 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时虽仍有波动但最优插值订正后的产物具有一定的可探测性。

分析GPM卫星降水产品的累积降水率频数CDFc(cumulative rain rate distribution of occurrence)分布,可揭示产品对降水事件探测的敏感性(Chen et al., 2016; Zhang et al., 2019),CDFc是计算不同量级小时雨强个数占总样本数的比率。图9c给出观测和订正前、后GPM产品的CDFc分布。可以看到,随着降水阈值

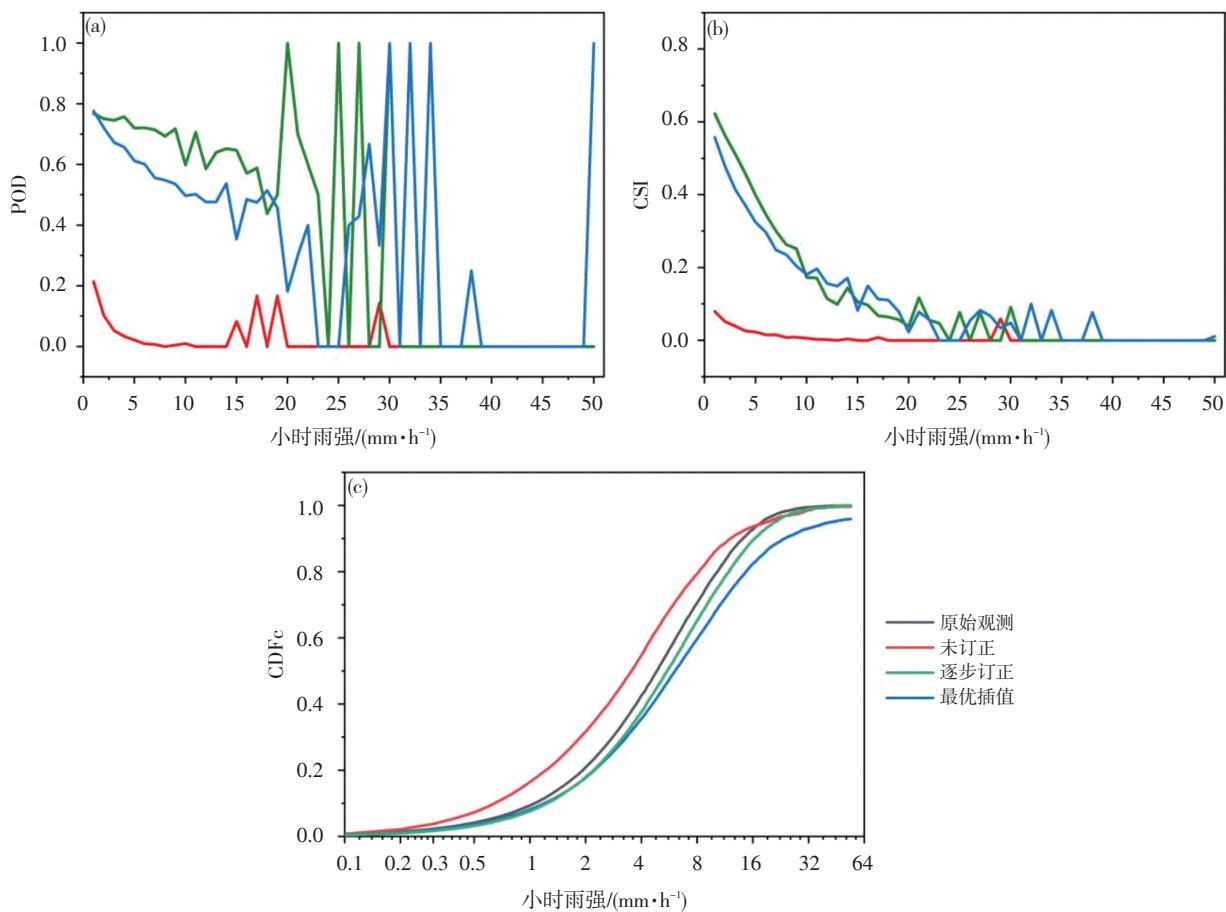


图9 2021年7月22日00时—28日00时浙江省观测的小时雨强及GPM反演产品不同小时雨强阈值下未订正、逐步和最优插值订正后的探测率POD(a)、临界成功指数CSI(b)和累积降水率频数CDFc(c)分布

Fig.9 Distribution of (a) POD, (b) CSI and (c) CDFc for observational, uncorrected, successive corrected and optimal interpolation corrected GPM precipitation products at different rainfall levels in Zhejiang province from 00 UTC on July 22nd to 00 UTC on July 28th, 2021

的增加,CDFc明显增加,当阈值达 $16 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,CDFc可达80%。但阈值小于 $16 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,未订正曲线一直在观测曲线上方,而后低于观测曲线,说明未订正的GPM产品降水量都集中在短时暴雨量级以下,存在明显的低估现象,与前文研究结论一致;订正后的两条曲线与观测曲线更为接近,但在所给阈值范围内均位于观测曲线下方,表明订正后的卫星产品存在高估实际降水的现象,但逐步订正曲线更接近观测曲线,相较而言,最优插值法的高估更加显著。

4 结论与讨论

2021年台风“烟花”两次登陆浙江,在浙东北沿海地区和浙西北山区引发强降水,本研究以地面气象观测数据为参考,采用逐步和最优订正法订正卫星反演降水,并使用多项指标评估此次台风过程订正前后GPM卫星FR产品不同时间尺度的降水订正效果,得到以下主要结论:

(1) 未经订正的卫星反演产品虽能抓住台风“烟花”累计降水在浙江省内的空间分布特征,但未能描

述浙江省内高大地形处的强降水中心,严重低估了累计降水量。浙江省内累计降水的低估主要源于对降水大值区的显著低估。降水大值区内,RB、CC下降明显,RMSE、FSE明显增加。

(2) 通过逐步和最优插值法订正后,GPM累计降水量的反演效果均有提升,都能捕捉到高海拔山区附近的强降水中心,CC分别为0.99和0.83。虽然两者存在对强降水略高估的现象,RB分别为0.2%和4.5%,但最优插值订正后的高估更为明显。逐步订正后,RMSE和FSE明显降低。总体而言,逐步订正法表现更好。

(3) 从浙江省内逐日降水的分级检验评估结果看,未经订正的GPM卫星降水产品除对小雨有较好反映能力外,其余各级别探测能力较差。订正后,POD、CSI增加,FAR较小,GPM反演的逐日降水量改善效果明显,且逐步订正后的各评估指标较最优插值订正更优。

(4) 从浙江省内逐时降水评估结果看,在台风“烟花”影响的22—23日和25日未订正的卫星反演产品存在明显低估。两种方法订正后,GPM产品对各级

别小时降水的反演能力有所提升。逐步订正后能准确捕捉逐时降水量变化,最优插值订正后虽变化趋势一致,但存在高估现象。在小时降水的分级检验上,订正前、后POD随降水强度增强而逐渐减小;雨强小于 $23 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时两种订正方法提升明显,且逐步订正对GPM产品的订正效果更好,雨强大于 $23 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时POD波动较大,但最优插值订正后的产品具有一定可探测性。

(5) 此外,由于卫星产品对台风降水有准实时估测的需求,因此对实时类(ER和LR)和滞时类(FR)降水估测产品也进行了对比评估。结果发现,台风“烟花”影响过程中,三类产品均以红外反演降水贡献为主,都低估了浙江省内实际降水,但以本文讨论的FR产品效果最优,LR次之,ER最差。FR产品对浙江省内过程降水低估近45%,ER低估约63%。因此ER、LR两类产品用于台风降水准实时估测或水文、陆面模型预报时,订正后使用将更为必要,且方法宜采用逐步订正法。

本文在台风“烟花”影响浙江期间对GPM卫星FR降水产品开展了检验评估和订正,发现该卫星降水数据在估测地面台风降水变化上仍有较大提升空间,相关反演算法还需进一步修正。此外,该产品在其它登陆台风过程中的具体表现如何?下一步可针对更多台风个例加以评估检验,以寻求更适用于浙江台风降水的卫星估测产品。

参考文献(References):

陈爱军,吴雪菲,楚志刚.2021.精细化评估GPM/IMERG产品对台风“妮坦”降水的观测精度[J].气象科学,41(5):678–686. Chen A J, Wu X F, Chu Z G. 2021. Refined evaluation of the accuracy of GPM/IMERG in the precipitation process of typhoon Nida [J]. Journal of the Meteorological Sciences,41(5):678–686 (in Chinese). doi:10.12306/2020jms.0037

邓雪娇,吴兑,黄浩辉.1998.自记雨量资料订正雷达估测降水方法简介[J].广东气象,2:17–19. Deng X J, Wu D, Huang H H. 1998. Introduction to the methodology for estimating precipitation by revised radar for self-recorded rainfall data [J]. Guangdong Meteorology,2:17–19 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007–6190.1998.02.006

韩芙蓉,鹿翔,吴天贻,等.2023.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[J].暴雨灾害,42(1):57–66. Han F R, Lu X, Wu T Y, et al. 2023. Evaluation of monitoring ability of the integrated multi-satellite retrievals for precipitation during typhoon landing in Zhejiang from 2015 to 2020 [J]. Torrential Rain and Disasters,42(1):57–66 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–015

韩焱红,邵静静,苗蕾,等.2019.基于最优插值的雷达成量降水估测订正及应用—以广元市为例[J].高原山地气象研究,2019,39(3):82–85. Han Y H, Gao J J, Miao L, et al. 2019. Correction for radar-derived quantitation precipitation estimation based on the optimum interpolation and its application—taking Guangyuan as an example [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,39(3):82–85 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184.2019.03.013

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, 2017 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

刘少军,蔡大鑫,韩静,等.2021.卫星遥感反演降水研究进展简述[J].气象科技进展,11(1):28–33. Liu S J, Cai D X, Han J, et al. 2021. Progress of the satellite remote sensing retrieval of precipitation [J]. Advances in Meteorological Science and Technology,11(1):28–33 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095–1973.2021.01.005

李晓俞,陈生,梁振清,等.2020.台风“山竹”期间GPM卫星降水产品的误差评估[J].气象研究与应用,41(3):8–15. Li X Y, Chen S, Liang Z Q, et al. 2020. Performance assessment of satellite-based quantitative precipitation estimation during typhoon Mangkhut [J]. Journal of Meteorological Research and Application,41(3):8–15 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45–1356/P.2020.3.02

孙乐强,郝振纯,王加虎.2014.TMPA卫星降水数据的评估与校正[J].水利学报,45(10):1135–1146. Sun L Q, Hao Z C, Wang J H. 2014. Assessment and correction of TMPA products 3B42RT and 3B42V6 [J]. Journal of Hydraulic Engineering,45(10):1135–1146 (in Chinese). doi:10.13243/j.cnki.slxb.2014.10.001

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. Tang F, Chen F J, Zhu G X Y, et al. 2021. Analysis of influence process of Typhoon In-fa (202106) based on satellite remote sensing data [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,44(5):703–716 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210812001

唐国强,万伟,曾子锐,等.2015.全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述[J].遥感技术与应用,30(4):607–615. Tang G Q, Wan W, Zeng Z Y, et al. 2015. An overview of the Global Precipitation Measurement (GPM) mission and its latest development [J]. Remote Sensing Technology and Application,30(4):607–615 (in Chinese). doi:10.11873/j.issn.1004–0323.2015.4.0607

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 Meteorology,38(5):993–1003 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2018.00143

尹忠海,张沛源,程明虎.2014.雷达定量测量降水的检验“真值”求取方法研究[J].物理学报,63(23):1–11. Yin Z H, Zhang P Y, Cheng M H. 2014. Research on attaining methods of rainfall “truth” by assessment of radar measurement of rainfall [J]. Acta Physica Sinica,63(23):1–11 (in Chinese). doi:10.7498/aps.63.239201

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 Geographica Sinica*,74(1): 1305–1318 (in Chinese). doi:10.11821/dlx201907003

中国气象服务协会.2019.短时气象服务降水量等级:T/CMSA 0013–2019 [S].北京:中国标准出版社. China Meteorological Service Association.2019. Precipitation level of shorter meteorological services: T/CMSA 0013–2019 [S]. Beijing: Standards Press of China

Chen F R, 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

Cressman G P. 1959. An operational objective analysis system [J]. *Monthly Weather Review*,87(10):367–374. doi:10.1175/1520-0493(1959)087<0367:aoaoas>2.0.co;2

Cheema M J M, Bastiaanssen W G M. 2012. Local calibration of remotely sensed rainfall from the TRMM satellite for different periods and spatial scales in the Indus Basin [J]. *International Journal of Remote Sensing*,33(8):2603–2627. doi:10.1080/01431161.2011.617397

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. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.12.026

Guo H, Chen S, Bao A M, et al. 2015. Comprehensive evaluation of high-resolution satellite-based precipitation products over China [J]. *Atmosphere*,7(1):6. doi:10.3390/atmos7010006

Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. 2007. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales [J]. *Journal of hydrometeorology*,8(1):38–55. doi:10.1175/jhm560.1

Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. 2020. Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) technical documentation [EB/OL]. Available online:https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-10/IMERG_doc_201006.pdf

Hong Y, Hsu K L, Sorooshian S, et al. 2004. Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system [J]. *Journal of Applied Meteorology*,43(12): 1834–1853. doi:10.1175/jam2173.1

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:camptg>2.0.co;2

Li N, Tang G Q, Zhao P, et al. 2017. Statistical assessment and hydrological utility of the latest multi-satellite precipitation analysis IMERG in Ganjiang River basin [J]. *Atmospheric Research*,183:212–223. doi: 10.1016/j.atmosres.2016.07.020

Omranian E, Sharif H O, Tavakoly A. 2018. How well can global precipitation measurement (GPM) capture hurricanes? Case study: Hurricane Harvey [J]. *Remote Sensing*,10(7):1150. doi:10.3390/rs10071150

Sorooshian S, Hsu K L, Gao X G, et al. 2000. Evaluation of PERSIANN system satellitebased estimates of tropical rainfall [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,81(9):2035–2046. doi:10.1175/1520-0477(2000)081<2035:EOPSSE>2.3.CO;2

Wang R, Chen J Y, Wang X W. 2017. Comparison of IMERG level-3 and TMPA 3B42V7 in estimating typhoon-related heavy rain [J]. *Water*,9 (4):276. doi:10.3390/w9040276

Xue X W, Hong Y, Limaye A S, et al. 2013. Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: Are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins? [J]. *Journal of Hydrology*,499:91–99. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.06.042

Yong B, Ren L L, Hong Y, et al. 2010. Hydrologic evaluation of multisatellite precipitation Analysis standard precipitation products in basins beyond its inclined latitude band: A case study in Laohahe basin, China [J]. *Water Resources Research*,46(7):w07542. doi:10.1029/2009wr008965

Zhang A, Xiao L S, 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. doi:10.1016/j.atmosres.2018.09.018

(责任编辑 张文)