

# Hydrological Simulation Capability of TRMM Satellite Precipitation Data in Xixian Catchment, Huai River Basin

Pengju Zhang<sup>1</sup>, Shanhu Jiang<sup>1,2</sup>, Hongxin Chen<sup>1</sup>, Min Zhao<sup>1</sup>, Minjuan Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu  
Email: hik0216@hhu.edu.cn

Received: Mar. 25<sup>th</sup>, 2017; accepted: Apr. 11<sup>th</sup>, 2017; published: Apr. 14<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

Satellite precipitation products with high temporal-spatial resolution provide strong data support for modern hydrological simulation and forecast. Combining with the ground observation data, this study aims to evaluate the accuracy and hydrological simulation capability of the latest Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite precipitation product (TRMM 3B42RT and 3B42V7) in mid-latitude Xixian catchment, Huai River basin. The Gridded Xinanjiang model was used for streamflow simulation. The results show that, TRMM satellite precipitation has different extent overestimation of the benchmark precipitation, with BIAS of 25.25% for 3B42RT and 14.88% for 3B42V7; in the absolute error sense, TRMM satellite precipitation has large values; for the correlation sense, TRMM satellite precipitation has good values more than 0.75. At the monthly time scale, the precision of the TRMM satellite precipitation has greatly been improved in terms of declined ABIAS values and increased CC values. With the model parameters first benchmarked by the rain gauge data, the behavior of the streamflow simulation from TRMM 3B42RT is poor, but it still could characterize the diurnal variation of the streamflow. When the model parameters were recalibrated by each individual satellite data, the performance of TRMM 3B42RT was significantly improved. Compared with the TRMM 3B42RT, the TRMM 3B42V7 has good streamflow simulations in both parameter calibration scenes, with NSCE values more than 0.62, BIAS values between  $\pm 10.48\%$  and CC values more than 0.79, which demonstrated good hydrological simulation utility of the TRMM data. The present work will hopefully be a reference for future hydrological utilizations of TRMM and GPM (Global Precipitation Measurement) satellite precipitation products.

## Keywords

TRMM Satellite Precipitation, Precision Evaluation, Hydrological Simulation, Xinanjiang Model

# TRMM卫星降水数据在淮河息县流域径流模拟的适用性

张鹏举<sup>1</sup>, 江善虎<sup>1,2</sup>, 陈宏新<sup>1</sup>, 赵敏<sup>1</sup>, 李敏娟<sup>1</sup>

作者简介: 张鹏举(1995-), 男, 本科生, 主要从事水文过程模拟方面研究。

<sup>1</sup>河海大学, 水文水资源学院, 江苏 南京

<sup>2</sup>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

Email: hik0216@hhu.edu.cn

收稿日期: 2017年3月25日; 录用日期: 2017年4月11日; 发布日期: 2017年4月14日

## 摘要

卫星遥感降水由于高时空分辨率优势为现代水文模拟预报提供了有力的数据支持。结合地面观测数据, 在中纬度淮河息县流域定量评估TRMM卫星降水(3B42RT和3B42V7)的精度, 并采用栅格新安江模型进行卫星数据的径流模拟适用性分析。结果表明: 3B42RT与3B42V7存在系统偏差, 分别高估流域降水量25.25%与14.88%, ABIAS分别达到70.57%和67.61%, 但二者与地面站点数据相关性较好, CC值达到了0.75以上; 月尺度上精度有明显提高, ABIAS大幅度下降, CC值有较大提高, 3B42V7的CC值为0.97。径流模拟方面, 对卫星数据设计两种不同模拟情景, 情景I利用雨量站点观测数据率定模型参数, 情景II利用卫星降水数据重新率定模型参数, 3B42RT在情景II下模拟结果较情景I下精度有所提高, 但仍不及3B42V7模拟结果; 3B42V7在情景I、II下都有较好的径流模拟表现, NSCE达到0.62以上, BIAS在 $\pm 10.48\%$ 之间, CC达到0.79以上, 表明TRMM卫星降水具有较好的径流模拟适用性。本研究可为TRMM和GPM卫星降水数据的水文应用提供参考借鉴。

## 关键词

TRMM卫星降水, 精度评估, 径流模拟, 新安江模型

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

卫星遥感降水在 21 世纪有着广阔的应用前景, 其高时间分辨率和更大的空间覆盖范围对比传统地面观测有着极大的优势, 能在一定程度上弥补其它来源降水数据的缺陷, 为水文气象实际应用及相关研究提供有力的数据支持[1] [2] [3]。相比较众多的卫星降水产品, 美国和日本联合执行的热带降雨观测计划产品(Tropical Rainfall Measurement mission, TRMM)取得了突破性成功, 产生自 TRMM 以来“最好”的卫星降水产品, 开创了全球降水监测的新时代[4]。TRMM 卫星于 1997 年 11 月 28 日发射升空, 2015 年 4 月由于燃料耗尽停止运行, 卫星运行以来积累了海量覆盖陆地和海洋的高时空分辨率降水数据。作为 TRMM 卫星后续计划的 GPM (Global Precipitation Measurement)卫星已于 2014 年 2 月发射, GPM 不但将延续 TRMM 的星基降水传统, 还将更大程度提高其时空分辨率、观测精度和准确性, 进一步提升卫星降水在水文气象等领域的应用能力[5]。目前由于 GPM 卫星降水的时间序列较短(2014 年 2 月至今), TRMM 卫星降水仍具有不可替代的研究意义和应用价值。此前, 国内很多学者已经研究了 TRMM 卫星降水数据在不同流域内的精度与误差特征, 如杨秀芹[6]、胡庆芳[7]、李剑锋[8]、费明哲[9]分别研究了 TRMM 卫星降水在淮河流域、赣江流域、老哈河流域和鄱阳湖流域的精度与误差特征, 发现 TRMM 卫星降水在我国不同流域具有一定的精度。关于 TRMM 卫星降水的水文模拟预报效用, 我国学者也在国内部分流域进行了实例研究, 如杨传国[10]、Yong [11]、江善虎[12]、唐国强[13]、王佳伶[14]分别利用 TRMM 卫星降水在淮河流域、老哈河流域、涿水流域、赣江流域和湘江流域进行了径流模拟, 发现 TRMM

卫星降水具有一定的水文模拟效用，但在不同流域的模拟精度存在一定差异。

本文以淮河息县水文站以上集水流域为研究区，基于地面雨量站点观测数据评估不同时间尺度最新一代 TRMM 卫星降水(3B42V7 和 3B42RT)的精度；并采用栅格新安江模型进行径流过程模拟，探讨 TRMM 卫星降水在现代水文模拟预报中的应用能力。

## 2. 研究区域与数据

### 2.1. 研究区域

选择淮河上游息县水文站以上集水流域作为研究区，流域范围为东经  $113^{\circ}15' \sim 114^{\circ}46'$ ，北纬  $31^{\circ}31' \sim 32^{\circ}43'$ ，流域面积为  $10,190 \text{ km}^2$  (图 1)。流域地处我国中纬度湿润气候与半干旱气候过渡带，多年平均降水量为  $800 \sim 1400 \text{ mm}$ ，多年平均径流深为  $371 \text{ mm}$ ，多年平均水面蒸发量为  $800 \sim 1000 \text{ mm}$ 。流域内土地利用方式以旱地、林地和水田为主。

### 2.2. 研究数据

收集息县流域 22 个雨量站和 1 个流量站(息县站)2000 年 3 月~2013 年 12 月的逐日降水和流量观测数据。采用临近三站点反距离加权(Inverse Distance Weighted, IDW)将点雨量插值到流域面分布。流域潜在蒸散发采用世界粮农组织(Food and Agriculture Organization, FAO)1998 年修订的 Penman-Monteith 模型[15]计算，模型所需要的日平均气温、日最高气温、日最低气温、日照时数等气象观测资料来源于流域内信阳气象站。流域地形资料采用美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)的全球 30"数字高程模型数据(Digital Elevation Model, DEM)。应用 ArcGIS 提取构建分布式水文模型所需的基本空间信息，包括流域边界、栅格水流流向、各栅格至流域出口断面的河长等。

采用的卫星降水数据为 TRMM 多卫星降水分析产品最新一代降水产品 TRMM 3B42RT 和 TRMM 3B42V7，它是 TRMM 3B42V6 数据的升级版本[16]。TRMM 3B42RT 为准实时卫星降水数据，在降水发生后的 6~9 h 可获取；TRMM 3B42V7 为经过地面站点月尺度偏差校正的研究型数据，在降水发生后一个月的第 10~15 d 可获取。数据可由美国 NASA(National Aeronautics and Space Administration)的 Goddard 数据分发中心免费下载。数据空间分辨率均为  $0.25^{\circ}$ ，时间步长为 3 h，将卫星数据在日、月尺度上进行累积，分别得到日降水和月降水。

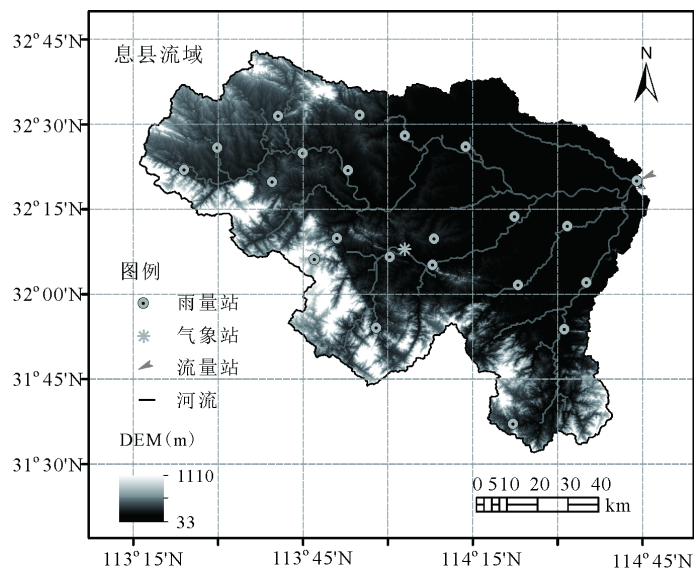


Figure 1. Location of Xixian Basin and Distribution of stations

图 1. 息县流域位置及站点分布图

### 3. 模型与方法

#### 3.1. 水文模型

采用栅格新安江模型进行流域径流过程模拟，模型基于蓄满产流计算每个栅格单元的总产流量；采用具有底孔和侧孔的溢流型水库将总径流划分为地表径流、壤中流和地下径流；采用线性水库进行各种径流成分的坡地汇流演算；采用马斯京根分段连续演算进行河道汇流演算[12] [17]。模型共有 16 个参数，根据流域观测径流资料进行率定，率定的目标是使根据参数值计算的出口断面流量与实测流量拟合最优，研究采用单纯多边形进化算法(SCE-UA)对模型参数进行优选[18]。

#### 3.2. 模拟情景

选用 2000 年 3 月~2006 年 12 月为模型率定期，2007 年 1 月~2013 年 12 月为模型验证期。为了探讨卫星降水在无/缺资料流域的径流模拟效用，论文采用两种情境(I,II)分别进行在有地面降水站点资料和无地面降水站点资料或地面降雨站点资料不足情况的径流模拟[13]。情景 I 利用地面雨量站点观测降水来率定模型参数，然后固定率定好的模型参数来进行 TRMM 卫星降水的水文过程模拟效用评估。情景 II 选用 3B42RT 和 3B42V7 卫星降水分别重新率定模型参数，然后使用卫星降水率定的模型参数进行水文过程模拟，评价 TRMM 卫星降水数据模拟径流的精度。

#### 3.3. 评估指标

采用偏差(BIAS)、绝对偏差(Absolute Bias, ABIAS)和相关系数(Correlation Coefficient, CC)反映 TRMM 卫星数据的精度，其中 BIAS 反映卫星数据对基准数据的偏差情况，ABIAS 反映卫星数据对基准数据的绝对偏差情况，CC 反映卫星数据与基准数据的相关性[12]。采用探测率(Probability of detection, PD)、击中率(Frequency of hit, FH)和 Heidke 技巧评分指数(Heidke's skill score, SH)反映 TRMM 卫星数据判断降雨事件是否发生的准确性。PD 越高，卫星数据对日降水事件的漏报程度越小；FH 越高，空报程度越小；SH 则综合表达了卫星数据对降水事件是否发生的估计能力[7]。采用 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSCE)、BIAS、CC 和均方根误差(Root mean square error, RMSE)来评价模型模拟径流的精度，其中 NSCE 系数表征模拟径流和观测径流的吻合程度，RMSE 表征模拟径流和观测径流的误差大小[12]。

## 4. 结果分析

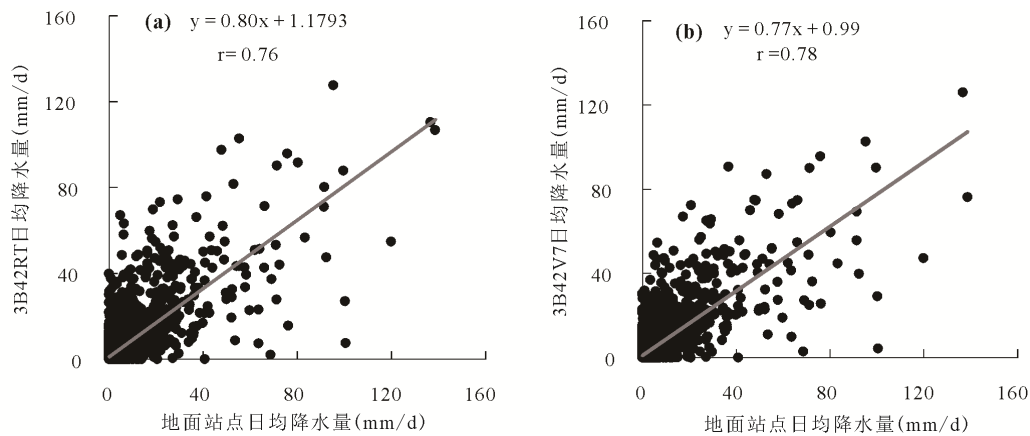
### 4.1. TRMM 卫星降水的精度评估

表 1 为 TRMM 降水数据的精度统计指标，图 2 展示了日尺度上地面站点数据与卫星数据的散点相关情况。如表 1 所示，在日尺度上，3B42RT 的 BIAS 值达到了 25.25%，3B42V7 的 BIAS 值为 14.88%，说明在系统偏差方面，TRMM 卫星降水数据都具有一定的误差，同时高估了息县流域降水量，其中准实时卫星降水数据 3B42RT 的误差尤为明显。在绝对偏差意义上，3B42RT 的 ABIAS 值为 70.57%，3B42V7 的 ABIAS 值为 67.6%，两者都具有较大的绝对偏差。相关性方面，3B42RT 的 CC 值为 0.76，3B42V7 的 CC 值为 0.78，二者都表现出与地面站点数据较好的相关性。在降雨事件探测率上，3B42V7 与 3B42RT 有相同的 FH 值 0.81，而 3B42V7 的 PD 和 SH 分别为 0.62 与 0.48，略高于 3B42RT 的 0.55 和 0.38；总体上二者对于降雨发生事件都能有较好的反映。

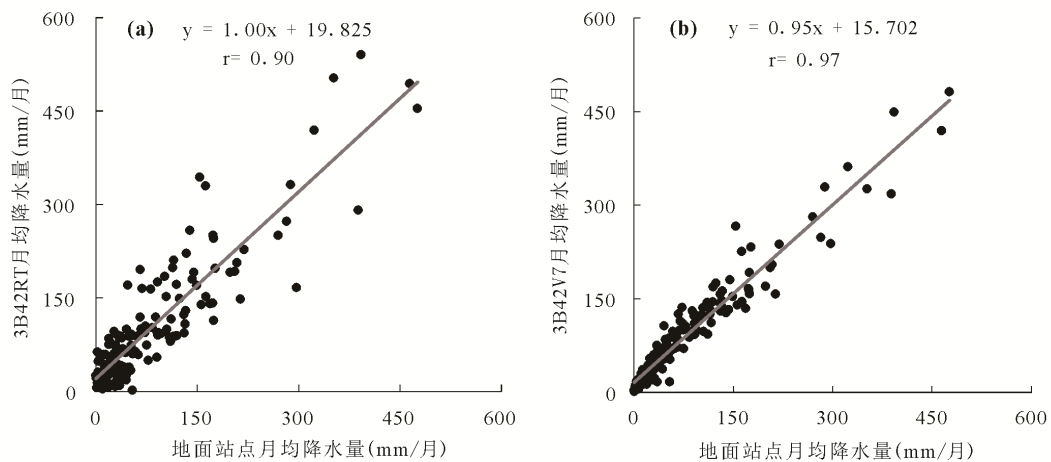
在月尺度方面，卫星数据在绝对值偏差和相关性方面都有明显的改善。绝对偏差方面，3B42RT 与 3B42V7 的 ABIAS 值分别降低了 28.23%与 43.43%；相关性方面，3B42RT 与 3B42V7 的 CC 值分别达到了 0.90 与 0.97，图 3 直观的表示了月尺度上卫星降水与地面站点数据的高度相关性。总体来说，TRMM 卫星数据在月尺度上有着较高的准确性，经过偏差校正的研究型数据 3B42V7 明显优于准实时数据 3B42RT。比较日尺度和月尺度的

**Table 1.** Statistical measures of TRMM precipitation estimates at daily and monthly time scales  
**表 1.** TRMM 卫星降水数据日尺度和月尺度精度统计指标

时间尺度		数据吻合			事件频率		
		BIAS (%)	ABIAS (%)	CC	PD	FH	SH
日尺度	3B42RT	25.25	70.57	0.76	0.55	0.81	0.38
	3B42V7	14.88	67.61	0.78	0.62	0.81	0.48
月尺度	3B42RT	25.25	42.34	0.90	-	-	-
	3B42V7	14.88	24.18	0.97	-	-	-



**Figure 2.** Scatterplots of daily precipitation comparison between satellite estimates and rain gauge observations  
**图 2.** TRMM 卫星降水与地面观测数据日尺度散点图



**Figure 3.** Scatterplots of monthly precipitation comparison between satellite estimates and rain gauge observations  
**图 3.** TRMM 卫星降水与地面观测数据月尺度散点图

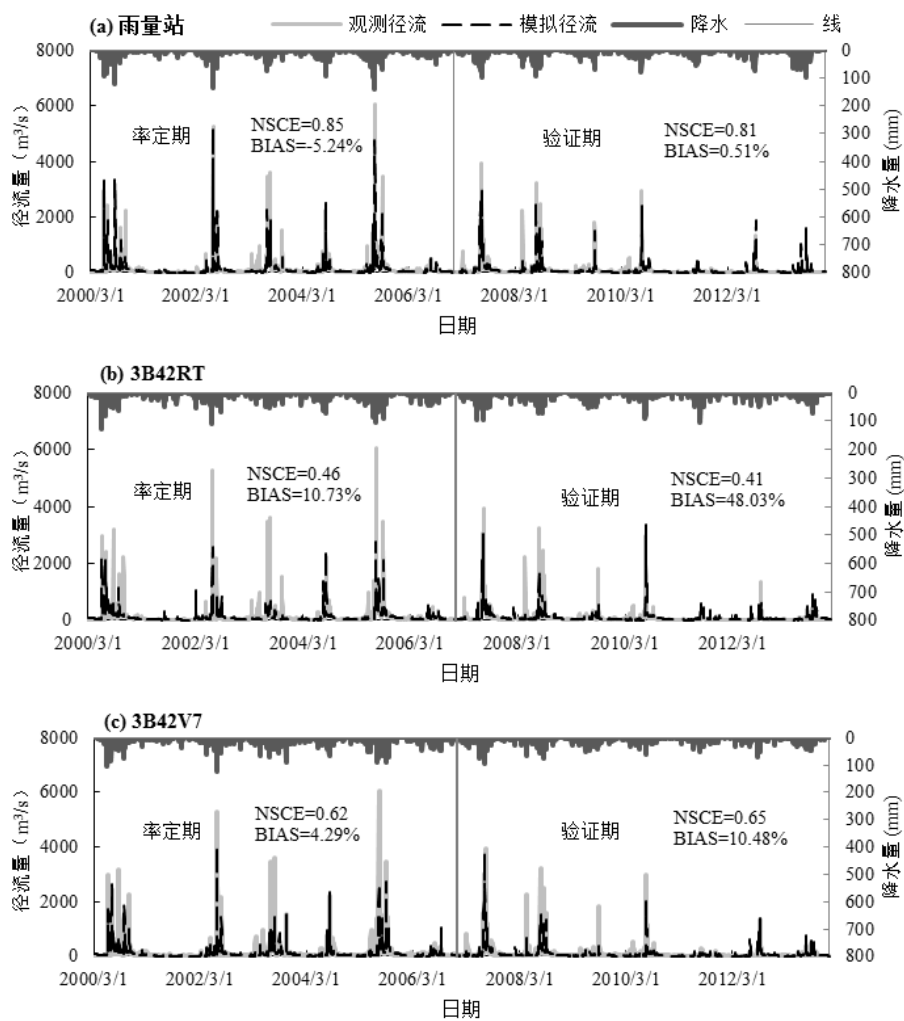
BIAS 与 ABIAS 可以发现，TRMM 算法中全球地面资料月尺度偏差校正能有效地保证 TRMM 日降水的 BIAS 接近于 0，但其没有削减日降水的 ABIAS 数值。

#### 4.2. TRMM 卫星降水的水文模拟效用评估

表 2 给出了不同情景下(I,II)TRMM 卫星降水数据在率定期和验证期模拟径流的精度评估指标。分析 3B42RT

**Table 2.** Comparison of daily observed and simulated streamflow under different calibration scenarios  
**表 2.** 不同率定情景下日观测与模拟径流的比较

研究对象	率定期(2000~2006)				验证期(2007~2013)			
	NSCE	BIAS (%)	CC	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	NSCE	BIAS (%)	CC	RMSE (m <sup>3</sup> /s)
地面站点	0.85	-5.24	0.92	101.23	0.81	0.51	0.90	118.69
3B42RT (I)	0.46	10.73	0.71	188.32	0.41	48.03	0.77	212.44
3B42RT (II)	0.51	-7.34	0.71	180.45	0.58	19.52	0.78	177.85
3B42V7 (I)	0.62	4.29	0.79	158.10	0.65	10.48	0.81	162.63
3B42V7 (II)	0.64	-5.64	0.80	155.00	0.64	-3.29	0.80	166.03



**Figure 4.** The Xinanjiang simulated daily streamflow based on TRMM data at case I  
**图 4.** 情景 I 下基于地面观测降水和 TRMM 卫星降水的新安江模型径流模拟结果

卫星数据在情景 I、II 下的径流模拟结果，发现在情景 I，验证期的相关系数虽然高于率定期，由 0.71 提高到了 0.77，但是验证期的偏差却明显增大，BIAS 值由 10.73% 增加到了 48.03%。这说明，在情景 I 的情况下，3B42RT 卫星降水模拟径流虽然有着较好的相关性和峰值再现时间，但是在验证期其偏差 BIAS 过于偏大，影响了径流

模拟的准确性,这可能受 3B42RT 降雨误差和模型参数影响造成。在情景 II 中,模型的参数经过重新率定,不论是率定期还是验证期,3B42RT 卫星降水模拟径流的各方面指标(NSCE, BIAS, CC, RMSE)较情景 I 都有所提高,尤其在验证期 NSCE、BIAS 和 RMSE 值得到显著改善,其中 NSCE 增加到 0.58, BIAS 下降到 19.52%, RMSE 下降到 177.85 m<sup>3</sup>/s。这说明对于偏差较大的 3B42RT 卫星数据,经过情景 II 下模型参数的重新率定,能够一定程度提高模拟径流的精度。分析 3B42V7 卫星数据在情景 I, II 下模拟结果发现:相对于 3B42RT 模拟数据,3B42V7 在不同情景下模拟径流的精度有明显提高,NSCE 达到 0.62 以上,BIAS 在±10.48%之间,CC 提高到 0.79 以上, RMSE 也有明显的减小,说明 3B42V7 较 3B42RT 具有更好的水文模拟效用。在不同模拟情景方面,情景 I 与 II 下 3B42V7 模拟径流的精度相差不大,但整体上情景 II 的模拟结果略优于情景 I。图 4 为情景 I 下基于地面雨量站点和 TRMM 卫星降水数据的新安江模型径流模拟结果,自上而下分别是地面雨量站模拟径流,3B42RT 数据模拟径流和 3B42V7 数据模拟径流。可以发现,TRMM 卫星降水(特别是 3B42V7 数据)模拟结果与实际径流量在时间序列上有着很好的吻合,能较好再现峰值的出现时间,具有一定水文模拟应用能力。

总体来说,运用 TRMM 卫星降水数据替代地面站点观测数据模拟径流具有一定的可行性,其中 3B42V7 模拟结果有着更高的精确性和更好的适用性。而 GPM 作为 TRMM 的后续计划,将提供时空分辨率更高、观测精度更为准确的卫星降水产品,在现代水文模拟预报领域将起到更加重要的作用[5]。

## 5. 结论

本文评估了最新的 TRMM 卫星降水(3B42RT, 3B42V7)在淮河息县流域的精度及水文模拟效用,发现日尺度上 TRMM 卫星降水与地面站点数据具有较好的相关性,但存在一定的系统偏差,3B42RT 与 3B42V7 分别高估流域降水量 25.25%和 14.88%, ABIAS 分别达到 70.57%和 67.61%; TRMM 卫星降水能较好探测降水事件的发生情况,探测率在 0.55 以上,探测降水事件发生的可信度达到 0.81。月尺度上,TRMM 卫星降水精度有较大提高,ABIAS 大幅度下降,CC 值有较大提高,3B42V7 的 CC 为 0.97。径流模拟方面,3B42RT 在情景 II 下模拟结果较好,但仍不及 3B42V7 模拟结果;3B42V7 在情景 I, II 下都有较好的径流模拟表现,NSCE 达到 0.62 以上,BIAS 在 ±10.48%之间,CC 达到 0.79 以上,表明 TRMM 卫星降水具有替代地面站点数据模拟径流的可行性,随着更高时空分辨率、更高精度的 GPM 卫星降水的出现,多卫星降水在现代水文模拟预报领域将具有更广阔的应用前景。

## 基金项目

国家自然科学基金(41501017); 大学生创新训练计划项目(2015102941012)。

## 参考文献 (References)

- [1] 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, 2007(26): 1162-1172.  
LIU Yuanbo, FU Qiaoni, SONG Ping, et al. Satellite retrieval of precipitation: An overview. *Advances in Earth Science*, 2007(26): 1162-1172. (in Chinese)
- [2] KIDD, C., HUFFMAN, G. Global precipitation measurement. *Meteorological Applications*, 2011(18): 334-353.  
<https://doi.org/10.1002/met.284>
- [3] JIANG, S. H., REN, L. L., YONG, B., et al. Evaluation of high-resolution satellite precipitation products with surface rain gauge observations from Laohahe Basin in northern China. *Water Science and Engineering*, 2010, 3(4): 405-417.
- [4] JIANG S. H., REN L. L., HONG Y., et al. Comprehensive evaluation of multi-satellite precipitation products with a dense rain gauge network and optimally merging their simulated hydrological flows using the Bayesian model averaging method. *Journal of Hydrology*, 2012(452-453): 213-225. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.055>
- [5] 唐国强,万玮,曾子悦,等. 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, 2015, 30(4): 607-615.  
TANG Guoqiang, WAN Wei, ZENG Ziyue, et al. An overview of the Global Precipitation Measurement (GPM) mission and its latest development. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(4): 607-615. (in Chinese)
- [6] 杨秀芹,耿文杰. 淮河流域 TRMM 多源卫星降水产品精度评估[J]. 水电能源科学, 2016, 34(7): 1-5.

- YANG Xiuqin, GENG Wenjie. Accuracy evaluation of TRMM-based multi-satellite precipitation in Huai River Basin. *Water Resources and Power*, 2016, 34(7): 1-5. (in Chinese)
- [7] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. 赣江流域 TRMM 3B42V6 的误差特征与成因解释[J]. *水科学进展*, 2013, 24(6): 765-800.  
HU Qingfang, YANG Dawen, WANG Yintang, et al. Validation and error interpretation for daily TRMM 3B42V6 rainfall over the Ganjiang River basin in China. *Advances in Water Science*, 2013, 24(6): 1-9. (in Chinese)
- [8] 李剑锋, 余文婧, 江善虎, 等. TRMM 卫星降水数据在老哈河流域的精度评估[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(5): 89-92.  
LI Jianfeng, SHE Wenjing, JIANG Shanhu, et al. Evaluation of accuracy of Laohariver by data of TRMM satellite precipitation. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2014, 25(5): 89-92. (in Chinese)
- [9] 费明哲, 张增信, 原立峰, 等. TRMM 降水产品在鄱阳湖流域的精度评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(8): 1322-1330.  
FEI Mingzhe, ZHANG Zengxin, YUAN Lifeng, et al. Accuracy assessment for TRMM in the Poyang Lake Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(8): 1322-1330. (in Chinese)
- [10] 杨传国, 余钟波, 林朝晖, 等. 基于 TRMM 卫星雷达降雨的流域陆面水文过程[J]. *水科学进展*, 2009, 20(4): 461-466.  
YANG Chuanguo, YU Zhongbo, LIN Zhaohui, et al. Study on watershed hydrologic processes using TRMM satellite precipitation radar products. *Advances in Water Science*, 2009, 20(4): 461-466. (in Chinese)
- [11] YONG, B., REN, L. L., HONG, Y., et al. Hydrologic evaluation of multisatellite precipitation analysis standard precipitation products in basins beyond its bnclined latitude band: A case study in Laohahe Basin, China. *Water Resources Research*, 2010(46): W07542. <https://doi.org/10.1029/2009WR008965>
- [12] 江善虎, 任立良, 雍斌, 等. TRMM 卫星降水数据在洮水流域径流模拟中的应用[J]. *水科学进展*, 2014, 25(5): 641-649.  
JIANG Shanhu, REN Liliang, YONG Bin, et al. Hydrological evaluation of the TRMM multi-satellite precipitation estimates over the Mishui basin. *Advances in Water Science*, 2014, 25(5): 641-649. (in Chinese)
- [13] 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.  
TANG Guoqiang, LI Zhe, XUE Xianwu, et al. A study of substitutability of TRMM remote sensing precipitation for gauge-based observation in Ganjiang River basin. *Advances in Water Science*, 2015, 26(3): 340-346. (in Chinese)
- [14] 王佳伶, 陈华, 许崇育, 等. TRMM 卫星降水数据的精度及径流模拟评估[J]. *水资源研究*, 2016, 5(5): 434-445.  
WANG Jialiang, CHEN Hua, XU Chongyu, et al. Evaluation of accuracy and streamflow simulation of TRMM satellite precipitation data. *Journal of Water Resources Research*, 2016, 5(5): 434-445. (in Chinese)
- [15] Food and Agriculture Organization of the United Nation. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements*. Italy: Food & Agriculture Org, 1998.
- [16] HUFFMAN, G. J., BOLVIN, D. T. Real-time TRMM multi-satellite precipitation analysis data set documentation. 2013. [ftp://meso-a.gsfc.nasa.gov/pub/trmmdocs/rt/3B4XRT\\_doc\\_V7.pdf](ftp://meso-a.gsfc.nasa.gov/pub/trmmdocs/rt/3B4XRT_doc_V7.pdf)
- [17] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.  
ZHAO Ren-Jun. *Watershed hydrological simulation—Xinjiang Model and Shanbei Model*. Beijing: Hydraulic and Electric Press, 1984. (in Chinese)
- [18] DUAN, Q., SOROOSHIAN, S. and GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 1992, 28(4): 1015-1031. <https://doi.org/10.1029/91WR02985>