

TRMM/GPM 卫星降水产品在淮河上游逐日和小时尺度的精度评估

王蕊^{1,2}, 余钟波^{1,2}, 杨传国^{1,2}, 李莹³

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 中国气象局 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 基于淮河流域上游区(洪河口以上)2014年4月–2015年12月的实测逐日和小时降水数据,采用综合评价指标评估了 TRMM 3B42 v7 和 GPM IMERG 卫星产品在逐日和小时尺度上的监测精度。结果表明:逐日尺度上,对于流域面平均降水和网格降水,GPM 产品与实测降水的相关性略优于 TRMM,相关系数为 0.87,误差略大于 TRMM,但均控制在 0.8 mm/d 以内;降水探测能力方面,GPM 与实测降水的一致性较高,尤其表现在小雨和中雨降水事件上,可用于日尺度的水文模拟和水资源评价等研究。小时尺度上,TRMM 对 6 场极端降水的监测能力比较稳定,略有低估 (BIAS 均值为 -6%),GPM 对不同的极端降水事件监测能力不一,可靠性相对较低,相对于 TRMM 卫星降水产品,GPM 在对极端降水的监测能力方面还有待提高。

关键词: 卫星降水产品; 日降水; 小时降水; 极端降水; GPM; TRMM; 淮河流域上游

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)05-0109-07

Accuracy evaluation of TRMM /GPM satellite precipitation products on daily and hourly scales in upper reaches of Huaihe River Basin

WANG Rui^{1,2}, YU Zhongbo^{1,2}, YANG Chuanguo^{1,2}, LI Ying³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the gauge – based daily and hourly precipitation data from April 2014 to December 2015 in the upper reaches of Huaihe Basin (above Honghekou estuary), the comprehensive evaluation indices were used to evaluate the monitoring accuracy of TRMM 3B42 v7 and GPM IMERG in the daily and hourly scales. The results show that: on the daily scale, the correlation between GPM product and gauge – based precipitation is slightly better than TRMM with correlation coefficient 0.87, and the error is slightly larger than that of TRMM, but both are controlled < 0.8 mm/d. In terms of precipitation detection capability, the consistency between GPM and gauge – based precipitation is significantly improved, especially in light and moderate precipitation events, which shows that GPM product can be used for hydrological simulation and water resources evaluation on the daily scale. At the hourly scale, the monitoring capacity of TRMM for six extreme precipitation events is relatively stable, slightly underestimates (BIAS average is -6%). However, the reliability of GPM for different extreme precipitation events is lower, indicating that the monitoring accuracy of GPM product in extreme precipitation needs to be improved.

Key words: satellite precipitation products; daily precipitation; hourly precipitation; extreme precipitation

收稿日期: 2018-01-02; 修回日期: 2018-03-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402706、2016YFC0402710); 国家自然科学基金项目(41471016); 公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201406021)

作者简介: 王蕊(1994-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为卫星水文应用。

通讯作者: 杨传国(1981-), 男, 山东青岛人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为水文模拟与水资源评估。

on ;GPM; TRMM; upper reaches of Huaihe River Basin

1 研究背景

降水是全球陆地水文循环的重要要素,是地面水文过程最为关键的驱动参数。降水监测,尤其极端降水,对于预防洪水、暴风雪、泥石流、山体滑坡等自然灾害具有十分重要的意义^[1]。传统的地面雨量站观测可以提供准确和直接的站点观测降水,但由于站点分布、地形等因素的影响,不能精确地反映大尺度降水的时空分布特征^[2];雷达估计降水也会受到运行环境以及雷达回波等误差来源的影响^[3]。而卫星监测范围大,且时空分辨率高,可以为降水资料稀缺地区或者无降水资料地区提供新的数据支撑。热带降雨测量卫星(Tropic Rainfall Measurement Mission, TRMM)是美国国家航空航天局(NASA)和日本宇航研究开发机构(JAXA)联合研发的专门用于监测热带、亚热带地区降水的卫星^[4],其搭载的降雨雷达(PR)为全球第一个星载测雨雷达,可以提供暴雨的三维结构,对降水的精确估计起着重要的作用^[5]。GPM 作为 TRMM 卫星的继任者,其核心卫星于 2014 年 2 月 27 日成功发射,GPM 携带了全球首个 Ku/Ka 波段双频测雨雷达(DPR)^[6]。相对于 TRMM 降雨雷达(PR),DPR 可以提供液态和固态降水的强度和三维轮廓,可以更加精准地监测微量降水(<0.05 mm/h)和固态雨雪,对中高纬度地区的研究具有十分重要的意义^[7-9]。

许多学者对上一代 TRMM 卫星降水数据的精度及水文模拟进行了大量的研究工作,如冯海涛等^[10]发现 TRMM 3B43 月降水数据在云南省具有较高的精度,Yong Bin 等^[11]评价了 TRMM 3B42 实时和非实时卫星产品的时空变化特征,刘少华等^[12]对中国大陆流域分区 TRMM 降水质量进行了评估,结果表明各流域 TRMM 降水量与气象站演变趋势基本一致,卫星降水相对于地面站点,具有较好的精度。但目前国内外关于新一代 GPM 降水数据精度验证较少,尤其是对小时尺度极端降水事件的研究,因此亟需开展相关研究。本文选取暴雨洪涝等自然灾害频发的淮河上游区(洪河口以上)为例,结合实测逐日和小时降水数据,采用综合评价指标和地理信息系统方法评估 TRMM 3B42v7 和新一代卫星产品 GPM IMERG 降水产品的时空精度,以期卫星降水数据在区域洪水预报和水文预报预警等方面的应用提供依据。

2 数据和方法

2.1 研究区

淮河上游位于洪河口王家坝水文站以上,集水面积 3.1×10^4 km²,干流河长 360 km ($31^{\circ}30' \sim 33^{\circ}32'N$, $113^{\circ}15' \sim 115^{\circ}36'E$),西起河南省南阳市桐柏县西部的桐柏山主峰太白顶西北侧河谷,流域内海拔高度 21 ~ 1 120 m,地形较为复杂,西部和南部为山区、丘陵区,其余为广阔的平原。流域属暖温带半湿润季风气候区,地处我国南北气候过渡带,冷暖和旱涝转变急剧,气温变化由北到南递增,年平均气温为 11 ~ 16℃,年内降水多集中在 6 ~ 9 月份。

2.2 数据来源

本研究采用的实测逐日降水资料从中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)获取的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 淮河上游区(洪河口以上)2014 年 4 月 ~ 2015 年 12 月的网格降水,该数据集从综合库实时提取全国 2419 个站逐日降水量,采用基于“气候背景场”的最优插值方法所得^[13]。暴雨过程所采用的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 小时数据来自国家气象科学数据中心,由上述全国 2419 个气象站插值得到。

卫星降水资料选择采用最新算法处理校正的全球 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 每 3h 的 TRMM 3B42v7 降水产品和全球 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 每 0.5h 的新一代卫星产品 GPM-IMERG(均为 research 版本,在后文中分别简称为 TRMM 和 GPM),将两种卫星数据分别在 3h 和 0.5h 时间尺度上进行累加得到 TRMM 和 GPM 卫星逐日降水数据。两组卫星降水数据由 NASA 网站(<https://pmm.nasa.gov>)下载。

2.3 研究方法

为了定量评估各卫星降水产品的精度,本研究采用了 3 种不同类型的评价指标。第一种指标相关系数(CC)反映卫星降水与实测降水序列的线性相关程度。第二类指标包括相对偏差(BIAS)、均方根误差(RMSE)、平均误差(ME),用来描述卫星降水相对于实测降水的误差。第三类指标包括命中率(POD)、误报率(FAR)、成功系数(CSI),用来描述卫星反演降水对不同降水事件发生频次的把握能力,各指标计算公式见文献[14]。以实际降水的面平均值为基准,根据国家气象部门关于降水标准的有关规定,日降水量可分为小雨(<10 mm)、中雨($10 \sim 24.9$ mm)、大雨($25 \sim 49.9$ mm)和暴雨(≥ 50 mm)。

3 逐日降水序列分析

3.1 时间过程分析

考虑到卫星降水误差与时空尺度均有关系,精度评价在时间尺度和空间尺度上分别进行。图1为2014年4月–2015年12月淮河上游两种卫星产品和实测的平均日降水过程。从图1中可看出,TRMM/GPM与实测降水吻合度整体较好,可以很好

的检测出降水事件,两种卫星的线性相关拟合均通过 $p < 0.01$ 的显著性检验,说明其与实测降水的相关性较高(图2)。但是TRMM卫星产品在降水大值区明显偏低,这可能与降水雷达(PR)反演降水估计算法的不确定性有关^[15]。而GPM卫星产品和实测降水量在中小雨区间整体一致性上较高,GPM在侦测中小雨雪上的能力上优于TRMM,大值区降水仍存在显著误差,与TRMM相比改进并不显著。

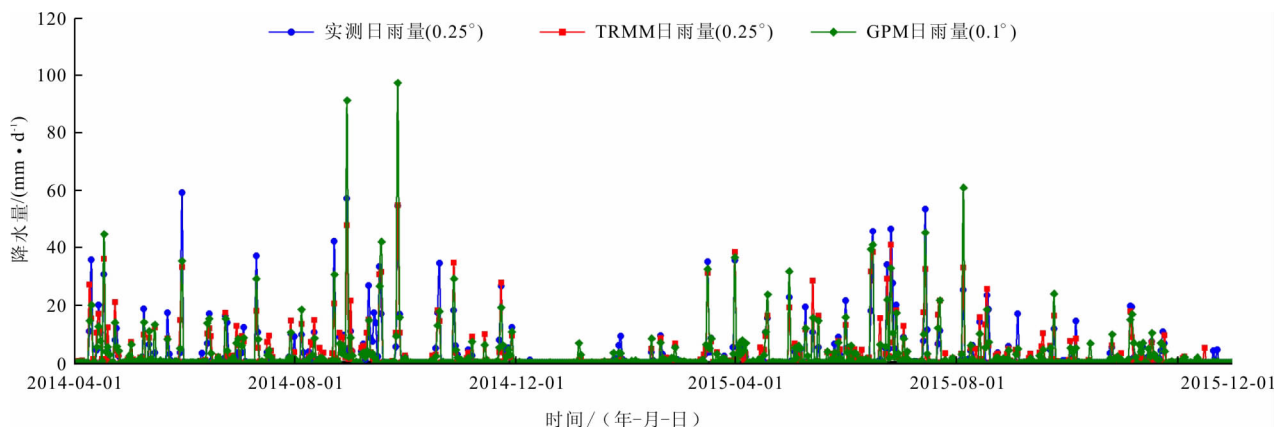


图1 淮河上游2014年4月–2015年12月TRMM/GPM与实测面平均日降水数据对比

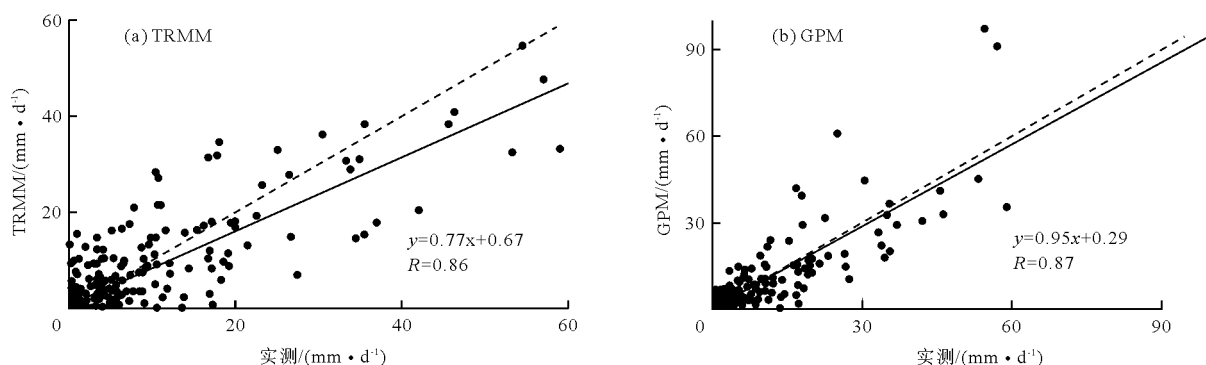


图2 淮河上游TRMM/GPM与实测面平均雨量相关性分析

逐日序列统计表明,TRMM/GPM两种卫星产品的相关系数 CC 相当,分别为0.86和0.87。由于个别场次极端降水的高估,GPM的误差略有增加,分别为 -0.03% 和 4.84% ,均在可接受的范围内($BIAS < 5\%$),精度较为满意。值得注意的是,对于检测降水事件发生与否,GPM相对于TRMM,命中率 POD (0.81/0.91)和成功系数 CSI (0.62/0.71)均明显提高,误报率 FAR (0.28/0.24)下降。表明新一代GPM降水产品更好地监测到了降水事件,这是提高卫星产品测水能力的潜在有利因素。

3.2 空间分布分析

为验证TRMM/GPM卫星数据空间分布上的精

度,分别计算了3个有代表性的指标 CC 、 ME 和 POD ,见图3。可见,GPM的相关系数 CC 要明显高于TRMM,在西南部的桐柏山区优势更为明显,TRMM相关系数在0.55左右,而GPM在0.75左右;对于平均误差 ME ,TRMM和GPM的空间分布相似,西南山区低估了实测降水,东北平原则发生了高估, ME 的分布范围在 $-0.40 \sim 0.80$ mm/d之间。而对于命中率指标 POD ,GPM相对TRMM卫星产品有了极大的提高,TRMM卫星的 POD 在0.55~0.75之间,而GPM基本上在0.75以上,甚至可以达到0.85以上。总体上,在逐日尺度上GPM的监测能力要高于TRMM,表现出对降水准确的捕捉能力。

图4展示了不同降水等级对应的统计指标 CC

和 POD 在 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 下的空间分布。在不同降水下,整体上 TRMM 和 GPM 的相关系数 CC 空间变化趋势一致,南部的相关系数大于北部(除中雨外)。其中暴雨的相关系数最高,虽然对于淮河上游的中部出现负相关,但大部分地区可以达到 0.6 以上。对于小雨和大雨,GPM 卫星的空间差异性更小,精度更高,暴雨相当,而对中雨的监测精度稍差,可能与 GPM 主卫星的倾角(65°)比 TRMM 卫星倾角(35°)低有关,对研究区访问频次低导致其错过一些降雨事件^[16]。

在降水事件的探测能力上, POD 指标表明,对于不同的降水类型,GPM 的命中率均较 TRMM 产品明显提高,其中小雨和中雨的空间分布差异最为明显,TRMM 卫星基本上在 0.6 以下,GPM 卫星大部分地区达 0.6 以上,在板桥水库和南部山区达到 0.7 以上。原因可能是相对于 TRMM 卫星,GPM 核心观测卫星携带的两大主要载荷(DPR 和 GMI)性能提升,可以从不同的角度监测云层不同降水粒子的空间结构和物理特征,提高了对弱降水及固态降水的捕捉能力^[17]。

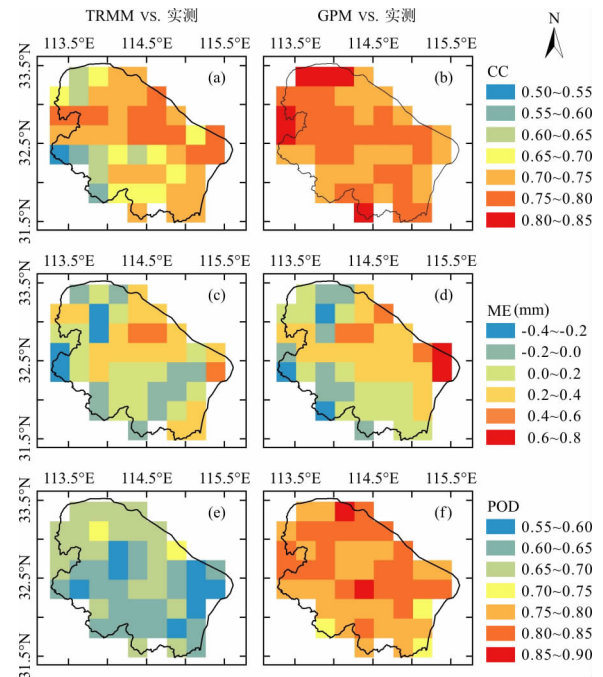


图3 淮河上游 TRMM/GPM 特征指标在 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 下的空间分布

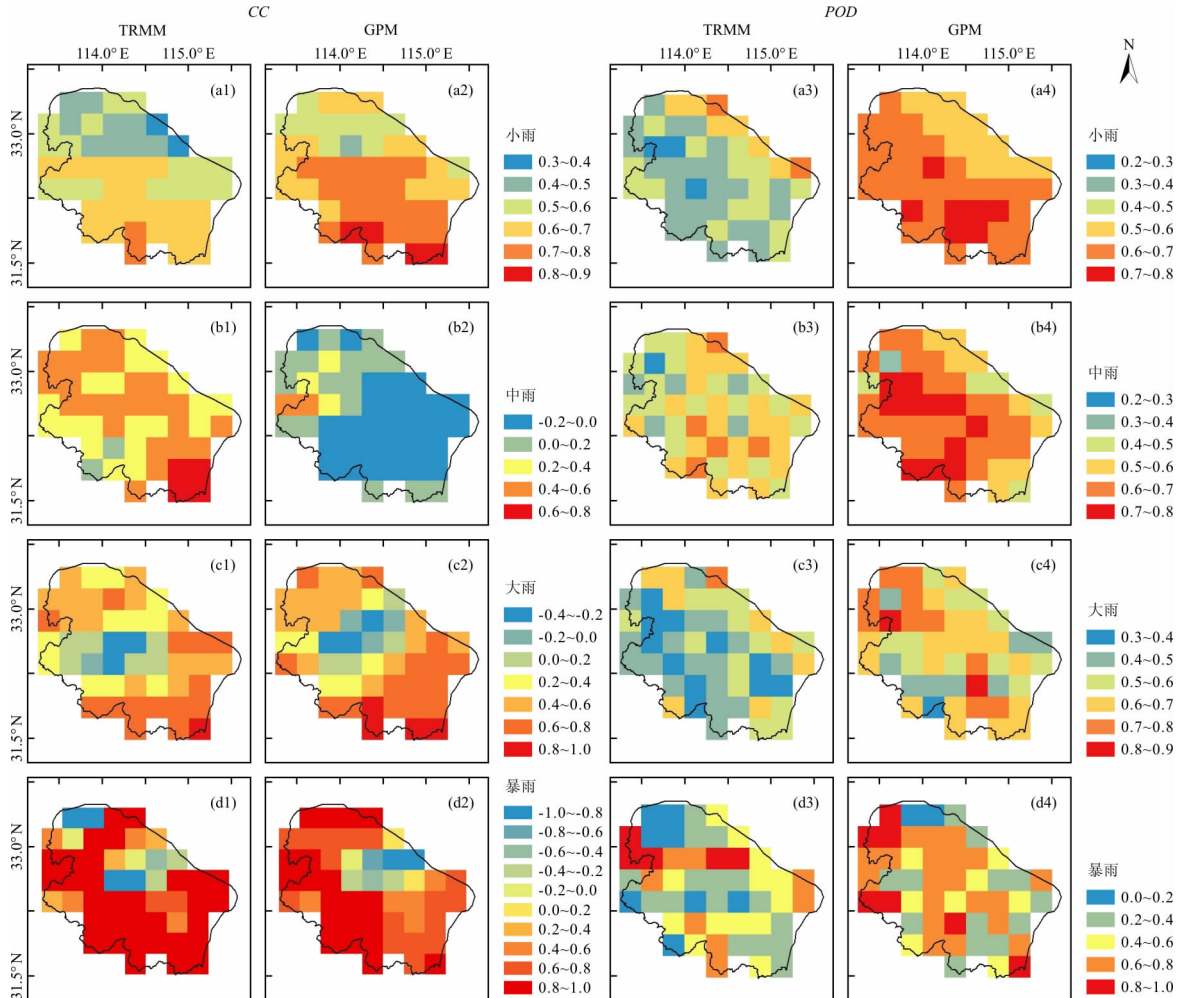


图4 淮河上游不同等级降水对应的 TRMM/GPM 卫星统计指标的空间分布

4 典型极端降水过程分析

对于水文气象灾害,更关心的是极端降水过程的变化及其可能造成的危害,因此对极端降水天气过程进行深入理解和认识以及提高相关洪水预报水平变得十分重要^[18]。本次选取了2014–2015年淮河上游6场典型极端降水过程进行分析,为TRMM/GPM反演降水算法的修正和在洪水预报中的应用提供科学依据。

总体上,GPM和TRMM卫星均能抓住主要的降水过程,与实测降水相比变化趋势相同,均能捕捉到降水峰值(图5)。同时,结合图6统计指标表明,TRMM对极端降水的监测能力较优(CC 均值:0.64; $BIAS$ 均值:–6%; $RMSE$ 均值:4.81mm/3h),监测结果更接近实测站点数据,对场次降水的峰现时间和峰量监测都较为准确。同GUO Hao等^[7]在逐日尺度上对中国的研究结论相同,GPM对极端降水事件的监测相对较差,且略有高估(CC 均值:0.58; $BIAS$ 均值:16.44%; $RMSE$ 均值:8.69mm/3h),这与图4的空间

分析结果一致。其中TRMM在6场极端降水中表现得均比较稳定,均方根误差 $RMSE$ 均在5mm/3h以内,相对误差 $BIAS$ 在–35%~25%之间,与实测降水过程的吻合效果较好,如2015年第2场降水(06-26–06-27),TRMM峰现时间与实测降水相同,峰量分别为15.20、14.43、10.71mm。而GPM产品的监测能力不稳定, $RMSE$ 最大达13.89mm/3h, $BIAS$ 变化范围在–55%~90%之间,如2014年第2场(08-30–08-31)和第3场降水(09-26–09-28),GPM严重高估了实测降水($BIAS$ 分别为87.22%、56.02%),而2015年第2场降水(06-26–06-27),GPM则发生了严重低估($BIAS$ 为–54.32%),可能与GPM系列卫星运行初期算法和程序等的不确定性有关,在使用过程中需要注意。从上述各项统计指标来看,对极端降水过程,TRMM降水具有较低的误差和较高的相关系数,但GPM与TRMM降水产品相比具备更高的时间和空间分辨率,更大的覆盖范围,对未来气象、水文、农业和自然灾害等领域的研究和应用均具有十分重要的意义。

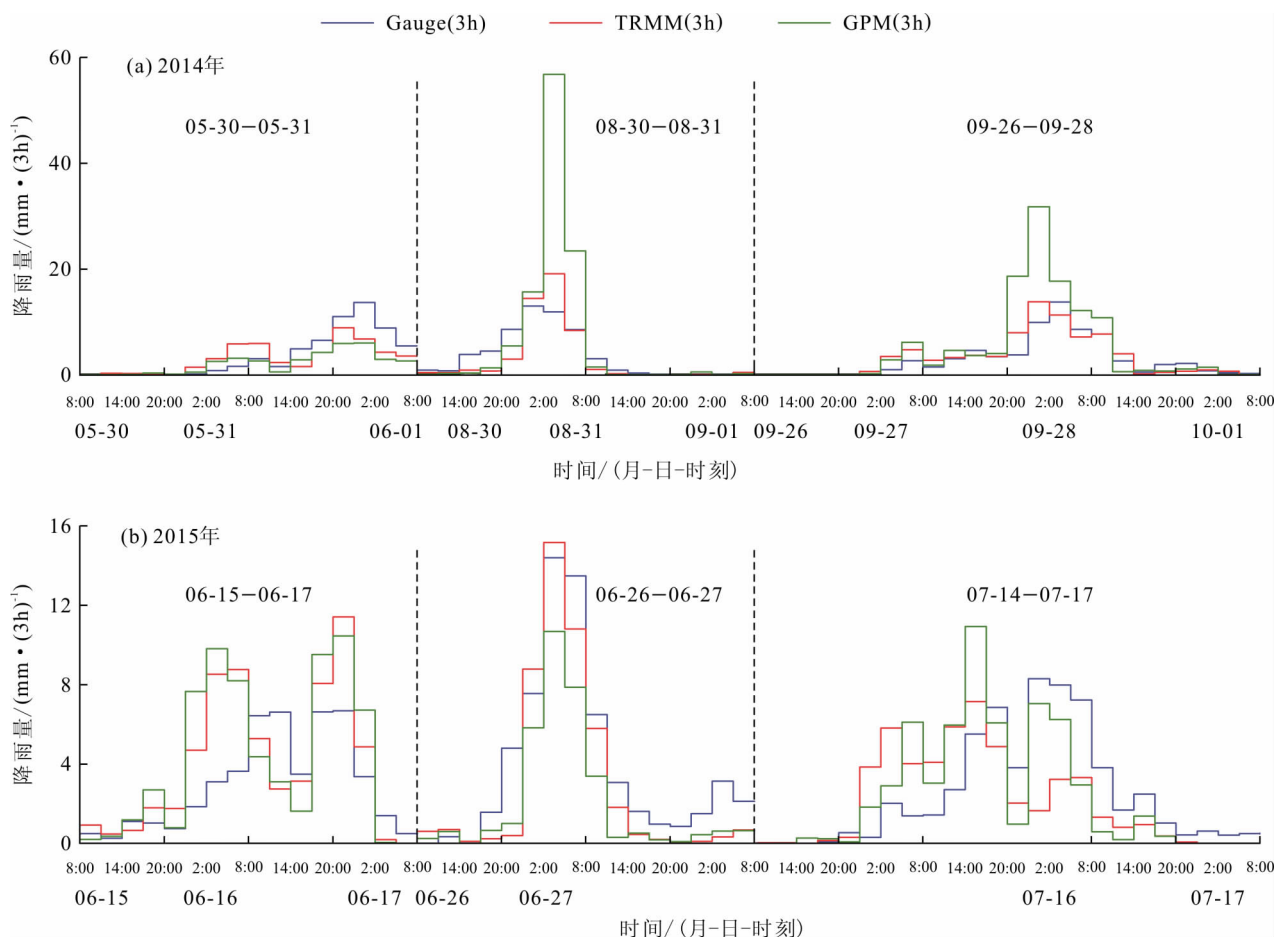


图5 6场典型极端降水3h TRMM/GPM监测值与实测降水对比

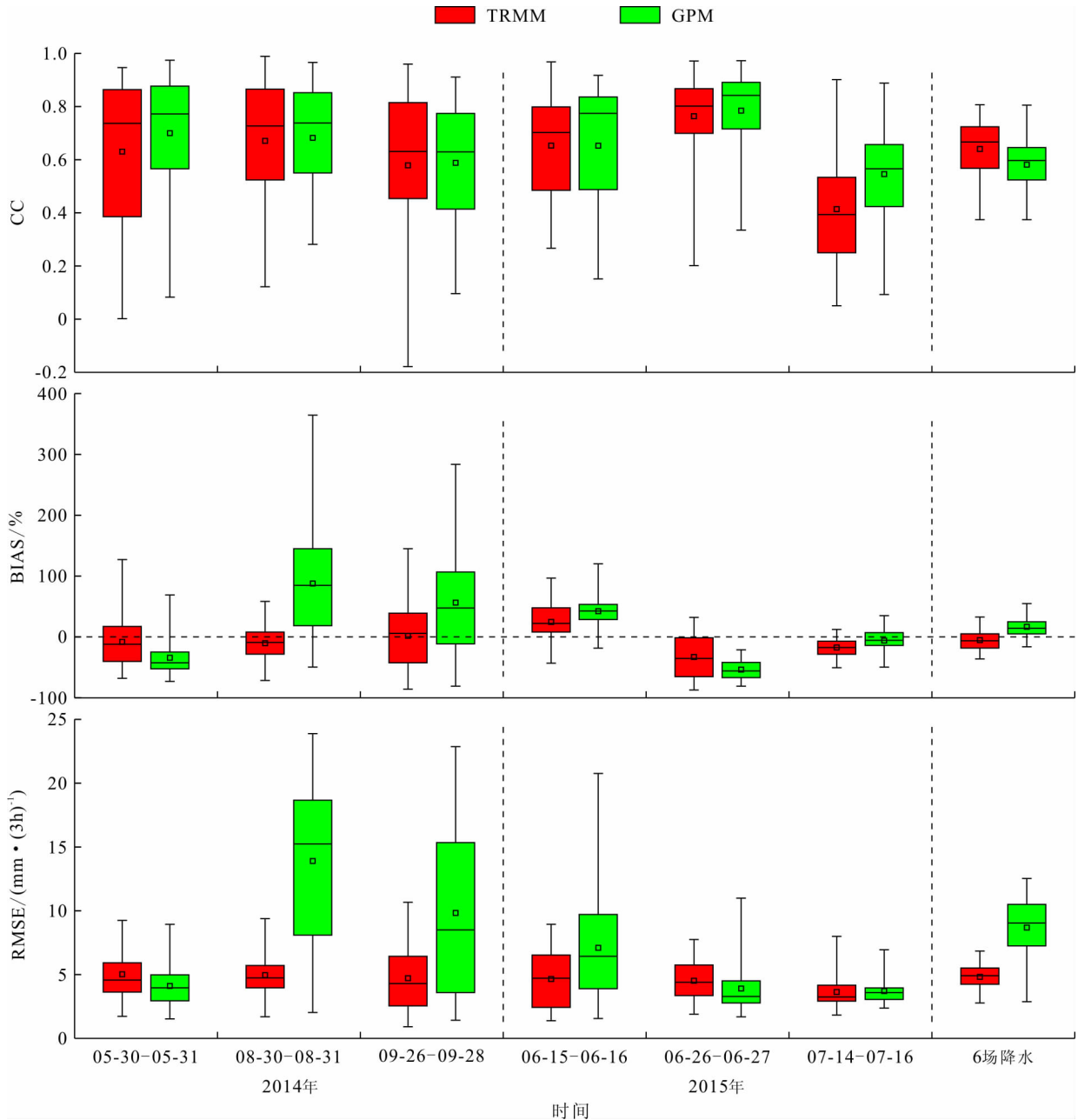


图6 TRMM/GPM 在 6 场典型极端降水中的评价指标分析

5 结 论

本文利用淮河流域上游区 2014 年 4 月 - 2015 年 12 月实测网格降水数据,在逐日和小时尺度上对 TRMM 和 GPM 卫星降水数据进行了精度检验,得到以下结论:

(1)在逐日尺度上,对于流域平均降水,GPM 与实测降水的相关系数 CC 略优于 TRMM,误差略大于 TRMM。在降水事件的探测能力方面,GPM 与实测降水的一致性较好,命中率 POD 、误报率 FAR 、成功系数 CSI 均显著优于 TRMM 产品。

(2)在空间分布上,对于不同的降水类型,相对于 TRMM 产品,GPM 在小雨和大雨降水事件中与实测降水的相关性表现较优,且南部的相关系数高于北部,命中率也优于 TRMM。

(3)但在小时尺度上,TRMM 对研究区 6 场极端降水的监测能力较好且比较稳定,GPM 对不同的极端降水事件监测能力不一,仅少数场次效果优于 TRMM 降水观测,可靠性相对较低,作为新兴的、更高时空分辨率的卫星产品,GPM 在极端降水小时尺度上的监测还有待进一步加强。

参考文献:

- [1] TANG Guoqiang, MA Yingzhao, LONG Di, et al. Evaluation of GPM Day - 1 IMERG and TMPA Version - 7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 152 - 167.
- [2] LI Zhe, YANG Dawen, HONG Yang. Multi - scale evaluation of high - resolution multi - sensor blended global precipitation products over the Yangtze River[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 500: 157 - 169.
- [3] 唐国强, 李哲, 薛显武, 等. 赣江流域 TRMM 遥感降水对地面站点观测的可替代性[J]. *水科学进展*, 2015, 26(3): 340 - 346.
- [4] 袁金国, 牛铮, 龙丽民. TRMM 卫星和全球降雨观测计划 GPM 及其应用[J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(9): 1754 - 1757.
- [5] CHEN Sheng, HONG Yang, CAO Qing, et al. Similarity and difference of the two successive V6 and V7 TRMM multisatellite precipitation analysis performance over China[J]. *Journal of Geophysical Research - atmospheres*, 2013, 118(23): 13060 - 13074.
- [6] PRAKASH S, MITRA A K, PAI D S, et al. From TRMM to GPM: How well can heavy rainfall be detected from space? [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 88: 1 - 7.
- [7] GUO Hao, CHEN Sheng, BAO Anming, et al. Early assessment of integrated multi - satellite retrievals for global precipitation measurement over China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 176 - 177: 121 - 133.
- [8] TANG Guoqiang, ZENG Ziyue, LONG Di, et al. Statistical and hydrological comparisons between TRMM and GPM Level - 3 Products over a midlatitude basin: Is Day - 1 IMERG a good successor for TMPA 3B42V7? [J]. *Journal of Hydro - meteorology*, 2015, 17(1): 121 - 137.
- [9] KUBOTA T, YOSHIDA N, URITA S, et al. Evaluation of precipitation estimates by at - launch codes of GPM/DPR algorithms using synthetic data from TRMM/PR observations[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2014, 7(9): 3931 - 3944.
- [10] 冯海涛, 于国荣, 杨具瑞. 基于 TRMM 3B43 V7 数据的云南降水与干旱监测及精度评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(4): 89 - 96.
- [11] YONG Bin, CHEN Bo, GOURLEY J J, et al. Intercomparison of the Version - 6 and Version - 7 TMPA precipitation products over high and low latitudes basins with independent gauge networks: Is the newer version better in both real - time and post - real - time analysis for water resources and hydrologic extremes? [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 508(2): 77 - 87.
- [12] 刘少华, 严登华, 王浩, 等. 中国大陆流域分区 TRMM 降水质量评价[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5): 639 - 651.
- [13] SHEN Yan, FENG Manong, ZHANG Hongzheng, et al. Interpolation methods of China daily precipitation data[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, 21(3): 279 - 286.
- [14] YONG Bin, REN Liliang, HONG Yang, et al. Hydrologic evaluation of multisatellite precipitation analysis standard precipitation products in basins beyond its inclined latitude band: A case study in Laohahe, China[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(7): 759 - 768.
- [15] 刘元波, 傅巧妮, 宋平, 等. 卫星遥感反演降水研究综述[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1162 - 1172.
- [16] GAO Jinyu, TANG Guoqiang, HONG Yang, et al. Similarities and improvements of GPM dual - frequency precipitation radar (DPR) upon TRMM precipitation radar (PR) in global precipitation rate estimation, type classification and vertical profiling[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(11): 1142.
- [17] 卢美圻. GPM/DPR 星载双频雷达探测降水的敏感性与差异性分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [18] 廖移山, 汪小康, 邓雯, 等. 2014 年 4 - 10 月我国主要暴雨天气过程简述[J]. *暴雨灾害*, 2015, 34(1): 88 - 96.