

# Evaluation of Accuracy and Streamflow Simulation of Satellite Precipitation on Nu Basin

Xing Zhou<sup>1,2</sup>, Guangheng Ni<sup>3</sup>, Zhiyu Zhong<sup>4</sup>, Shenglian Guo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Changjiang Institute of Survey, Planning, Design, and Research, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing

<sup>4</sup>Changjiang Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, Wuhan Hubei

Email: zhouxing10@gmail.com

Received: Feb. 13<sup>th</sup>, 2019; accepted: Mar. 25<sup>th</sup>, 2019; published: Apr. 12<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

High temporal-spatial resolution satellite based precipitation products has been extensively used in ungauged or sparsely gauged areas to bridge the gap between the need for precipitation estimates and the scarcity in gauge observations. The accuracy of satellite precipitation products which restricts its application has become a focus. In this study, three satellite precipitation products (*i.e.*, TRMM 3B42 V7 short for TRMM, TRMM 3B42 RT V7 short for RT, CMORPH short for CMO) were evaluated at different spatial scales via comparing with rain gauge precipitation observations in Nu River basin of Yunnan part, a typical mountainous area with sparse gauge observations. These four rain products were then adopted to drive the distributed hydrological model (Hydro-Mount) to simulate daily runoff. The results showed that under gauge scale, all three satellite precipitation products had a good correlation with rain gauge precipitation data with the correlation coefficient over 0.65 and probability of detection over 0.71 while on the amount of precipitation, CMO underestimated over 40%, and TRMM underestimated 0.42%, and RT underestimated 9.37%; it had similar but better accuracy results under watershed scale than it did at gauge scale. The TRMM-driven and RT-driven daily streamflow simulation performed litter better relative to gauge-driven streamflow with equivalent but more stable NSE values over the simulation period; the CMO-driven streamflow simulation had poor performance, but after eliminating certain system deviations, it also showed a certain simulation accuracy. The present study will hopefully be a reference for future accuracy correction and hydrological utilizations of satellite-based precipitation products.

## Keywords

Precipitation, TRMM, CMORPH, Accuracy Evaluation, Streamflow Simulation

# 卫星降水在怒江流域的精度及径流模拟评估

周星<sup>1,2</sup>, 倪广恒<sup>3</sup>, 仲志余<sup>4</sup>, 郭生练<sup>2</sup>

作者简介: 周星(1987-), 男, 湖北十堰人, 博士, 主要从事水文水资源方面的研究。

<sup>1</sup>长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉

<sup>2</sup>武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

<sup>3</sup>清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京

<sup>4</sup>水利部长江水利委员会, 湖北 武汉

Email: zhouxing10@gmail.com

收稿日期: 2019年2月13日; 录用日期: 2019年3月25日; 发布日期: 2019年4月12日

## 摘要

高时空分辨率的卫星降水产品弥补了山区流域地面雨量站点布设密度低、空间结构不合理的局限性, 在水文研究及应用上有很大的发展前景, 但是其精度是制约其应用的瓶颈, 也是研究的热点。本文以地面雨量站点观测降水数据为参照, 评估不同尺度下常用三种降水产品TRMM 3b42 V7(简称TRMM)、TRMM 3b42RT V7(简称RT)以及CMORPH(简称CMO), 在典型的少资料山区流域——怒江流域(云南段)的精度, 并进一步评估了不同降水产品驱动水文模型(Hydro-Mount)模拟日径流的效果。研究表明: 站点尺度上三种卫星降水产品与站点数据相关性较好, 相关系数在0.65以上, 降水正确预报率在0.71以上, 但CMO存在超过40%的低估降水, TRMM存在0.42%的低估, RT存在9.37%的低估降水; 流域尺度上卫星降水的精度明显优于点尺度上, 精度趋势和站点尺度一致; TRMM数据和RT数据日径流模拟效果较好, 纳西效率系数(NSE)指标上与雨量站点数据相当, 但表现较雨量站点稳定, CMO数据日径流模拟效果较差, 但在消除一定系统偏差后, 也表现出一定的模拟精度。本研究为TRMM数据的精度订正提供相关思路, 并分析了其在径流模拟应用中的可行性。本研究可为卫星降水数据的精度修正以及区域水文应用提供参考借鉴。

## 关键词

降水数据, TRMM, CMORPH, 精度评估, 径流模拟

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

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

降水是水文循环的主要驱动因子之一, 其高度的时空异质性和对水文要素的时空分配具有重大影响, 也是水文模拟不确定性来源之一。由于布设密度低、空间结构不合理等原因, 传统的地面站观测手段无法精确的刻画山区降水的空间变异, 因此成为山区水文研究的重要制约因素[1] [2] [3]。随着遥感技术及理论的发展, 近些年来卫星在降水观测方面取得了长足的进展, 出现了一大批代表性的高时空分辨率的全球降水产品, 如 GPCP (Global Precipitation Climatology Project) [4]、TRMM (the Tropical Rainfall Measuring Mission) [5]以及 CMORPH (the Climate Prediction Center Morphing Method) [6]等, 这些产品弥补了站点降水数据的局限性。全球范围内对于这些卫星降水产品开展了广泛的精度评价及相关影响因素分析、误差校正、应用效果评价等多方面的研究, 其研究结果既有相似, 也存在相悖的地方。综合现有研究结论表明: 卫星降水产品具有一定的精度, 但是不同产品的精度及其时空分布规律在不同区域、不同尺度、不同数据版本上表现不一, 因此针对特定区域需要具体分析[7] [8] [9] [10] [11]; 在流域水文模拟应用中, 卫星降水能够模拟出径流的主要特征, 具有一定的应用价值, 但是同样精度受到研究区域、尺度和数据版本的影响[12] [13] [14] [15] [16]。此外大部分的研究都针对于雨量资料相

对充足、地势相对平缓的区域开展，对于少资料的山区流域研究还需加强。

怒江流域是一条重要的国际河流，也是对全球气候变化最敏感区域之一，流域的气候水文一直是国际关注热点，然而受地形条件和经济条件限制，流域内气候水文观测稀缺，极大的限制了流域水文气象等方面的研究。本文以怒江流域(云南段)为研究区域，对常用的卫星降水数据(TRMM 和 CMORPH)在本流域的精度进行分析研究，并通过径流模拟验证卫星降水数据的精度和评定卫星降水在此区域水文模拟领域中的应用性，旨在为无/缺资料流域研究提供一定的参考价值。

## 2. 研究区域与数据

### 2.1. 研究区域

怒江 - 萨尔温江是纵贯我国西南和中南半岛的重要国际性河流，发源于青藏高原，流经中国西藏云南后进入缅甸、泰国(图 1)。怒江全流域面积约为 324,000 km<sup>2</sup>，其中中国占比 53%。研究区域选取怒江流域云南段(贡山以南)，面积约为 34,561 km<sup>2</sup>。研究区域以峡谷为主要地貌，地形起伏大，高程从 484 m 变化到 5167 m。流域气候湿润，超过 80%的降水发生在 5~10 月，年均降水量在 800~1200 mm 之间。流域人类活动较弱，植被覆盖好，以森林为主。

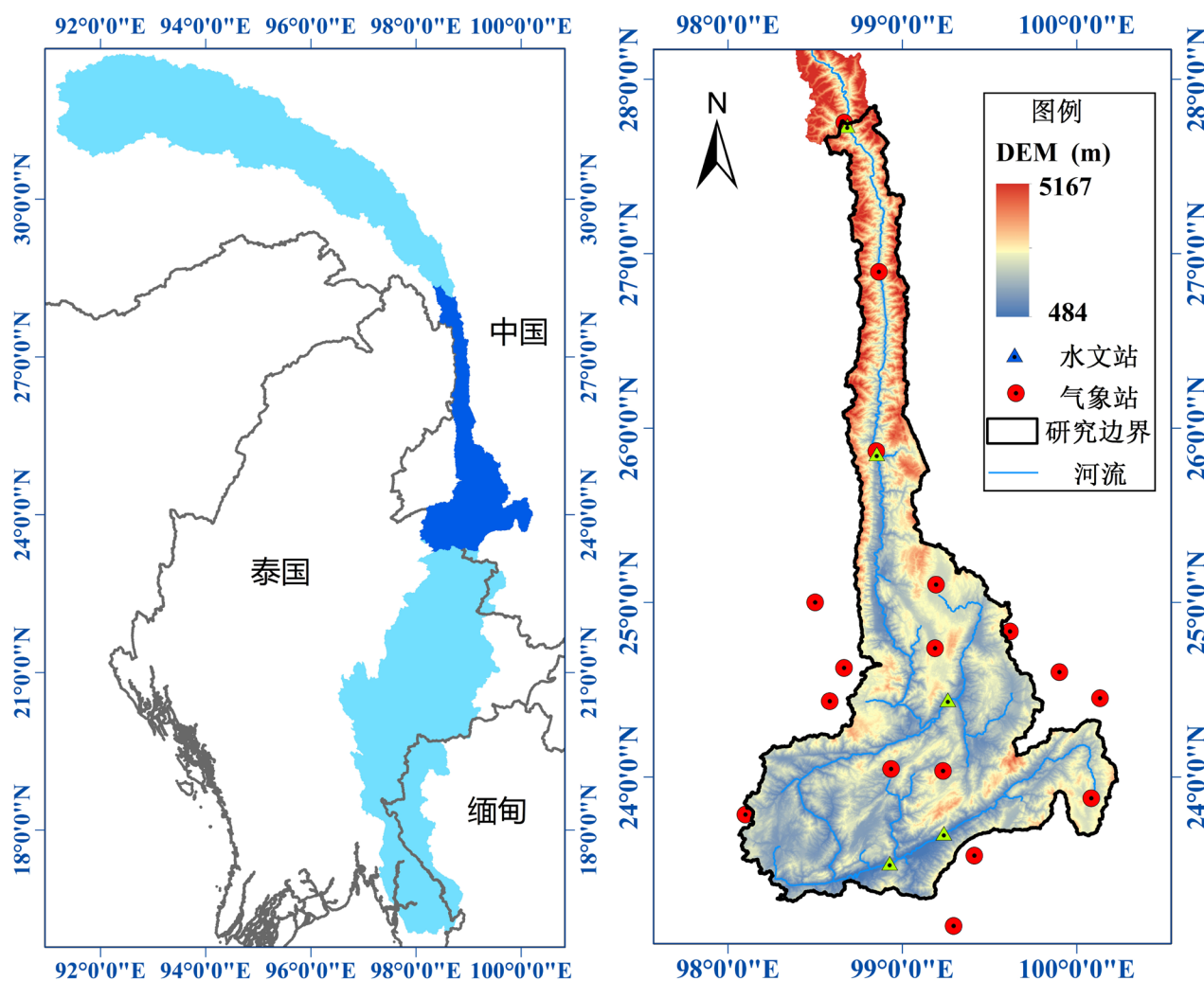


Figure 1. Location of Nu basin and distribution of stations

图 1. 怒江流域(云南段)位置及站点分布图

## 2.2. 研究数据

本研究收集了研究区域内及附近 7 个国家气象站及 10 个省级雨量站 2003~2012 年逐日气象要素观测数据, 其中国家气象站数据来源于国家气象局, 可通过 <http://data.cma.cn> 下载, 省级雨量站数据来源于云南省水文局。降水数据用于卫星降水产品精度评定的参照和水文模型输入, 其它气象要素用于计算流域潜在蒸散发, 计算方法为 Penman-Monteith 模型。17 个地面站点通过泰森多边形插值得到流域尺度的降水。本研究收集了流域内 5 个流量站 2003~2012 年逐日流量数据(大湾江站从 2004 年开始)数据来源于云南省水文局。

TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星是由美国国家航空航天局和日本国家空间发展局联合研制, 其上搭载的降水雷达 TRMM-PR 能够提供降水的三维结构信息。近年来, TRMM 测雨产品 3B42 和 3B42RT 被研究与应用较多, 其中 3B42 RT 是准实时降水数据, 3B42 是在 3B42 RT 基础上, 利用月地面观测雨量校正所得。2011 年 7 月, 最新版本 TRMM V7 数据发布。TRMM 3B42 和 3B42 RT 产品时空分辨率均为 3 小时、0.25°, 本研究选取 TRMM 3B42 V7 (以下简称 TRMM) 和 3B42 RT V7 (以下简称 RT) 数据 2003~2012 年进行评估, 数据可通过 <http://trmm.gsfc.nasa.gov/> 下载。

CMORPH (the Climate Prediction Center morphing method) 是由美国国家海洋与大气管理局下属气候预测中心 (Climate Prediction Center, CPC) 开发的一套准实时降水产品, 结合了红外(IR)与被动微波(PMW)信息, 采用“运动矢量”方法推求降水。目前, CMORPH 提供时空分辨率为 30 分钟、0.08°(即原始数据产品), 以及时空分辨率为每 3 小时、0.25°的降水产品, 版本为 1.0。本研究采用 2003~2012 年空间分辨率为 0.25°的产品(以下简称 CMO) 进行评估。数据可通过 CPC 数据中心免费下载(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/janowiak/cmorph.html>)。

## 3. 模型与方法

### 3.1. 水文模型

本文选用由清华大学开发的分布式水文模型 Hydro-Mount 进行径流模拟, 模型描述了包括了降水截留、积雪累积/消融、填洼、蒸散发、非饱和土壤水运动、地下水运动、坡面流以及河网汇流等山区流域主要水文过程。流域按照子流域方式进行离散, 在每个子流域内部根据土地利用类型和土壤类型进而划分为不同的水文响应单元。在每个水文响应单元上建立描述水流运动的物理方程, 每个水文响应单元从上到下包括植被冠层、地表储留层、土壤层和地下水层。其中, 土壤层直接受到降水和蒸散发的影响, 水分变化剧烈, 是控制水文过程的关键, 采用 Richards 方程描述其中的水分运动, 并考虑沿坡向的壤中流, 进行准二维的模拟。采用度日因子法描述融雪过程, 采用质量守恒方程与 Darcy 定律联立来描述地下水和河道之间的水分交换, 采用一维运动波方程描述河网水流运动, 详细计算原理可见参考文献[17]。

本研究建模所采用的数字高程 DEM(Digital Elevation Model)数据采用 SRTM3 数据, 来源于美国太空总署 (NASA) 和国防部国家测绘局(NIMA), 空间分辨率为 90 m。选定 2003~2009 年为模型率定期(姑老河站为 2004~2009 年), 2010~2012 年为模型验证期。为了探讨卫星降水在缺资料流域的径流模拟效果, 本研究采用两种情境(I,II)分别进行径流模拟, 情景 I 和 II 分别利用地面雨量站点降水资料和相应的卫星降水数据率定模型参数, 然后用卫星降水数据进行径流模拟。综合两种情景评价卫星降水数据模拟径流的精度。其中模型率定的主要参数为土壤水力参数, 含水层参数通过实测径流资料的综合退水曲线分析确定[18]。

### 3.2. 精度评估

采用偏差(BIAS)、相关系数(Correlation Coefficient, CC)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、纳西效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)、正确预报率(Probability of Detection, POD)以及错误预报率(False to Alarm, FAR)来对卫星降水产品进行精度评估, 各指标定义如表 1 所示。所选取的 6 个指标中, BIAS 以及 RMSE 为定量指标, 其代表卫星降水数据与站点降水数据的偏差程度, 其越小代表卫星降水数据精度越高; CC 代表了

卫星降水数据与站点降水数据之间的相关性，值在 0~1 之间，越大代表卫星降水与站点降水相关性越好；NSE 代表卫星降水时间序列与站点降水序列之间的符合程度，值越大代表卫星降水序列越符合站点降水序列；POD 和 FAR 用来评价卫星降水数据对降水事件发生探测的能力，POD 为在卫星预报有雨的事件中的正确率，FAR 为在卫星预报有雨的事件中错误预报率。由于地面站点和卫星观测降水的空间尺度不匹配，因此分别从站点尺度和流域尺度进行降水的精度评估。径流的模拟效果评定选取 BIAS 和 NSE 两个指标。

**Table 1.** Evaluation indexes used in this study

**表 1.** 本研究采用的评价指标

指标	计算公式	指标	计算公式
偏差(BIAS)	$BIAS = \sum_{i=1}^{i=n} (G_i - S_i) / \sum_{i=1}^{i=n} G_i$	纳西效率系数(NSE)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (S_i - G_i)^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (G_i - \bar{G})^2}$
相关系数(CC)	$R = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (G_i - \bar{G})^2 \sum_{i=1}^{i=n} (S_i - \bar{S})^2}}$	正确预报率(POD)	$FAR = \frac{n_{fa}}{n_{fa} + n_h}$
均方根误差(RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$	错误预报率(FAR)	$POD = \frac{n_h}{n_f + n_h}$

式中： $n$  为系列长度， $G_i$  为站点雨量， $S_i$  为卫星降水， $\bar{G}$  为站点平均雨量， $\bar{S}$  为卫星平均雨量， $n_{fa}$  地面站未观测到降水卫星站观测到降水的事件数， $n_h$  地面站和卫星均观测到有降水的事件数， $n_f$  地面站观测到有降水卫星未观测到降水的事件数。

## 4. 结果分析

### 4.1. 卫星降水数据的精度评估

表 2 为三种卫星降水数据在 17 地面站点上的精度指标的均值、最大值及最小值，图 2 为相应指标值的分布盒状图，图中从上到下的横线分别代表一组数据的最大值、上四分位数、中位数、下四分位数和最小值。从偏差均值上看，TRMM 和 RT 数据精度较高对降水分别低估 0.42%和 9.37%，CMO 数据低估降水达到 44.14%。从相关性上看，三种产品均表现出与站点降水有较强的相关性，并且相关系数差别不大，介于 0.65~0.67 之间。在误报率上，三者相差不大，然而在探测率上 CMO 数据明显强于其它两种数据，表明 CMO 数据虽然在降水量上有低估，但是在降水频次上有高估。此外，CMO 数据在 RMSE 和 NSE 指标上均表现略好于其余两种产品，但并无明显优势。

**Table 2.** Statistical measures of satellite precipitation datasets at gauge scale

**表 2.** 站点尺度卫星降水产品精度统计指标均值

		FAR	POD	BIAS (%)	CC	RMSE (mm)	NSE
TRMM	MEAN	0.20	0.73	-0.42	0.67	2.63	0.31
	MAX	0.38	0.79	22.47	0.74	3.06	0.45
	MIN	0.12	0.67	-28.64	0.59	2.29	0.17
RT	MEAN	0.21	0.71	-9.37	0.65	2.61	0.33
	MAX	0.39	0.77	16.68	0.74	3.06	0.51
	MIN	0.13	0.63	-37.57	0.58	2.17	0.17
CMO	MEAN	0.21	0.81	-44.14	0.66	2.53	0.39
	MAX	0.43	0.84	-26.32	0.75	3.10	0.54
	MIN	0.08	0.75	-64.09	0.43	2.11	0.14



从各个指标的分布上看(图 2a~图 2f), 各个站点表现出较为明显的差异。从 FAR 上看(图 2a), TRMM、RT 和 CMO 变幅分别为 0.26、0.26 和 0.35, 虽然 RT 变幅最小, 但其有 3 个异常值。从 POD 上看(图 2b), CMO 表现明显优于 TRMM 和 RT, TRMM 略好于 RT。从偏差上分布看(图 2c), CMO 不同站的表现差异明显小于其余两种产品, 表明 CMO 产品对降水的低估一部分是系统性的偏差; TRMM 和 RT 的偏差分布类似, 但是 TRMM 的中位数在 0 附近, RT 中位数在-10%附近, 表明 TRMM 高估降水的站点多于 RT 产品。从 CC、RMSE 和 NSE (图 2d)上看, 三种卫星降水产品彼此之间的差异不明显, 没有一种产品具有突出的优势。多数研究表明经过偏差校正的研究型数据 TRMM 明显优于准实时数据 RT [8] [9] [10], 然而在本文研究中, TRMM 数据表现相对于 RT 数据表现并没有明显的提升, 在某些指标上甚至还差于 RT, 这可能是由于在对 TRMM 数据进行订正时, 引入的辅助资料带来了新的误差, 也可能由本区域的辅助资料不足引起。结合所有指标, 三种产品各有优势, 但 CMO 的偏差过大, 需要进行误差校正才能进一步应用, TRMM 和 RT 都具有较高的精度。

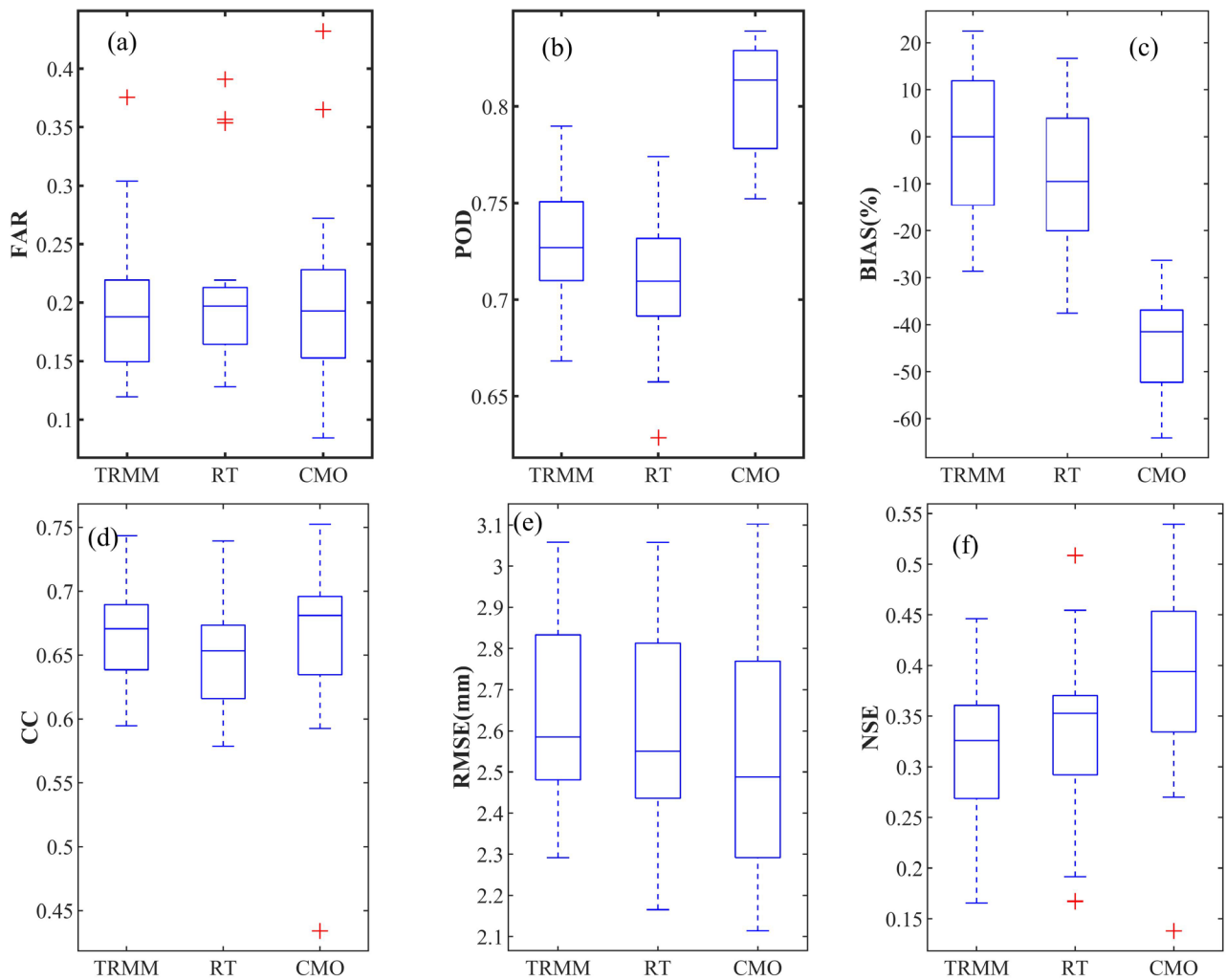


Figure 2. Boxplot of statistical measures of satellite precipitation datasets at gauge scale (a) FAR (b) POD (c) BIAS (d) CC (e) RMSE (f) NSE

图 2. 不同站点精度指标分布图(a) FAR (b) POD (c) BIAS (d) CC (e) RMSE (f) NSE

表 3 给出了三种卫星降水数据在流域尺度上的精度指标值。RT 和 CMO 产品在五个统计区域上均存在不同程度上的低估, 低估水平分别在 1.03%~8.52%之间和 38.53%~44.43%之间; TRMM 产品在支流大湾江、姑老河

和旧城水文站控制区域上存在 0.79%~9.16%的高估，在干流六库站控制区域上存在 6.29%的低估，在整个研究区域上反而存在 0.89%的低估。对比站点尺度，在流域尺度上 CC、POD、RMSE 和 NSE 均有明显的提高，并且整体上各指标值随着统计面积增大有提高。与站点尺度类似，TRMM 和 RT 整体精度一致，均表现出较高的精度，CMO 虽然在偏差指标上存在明显的低估，在其它指标上也表现出了较高的精度。

**Table 3.** Statistical measures of satellite precipitation datasets at basin scale

**表 3.** 流域尺度卫星降水产品精度统计指标均值

降水数据	流域	FAR	POD	BIAS (%)	CC	RMSE (mm)	NSE
TRMM	大湾江	0.19	0.91	0.79	0.84	2.00	0.63
	姑老河	0.24	0.90	9.16	0.81	2.09	0.53
	六库	0.27	0.89	-6.29	0.74	2.18	0.51
	旧城	0.16	0.89	2.27	0.84	1.92	0.63
	研究区域	0.17	0.92	-0.89	0.88	1.70	0.73
RT	大湾江	0.22	0.91	-7.73	0.83	1.95	0.66
	姑老河	0.28	0.90	-1.03	0.79	2.03	0.58
	六库	0.29	0.89	-3.46	0.68	2.32	0.38
	旧城	0.18	0.88	-8.52	0.83	1.89	0.65
	研究区域	0.20	0.92	-8.32	0.87	1.69	0.73
CMO	大湾江	0.09	0.87	-43.85	0.81	2.00	0.58
	姑老河	0.12	0.86	-40.19	0.79	2.00	0.57
	六库	0.34	0.89	-38.53	0.70	2.23	0.43
	旧城	0.09	0.85	-44.43	0.83	1.89	0.61
	研究区域	0.24	0.90	-44.09	0.85	1.77	0.61

#### 4.2. 卫星降水的径流模拟适用性评估

表 4 给出了不同降水数据源日径流模拟的精度评定指标。以地面站点降水数据为模型输入，四个水文站日径流模拟率定期偏差在-6.14%~4.24%，验证期姑老河站偏差为 20.73%，其余三站均在±10%以内；率定期旧城站 NSE 为 0.64，其余三站 NSE 均在 0.75 以上，验证期四个站 NSE 在 0.80~0.95 之间；整体上验证期优于率定期，其中大湾江站和旧城站验证期明显优于率定期，NSE 提高程度分别为 0.12 和 0.19。总体而言，地面站点降水作为模型输入所模拟出的径流能基本反映出日径流过程趋势，但对部分洪水过程模拟不够精准，对洪峰模拟偏大偏小不稳定(图 3a)。这表明虽然流域中雨量站点较为稀疏，这些站点也能基本反应流域的降水过程趋势，但是对于区域内部降水的空间变异性不能很好的反应，因此导致了洪峰模拟较大的不稳定性。

情景 I 下分别以 TRMM、RT 和 CMO 降水为水文模型输入进行日径流模拟，并与站点模拟径流作对比。从偏差上看，以 TRMM、RT 和 CMO 降水为水文模型输入的日径流模拟结果偏差基本与降水的偏差趋势一致，即 CMO 径流模拟总量明显偏小，TRMM 径流模拟总量总体偏多，RT 径流模拟总量总体偏少。然而，径流总量的偏差程度与降水的偏差程度关系较小，这与径流受到其它因素影响有关。总体而言，CMO 的模拟效果最差，率定期和验证期偏差都超过-60%；RT 的模拟效果最好，率定期偏差都在-10%以内，验证期都在-15%以内；TRMM 表现效果居中，率定期在 20%以内，验证期在 27%以内。从 NSE 上看，整体上采用 TRMM 数据的日径流的模拟效果在率定期内优于地面站点，NSE 提高程度为 0.1~0.16 之间，其中大湾江站 NSE 从 0.75 提高到 0.83，旧

城站从 0.64 提高到 0.80；在验证期内，TRMM 数据模拟效果略差于站点但是没有明显差异。对比地面站点，整体上 TRMM 卫星在率定期表现明显有提高，验证期略差于地面站点，并且率定期和验证期内表现波动明显小于地面站点，表明 TRMM 降水和地面站点降水能够抓住流域降水的总体趋势，但是 TRMM 降水更能反映降水的空间变异性。与 TRMM 类似，采用 RT 降水作为水文模型的输入日径流的模拟效果也表现为：整体上率定期明显优于地面站点，验证期略差于地面站点，并且率定期和验证期表现波动较小。无论在率定期还是验证期，TRMM 和 RT 的 NSE 较为接近，TRMM 在旧城站表现明显优于 RT，RT 在姑老河站表现明显优于 TRMM，总体上两者没有明显的优劣。与站点类型，两种卫星降水对洪峰模拟偏大偏小也不稳定(图 3c、图 3d)，这也表明卫星降水产品的精度还有待提高，其空间分辨率仍然不能准确刻画山区降水的高空间变异性，需要发展更高精度的降水观测及估计技术[19] [20] [21]。由于 CMO 的降水有非常显著的低估，因此采用 CMO 降水数据作为水文模型输入的日径流模拟效果不佳，但是其模拟的降水过程趋势还是与实测资料较为接近(图 3b)。

**Table 4.** Evaluation of daily streamflow simulation effect of different precipitation datasets  
**表 4.** 日尺度不同降水源径流模拟效果评定

		情景 I				情景 II			
		率定期		验证期		率定期		验证期	
降水数据	水文站	BIAS(%)	NSE	BIAS(%)	NSE	BIAS(%)	NSE	BIAS(%)	NSE
地面站点	大湾江	-1.75	0.75	6.93	0.87	-	-	-	-
	姑老河	4.24	0.81	20.73	0.80	-	-	-	-
	六库	-6.14	0.96	-9.31	0.95	-	-	-	-
	旧城	2.45	0.64	-4.53	0.83	-	-	-	-
TRMM	大湾江	7.31	0.83	18.97	0.86	-3.66	0.82	6.78	0.89
	姑老河	14.37	0.82	26.69	0.78	1.11	0.83	12.25	0.81
	六库	-5.27	0.94	-8.45	0.91	-6.80	0.94	-10.16	0.91
	旧城	18.93	0.80	7.91	0.81	7.67	0.83	-3.38	0.81
RT	大湾江	-7.70	0.80	6.49	0.88	-6.37	0.81	8.05	0.87
	姑老河	-3.61	0.83	7.28	0.85	-1.99	0.82	9.13	0.83
	六库	-7.52	0.96	-12.31	0.94	-7.49	0.96	-12.25	0.94
	旧城	-0.60	0.82	-13.25	0.71	2.53	0.83	-10.94	0.71
CMO	大湾江	-64.75	-0.51	-61.44	-0.31	-13.07	0.39	-2.27	0.71
	姑老河	-66.21	-0.39	-64.49	-0.23	-7.68	0.57	7.65	0.79
	六库	-12.94	0.94	-15.87	0.90	-8.20	0.95	-10.46	0.92
	旧城	-70.30	-0.70	-78.62	-0.68	20.97	0.71	-5.32	0.70

综合四种降水产品在情景 I 下的表现，其地面站点的径流模拟结果与实测流量资料基本吻合，但率定期与验证期表现波动较大；RT 和 TRMM 数据的径流模拟结果与实测流量资料基本吻合，BIAS 较站点有所提高且偏差与降水的偏差趋势一致，NSE 略有提高，两者在率定期和验证期表现基本稳定且两者之间没有明显的优劣；受降水偏差较大影响，CMO 数据模拟的结果明显小于实测流量，但其过程趋势与实测流量一致。该结果与降水数据精度评定的结论较为一致，相互印证。总体而言，RT 和 TRMM 数据在无/缺资料地区表现出较为满意的径流模拟效果。



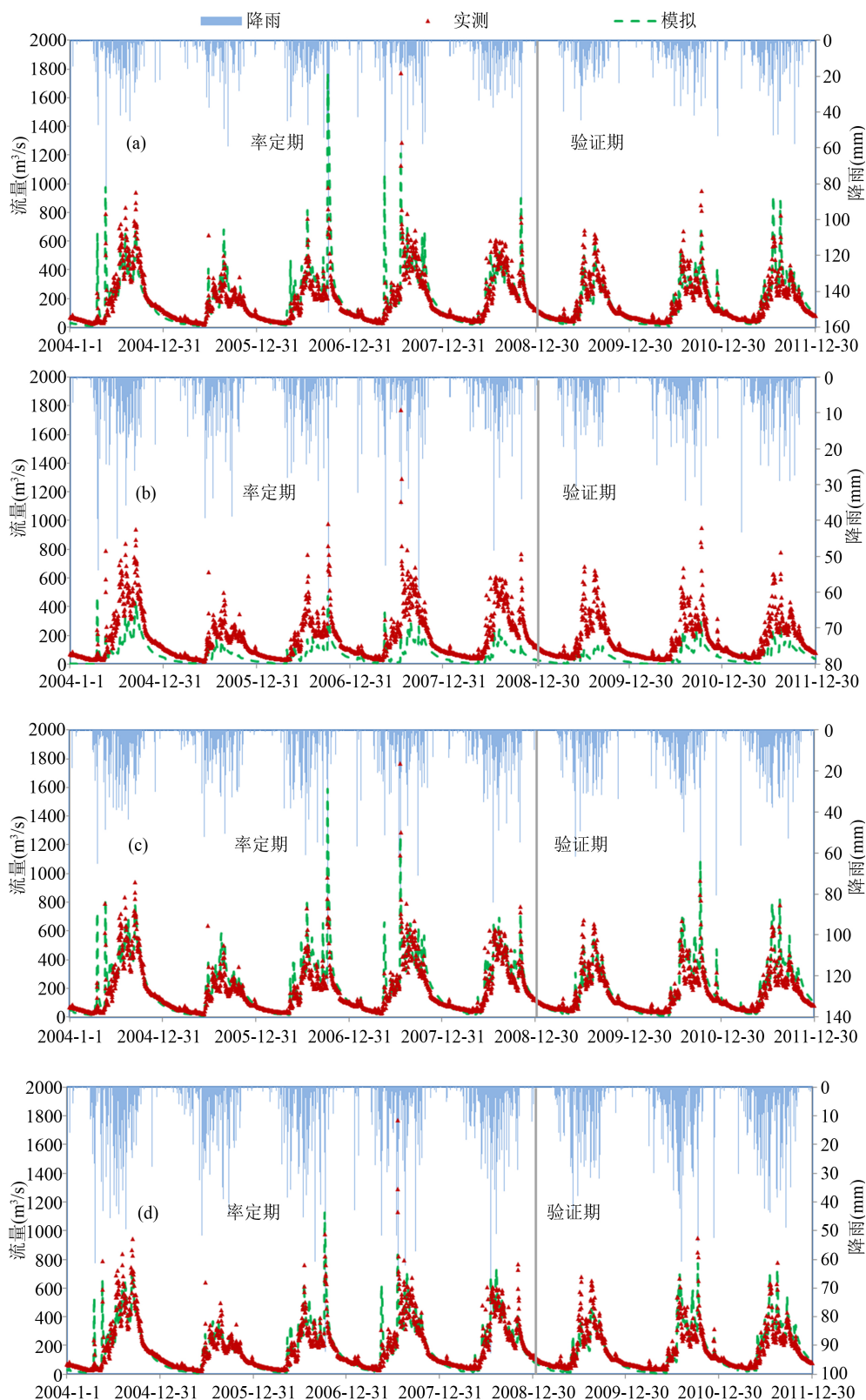


Figure 3. Daily streamflow simulation of Dawanjiang station based on different precipitation datasets under scenario I (a) Gauge (b) CMO (c) TRMM (d) RT

图 3. 情景 1 下不同降水数据大湾江水文站日径流模拟结果(a) 站点(b) CMO (c) TRMM (d) RT

情景 II 下, 各个卫星的模拟效果均比情景 I 有所提高, 其中 CMO 提高效果最为明显, 径流量偏差明显降低, 同时 NSE 也大幅度提高到 0.7 以上, 表明通过消除一定的系统性误差(通过整体率定下垫面蒸发系数), CMO 也具有一定的径流模拟应用价值。较情景 I, TRMM 和 RT 在 NSE 上表现没有明显区别, 但是在平均偏差上有明显的提高, 验证期内误差均降到了 15% 以内。与预期的不同, 情景 II 下 TRMM 和 RT 的表现并没有明显的提升, 这也从侧面反映了 TRMM 和 RT 降水在本区域具有较高的精度, 通过率定优化参数不能明显的提高模型的模拟精度。因此, TRMM 和 RT 卫星降水在本区域具有较高的水文应用价值。

## 5. 结论

本文对比了 2003 年至 2012 年怒江流域云南段三种常用的卫星降水产品(TRMM 3B42 V7, TRMM 3B42 RT V7, CMORPH)与雨量站降水数据, 基于站点和流域尺度对三种卫星降水数据局进行精度评估, 并将上述三种降水数据作为分布式水文模型的输入驱动水文模型模拟流域日径流, 并通过实测径流资料对比分析径流模拟效果。得到以下结论:

1) 站点尺度上, 三种数据都对降水有着一定的探测能力, 与降水的相关系数均值都在 0.65 以上; TRMM 和 RT 数据偏差较小分别为 0.42% 和 -9.37%, 而 CMO 数据低估降水超过 40%。三种卫星降水产品精度指标空间分布差异明显, CMO 降水产品偏差指标空间变异最小, 表明其存在系统性偏差。总体而言, CMO 产品在多个 POD、RMSE 和 NSE 指标上稍微有优势, 但是在 BIAS 表现很差, RT 和 TRMM 在各个指标上表现接近, 均具有较高的精度。

2) 流域尺度上三者卫星降水数据的表现相对站点尺度要好: 在流域尺度下卫星降水与站点雨量相关系数均在 0.68 以上; RT 和 TRMM 的误差均控制住 10% 以内; CMO 在流域尺度上低估降水超过 40%, 精度有待提高。流域尺度上, 三种降水产品的精度与站点尺度上较为一致, 即 RT 和 TRMM 具有较高的精度, CMO 精度较差。

3) 地面站点的日径流效果较好, 但率定期与验证期表现波动较大且对洪峰模拟偏大偏小不稳定; TRMM 和 RT 降水数据相对于站点精度有轻微的提升, 但率定期验证期表现稳定; CMO 对日径流的模拟效果较差, 误差明显, 但通过消除系统性误差后表现出一定的径流模拟能力。

综上所述, 对于典型的缺资料山区流域怒江而言, 流域内雨量站点稀疏, 不能够较好地反映降水的空间分布, 径流模拟效果也差强人意。TRMM 和 RT 卫星降水数据在本区域对降水有着一定的探测能力, 相对于站点而言, 其更能捕捉流域降水的空间分布, 因此径流模拟效果也较站点更好。对于无资料和山区而言, TRMM 和 RT 数据具有较高的水文应用价值。

## 基金项目

湖北省博士后创新岗位: 城市雨洪模拟及合理利用研究。

## 参考文献

- [1] SONG, J., XIA, J., ZHANG, L., et al. Streamflow prediction in ungauged basins by regressive regionalization: A case study in Huai River Basin, China. *Hydrology Research*, 2016, 47: 1053-1068. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.155>
- [2] WANG, S., HUANG, G. H., LIN, Q., et al. Comparison of interpolation methods for estimating spatial distribution of precipitation in Ontario, Canada. *International Journal of Climatology*, 2014, 14: 3745-3751. <https://doi.org/10.1002/joc.3941>
- [3] PHILLIPS, D. L., DOLPH, J. and MARKS, D. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, 58: 119-141. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(92\)90114-J](https://doi.org/10.1016/0168-1923(92)90114-J)
- [4] SCHAMM, K., ZIESE, M., BECKER, A., et al. Global gridded precipitation over land: A description of the new GPCP First Guess Daily product. *Earth System Science Data*, 2017, 6: 49-60. <https://doi.org/10.5194/essd-6-49-2014>
- [5] HUFFMAN, G. J., ADLER, R. F., BOLVIN, D. T., et al. The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA). *Journal of*

- Hydrometeor, 2010, 8(1): 38. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7_1)
- [6] JOYCE, R. J., JANOWIAK, J. E., ARKIN, P. A., et al. A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5: 487-503.
- [7] 刘俊峰, 陈仁升, 韩春坛, 等. 多卫星遥感降雨数据精度评价[J]. *水科学进展*, 2010, 21(3): 343-348.  
LIU Junfeng, CHEN Rensheng, HAN Chuntan, et al. Evaluating TRMM multi-satellite precipitation analysis using gauge precipitation and MODIS snow-cover products. *Advances in Water Science*, 2010, 21(3): 343-348. (in Chinese)
- [8] LIU, J., DUAN, Z., JIANG, J., et al. Evaluation of three satellite precipitation products TRMM 3B42, CMORPH, and PERSIANN over a subtropical watershed in China. *Advances in Meteorology*, 2015: 2731-2738.  
<https://doi.org/10.1155/2015/151239>
- [9] KRAKAUER, N. Y., PRADHANANG, S. M., LAKHANKAR, T., et al. Evaluating satellite products for precipitation estimation in mountain regions: A case study for Nepal. *Remote Sensing*, 2013, 5: 4107-4123. <https://doi.org/10.3390/rs5084107>
- [10] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. 赣江流域高分辨率卫星降水数据的精度特征与时空变化规律[J]. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43(4): 447.  
HU Qingfang, YANG Dawen, WANG Yintang, et al. Accuracy and spatio-temporal variation of high resolution satellite rainfall estimate over the Ganjiang River Basin. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56: 853-865. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 王佳伶, 陈华, 许崇育, 李翔泉, 曾强. TRMM 卫星降雨数据的精度及径流模拟评估[J]. *水资源研究*, 2016, 5(5): 434-445.  
WANG Jialing, 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)  
<https://doi.org/10.12677/JWRR.2016.55050>
- [13] Li, D., DING, X. and WU, J. Simulating the regional water balance through hydrological model based on TRMM satellite rainfall data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 12: 2497-2525. <https://doi.org/10.5194/hessd-12-2497-2015>
- [14] 张鹏举, 江善虎, 陈宏新, 赵敏, 李敏娟. TRMM 卫星降水数据在淮河流域径流模拟的适用性[J]. *水资源研究*, 2017, 6(2): 148-155.  
ZHANG Pengju, JIANG Shanhu, CHEN Hongxin, et al. Hydrological simulation capability of TRMM satellite precipitation data in xixian catchment, Huai River Basin. *Journal of Water Resources Research*, 2017, 6(2): 148-155. (in Chinese)  
<https://doi.org/10.12677/JWRR.2017.62018>
- [15] 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)
- [16] COLLISCHONN, B., COLLISCHONN, W. and TUCCI, C. E. M. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 2008, 360(1-4): 207-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.032>
- [17] 王蕾, 倪广恒, 胡和平. 沁河流域地表水与地下水转换的模拟[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, 46(12): 1978-1981.  
WANG Lei, NI Guangheng and HU Heping. Simulation of interactions between surface water and groundwater in Qin River basin. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, 46(12): 1978-1981. (in Chinese)
- [18] 周星, 沈忱, 倪广恒, 胡宏昌. 结合退水曲线的数字滤波基流分割方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(3): 318-323, 330.  
ZHOU Xing, SHEN Chen, NI Guangheng, et al. Digital filter baseflow separation method based on a master recession curve. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2017, 57(3): 318-323, 330. (in Chinese)
- [19] -Chen, F., Liu, Y., Liu, Q. and Li, X. Spatial downscaling of TRMM 3B43 precipitation considering spatial heterogeneity. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35: 3074-3093. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.902550>
- [20] 陈杰, 许崇育, 郭生练, 陈华. 统计降尺度方法的研究进展与挑战[J]. *水资源研究*, 2016, 5(4): 299-313.  
CHEN Jie, XU Chongyu, GUO Shenglian, et al. Progress and challenge in statistically downscaling climate model outputs. *Journal of Water Resources Research*, 2016, 5(4): 299-313. (in Chinese) <https://doi.org/10.12677/JWRR.2016.54037>
- [21] ZHOU, X., NI, G.-H., SHEN, C, et al. Remapping annual precipitation in mountainous areas based on vegetation patterns: A case study in the Nu River basin. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2017, 21: 999-1015.