

Evaluation of Accuracy and Streamflow Simulation of TRMM Satellite Precipitation Data

Jialing Wang^{1,2}, Hua Chen^{1,2}, Chongyu Xu^{1,2,3}, Xiangquan Li^{1,2}, Qiang Zeng^{1,2}

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

²Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan University, Wuhan Hubei

³Department of Geosciences, University of Oslo, Oslo Norway

Email: 2015202060025@whu.edu.cn

Received: Sep. 1st, 2016; accepted: Sep. 24th, 2016; published: Sep. 27th, 2016

Copyright © 2016 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

Abstract

The accuracy of satellite precipitation estimates has become a focus of attention, having a promising prospect in the hydrological researches and applications. In this study, the new precipitation product (3B42 V7) of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) was evaluated via comparison with the rain gauge precipitation data in Xiangjiang River Basin. The evaluations were conducted at different spatial and temporal scales. Simultaneously, the laws of data accuracy under different periods, rainfall intensity levels, and elevations were analyzed. These two precipitation data were then adopted to drive the Xinanjiang Model to perform streamflow simulation. The results showed that TRMM satellite precipitation data had a good correlation with rain gauge precipitation data; it had better accuracy under monthly scale than daily scale and showed better performance at watershed scale than it did at grid scale. The area precipitation of TRMM data showed better accuracy in humid season than in arid season. From an overall estimate on the amount of precipitation, areal precipitation from TRMM data on watershed scale was underestimated in contrast with areal precipitation interpolated from rain gauge data. While at grid scale, TRMM data from higher elevations inclined toward underestimation, while the contrary inclined toward overestimation. The frequency statistical result of different rainfall intensity levels indicated that TRMM tended to underestimate the occurrence of light rainfall intensity but overestimate the occurrence of heavy rainfall intensity and no-rain events. The TRMM-driven streamflow simulation performed better at monthly scale relative to the daily scale, but all were within acceptable range. However, the effects of streamflow simulation driven by TRMM data were not as accurate as those driven by rain gauge data displayed in the aspects of flood peak, flood volume and flood duration. This study assesses the accuracy of the latest product TRMM 3B42 V7, revealing the influential factors regarding accuracy for future reference and analyzing the effectiveness and possibility of streamflow simulation.

作者简介: 王佳伶(1993-), 女, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面的研究。

文章引用: 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. <http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2016.55050>

Keywords

TRMM 3B42 V7, Precipitation Data, Accuracy Evaluation, Influential Factors, Streamflow Simulation

TRMM卫星降雨数据的精度及径流模拟评估

王佳伶^{1,2}, 陈 华^{1,2}, 许崇育^{1,2,3}, 李翔泉^{1,2}, 曾 强^{1,2}

¹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

²武汉大学, 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉

³挪威奥斯陆大学地学系, 挪威 奥斯陆

Email: 2015202060025@whu.edu.cn

收稿日期: 2016年9月1日; 录用日期: 2016年9月24日; 发布日期: 2016年9月27日

摘 要

卫星测雨的精度已成为人们关注的热点, 并且在水文研究及应用上有很大的发展前景。本文选取湘江流域为研究区, 以地面雨量站点数据为参照, 评估了不同时空尺度下热带测雨观测计划(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)多卫星降雨分析新产品(TRMM 3B42 V7)的精度, 同时分析了精度在不同时期、雨强及高程等因素下的影响规律, 并驱动新安江模型展现了径流模拟效果。研究表明: TRMM降水数据与站点数据相关性较好, TRMM数据精度在月尺度明显优于日尺度, 流域尺度优于栅格尺度, 面雨量精度湿润季节高于干旱季节; 雨量估计上TRMM相对站点在流域尺度下整体低估, 栅格尺度下受高程影响, 在高程较大区域TRMM数据倾向低估, 反之倾向高估; 各雨强级别下TRMM对小强度降雨稍低估而对强降雨和无雨高估; TRMM数据月径流模拟效果比日径流好, 均在可接受范围, 但对洪峰、洪量及峰现时间不如站点模拟精准。本研究为TRMM数据的精度订正提供相关思路, 并分析其在径流模拟应用中的可行性。

关键词

TRMM 3B42 V7, 降水数据, 精度评估, 影响因素, 径流模拟

1. 引言

降水作为水循环的主要环节, 是水文分析的基础。降水数据是水文模型的输入要素, 其精度对降雨-径流过程模拟具有重大影响。目前降水数据获取途径中应用最普遍的是雨量站观测, 其特点是测点处精度较高但周围数据常需通过插值获得。由于降水时空分布不均, 雨量站数量不足、空间展布不合理以及观测时间不连续等因素往往使得站点降水数据精度受限[1], 尤其在资料稀缺区和地形复杂区。卫星测雨技术在获得具有一定时空精度的连续降水数据方面具有独特优势, 能一定程度弥补传统测雨方法的不足[2], 特别在资料稀缺区有很大的应用前景, 是未来水文研究及应用的发展趋势。热带测雨观测计划 TRMM 卫星携带的独有仪器装备为卫星测雨提供了有力支持。

TRMM 卫星由美国国家宇航局和日本国家空间发展局联合研制并于 1997 年 11 月 27 日发射, 它是第一颗通过多频率微波、可见远红外线以及太空降雨雷达来测量热带和亚热带降雨的卫星[3]。降雨数据范围覆盖全球 38°S~38°N、180°W~180°E 间的范围, 自 2001 年 8 月变轨后扩展至 50°S~50°N, 包括我国除东北部分地区外

所有面积。TRMM 卫星提供多级测雨产品，用户可根据所需时空精度等下载使用。

TRMM 降雨产品的精度评估和径流模拟等应用方面已成为国内外研究的热点。在精度评估方面，Koo 等[4]采用 TRMM 3B42 V6 降雨资料从雨量、频率和强度等方面分析了韩国夏季降雨特性，指出了 TRMM 降雨在不同时间尺度和空间上的分布情况，但研究时段仅选取为 6~8 月未对全年进行全面分析；白爱娟等[5] [6]将 TRMM 3B41 实时数据分别在青藏高原及陕西周边区域与站点数据对比分析区域夏季降雨规律及基本特征，该版本数据时间分辨率为 1 h 适用于日变化分析，主要是规律性揭示和定性研究，时间跨度也限于夏季；刘俊峰等[7]分析了 TRMM 3B42 数据在中国大陆 50°N 以南大范围地区的整体情况，结果表明 TRMM 数据与地面观测数据相关性较好，并指出精度随日月年尺度逐渐提高，湿润区好于干旱区，启示我们 TRMM 在降雨丰沛地区适用性更强，但文中给出的精度指标主要是相关系数的一个范围及其在地理上的空间分布情况，我们可以针对某一地区细化并可采用更多精度衡量指标；谷黄河等[8]将 TRMM 3B42 与站点数据在时空分布上对比表明 TRMM 数据在长江流域有较高精度，采用了多个指标但选取的 2008 年 4~12 月区间内的资料时间序列短未考虑到年际变化及差异；李相虎等[9]利用 TRMM 3B42 V6 3 h 数据在鄱阳湖流域分析降雨时空分布特征及对比了不同子流域、雨强和季节的精度差别，弥补了以往只评价整体精度的不足，指出高程和坡度对山区精度存在影响的可能但未进一步分析；吴雪娇等[10]对比黑河流域 3B42 V7 数据和 9 个站点数据分析山区降水，指出 TRMM 在数据稀少区的作用，并发现夏季拟合度高于冬季，且降水数据精度随海拔上升而下降，但站点数目较少可能存在不确定性；蔡妍聪等[11]用新版本 3B42 V7 3 h 数据验证在中高纬度内蒙古地区精度发现在整个研究区总体表现为高估降雨量，但区域上存在高低估并存的非一致现象，并分析了海拔和多年平均降雨对精度的影响；高洁[12]采用 TRMM 3B43 月降雨量与中国 718 个地面雨量站对比表明两者高度线性相关，TRMM 数据普遍表现为低估，该研究采用月版本数据与 3B42 数据研究结论存在差异指出汛期精度低于非汛期；而李威等[13]将 TRMM 3B43 月降雨数据用于分析在月、季、年尺度下喀斯特山区的适用性时发现 TRMM 降雨估计偏大，月精度最高；杨雨蒙等[14]将 TRMM 3B42 V7 新产品与气象站点降雨数据在湖南省对比发现，日尺度两者相关性很低仅 0.31，月尺度显著提高为 0.88，干旱季节表现优于湿润季节，且阐释了空间要素对 TRMM 数据可靠性存在影响，该文是将 TRMM 降雨数据双线性内插得到对应站点的降雨估计值，对于高海拔或地形复杂的粗差点地区不能很好求解，一定程度影响了精度分析；一些研究[15] [16]表明在不同地区 TRMM 3B42 V7 新版本比 V6 数据精度有所提高；在径流模拟方面，Bruno Collischonn 等[17]在亚马逊流域将 TRMM 卫星 3h 数据与地面观测数据驱动大尺度水文模型，表明两者模拟结果接近；国内开展系列研究[18]-[21]将 TRMM 降雨数据应用不同流域并输入不同水文模型中发现 TRMM 降雨数据能基本再现日径流过程但洪峰模拟精度不高，而月径流模拟则较精准。

综上所述，① TRMM 降雨数据的已有研究成果中既有相似结论，也有存在差异甚至相悖的地方，TRMM 降水数据精度及规律随数据版本和研究区域的尺度范围、气候条件及地理地形等不同而表现不同，针对特定区域有必要具体分析，为今后 TRMM 精度订正和提高区域适用性奠定基础。② 虽然目前对 TRMM 的评估已取得不少成果，总的研究内容也趋于丰富化，各自研究都具有一些侧重点，但对 TRMM 进行较为系统的评估的研究还较少，仍存在研究时段短、衡量指标单一、对比站点数目少、评定内容有限及数据版本非最新等一些局限，这些研究大都仅展开精度分析而未对应用性进行评定或展开径流模拟应用分析但对精度评估较简略。③ 这些研究中对影响精度的相关因素的分析相对较少，对精度的评价有助于分析数据的可用性，但考虑影响精度的因素将有助于数据的改进，同时用于径流模拟中可对其进行应用性评估，又从侧面印证其精度。鉴于此，本文旨在回答三方面问题：一是 TRMM 卫星降雨数据的精度如何，从日、月的不同时间尺度和流域、栅格的不同空间尺度进行多角度分析；二是 TRMM 数据精度存在何种规律及其影响因素，以不同时期、不同雨强和不同高程展开多方面的探究；三是 TRMM 降雨数据的应用性如何，通过径流模拟效果进行评定，同时反过来验证 TRMM 数据的精度。本文选取湘江流域为研究区，采用改善的新产品 TRMM 3B42 V7，通过与站点数据的对比展开了较为全面细致的多尺度、多方面的系统评估，同时揭示了影响精度的相关因素以期今后精度订正提供思路，并

对水文过程模拟的应用效果及可行性进行分析,为其深入研究和广泛应用奠定基础。

2. 研究区域、数据与方法

2.1. 研究区域概况

本文以位于长江中游洞庭湖之南的湘江流域(24°31'~29°00'N, 110°31'~114°00'E)为研究区域,该区域属于低纬度湿润区,且站点密度和分布较合理、资料较完善,将其站点降雨资料作为对比参照能科学合理地对 TRMM 3B42 V7 产品的精度和径流模拟评估(见图 1)。湘江[22]是洞庭湖水系中最大的河流,源于广西临桂县海洋山,向东北流贯湖南省境,最终注入洞庭湖。干流全长 856 km,流域面积 94,660 km²。湘江流域东南西三面环山,流域地貌类型除山外大都为起伏不平的丘陵与沿河平原,地形呈由南向北逐渐倾斜的马蹄形盆地,河流向北倾注。流域属中亚热带季风湿润气候,冬季受强大蒙古高压控制,夏季受东南季风影响。流域内水系发育,支流众多,年平均气温为 17°C,年平均降水量在 1400 mm 以上,且主要集中于汛期。

2.2. 数据及处理

本研究卫星降雨采用 TRMM 3B42 V7 产品,是 TRMM 多卫星降水分析产品(TMPA)新版本,它在原有的 3B42 V6 的数据源基础上进行改善并结合了新的资料。该数据是空间分辨率为 0.25° × 0.25° 的栅格数据,时间步长为 3 h (具体说明可见 <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>)。原始下载数据为 HDF 文件,为分层式数据管理结构,记录了包括降雨、误差等数据及文件信息等。每个 HDF 文件的降水数据中记录了 3 h 下降雨强度,单位为 mm/h。本研究应用 Matlab 编程,将每日对应 8 个文件降雨数据累加并转换单位为 mm/d,获得准全球 1440 × 400 网格日降雨数据;在 ArcGIS 中利用湘江流域矢量边界裁剪出研究区范围,得到湘江流域 140 个栅格及其中心点坐标;在 Matlab 中将降雨网格数据进行旋转并建立与坐标的联系,选择读取研究区内日降雨数据。本研究处理读取的 TRMM 卫星日降水数据的时间范围为 1998~2005 年,空间范围包括湘江流域 140 个栅格。

地面雨量站观测数据来源于水文年鉴刊布的 1998~2005 年湘江流域 188 个站点日降水资料,与 TRMM 栅格型数据不同的是雨量站为点状不连续数据,为使两者具有可比性需进行一定的预处理。为避免不同栅格降雨精度存在差异有必要对研究区进行流域尺度面雨量分析,本文结合高程采用带外部漂移的普通克里金方法(Ordinary Kriging (OK) with external drift, KED) [23]将 188 个站点数据插值到与 TRMM 数据对应的 140 个栅格中心点位置后再计算得到流域面雨量;在分析 TRMM 数据单个栅格尺度下精度时,可供选取的站点参照数据有栅格中心点插值雨量、距栅格中心点最近站点雨量和栅格内站点平均雨量三种。由于考虑到站点密度不均,存在无站点分布和周围站点稀疏的栅格,站点插值误差会干扰 TRMM 数据精度影响因素分析过程;而 TRMM 数据代表网格均化数据,故采用栅格内站点平均雨量比距栅格中心最近站点雨量更能反映栅格区域降雨情况。因此单个栅格尺度的 TRMM 精度分析选取湘江流域内有站点分布的 95 个栅格,采用栅格内所有站点实测日降雨的算术平均值作为参照与 TRMM 数据进行对比。

2.3. 新安江模型

新安江模型[24]是由赵人俊教授提出的一种概念性降雨径流模型,本研究采用的三水源新安江模型在湿润及半湿润地区得到广泛认可和应用。该模型按三水源划分为地表径流、壤中流和地下径流,产流方式为蓄满产流,蒸散发分为上层、下层和深层,汇流分为坡地汇流和河网汇流两个阶段产流,地面汇流采用纳西单位线,壤中流和地下径流采用线性水库。本研究将 TRMM 网格数据空间平均得到的面雨量和将站点资料经过外部漂移的克里金插值计算得到的面雨量用于驱动新安江模型,模拟湘潭站的径流过程。研究选取 1998~2002 年为率定期,2003~2005 年为验证期。参数率定采用 SCE-UA (Shuffled Complex Evolution)优化算法[25],以纳西效率系数为目标函数自动搜寻水文模型参数最优解。

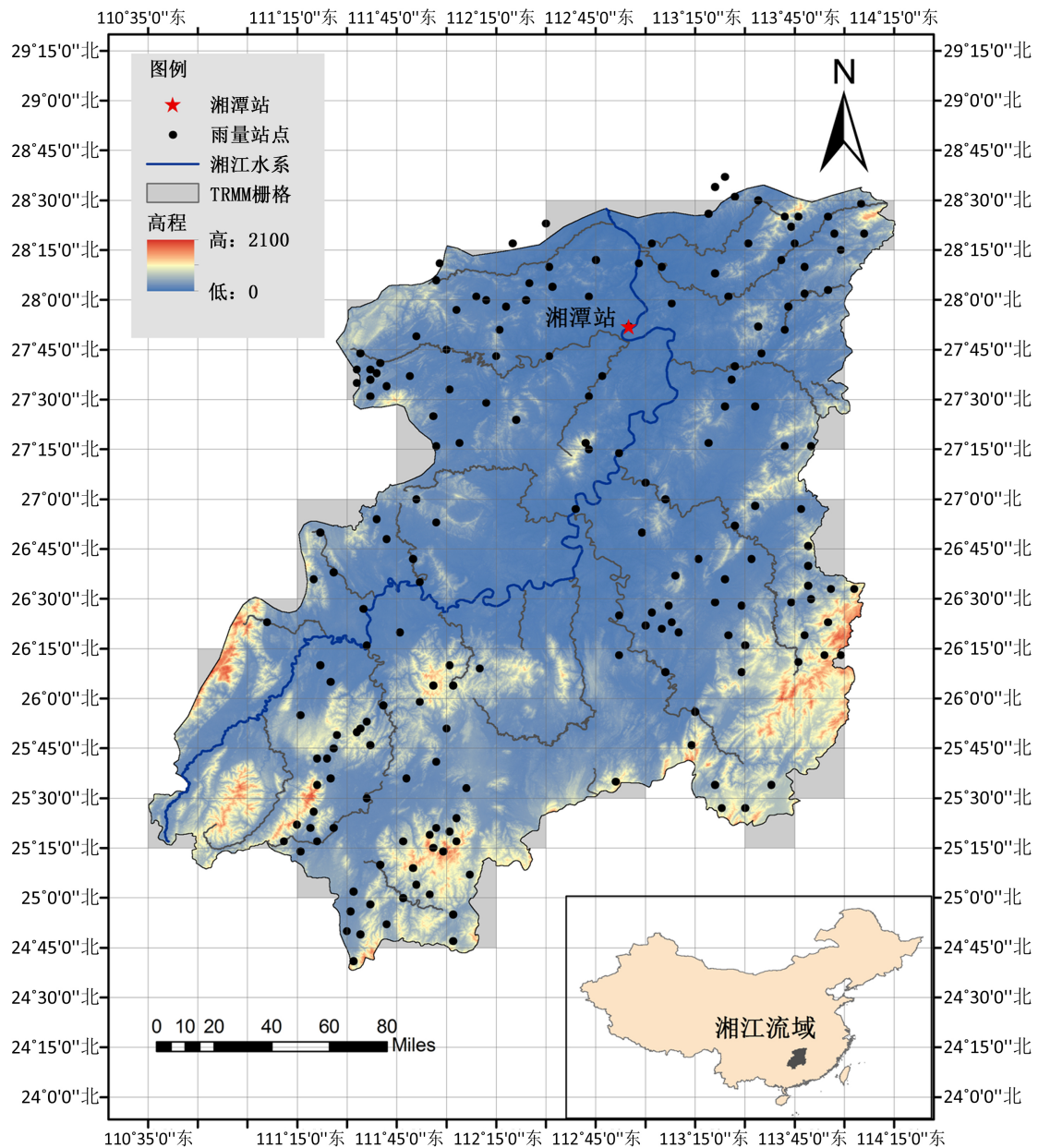


Figure 1. Distribution of rain gauge stations and TRMM grids on Xiangjiang River Basin
 图 1. 湘江流域雨量站及 TRMM 网格分布图

2.4. 评价方法及指标

本文在评价 TRMM 卫星降雨数据精度时，以地面站点观测数据为参照进行对比评估，主要采用了相关分析和统计分析的方法，径流模拟则以新安江模型为工具，评价基于各项衡量指标并结合图表进行分析，评价的各项指标及其计算公式可见表 1。通过散点图直观表示两者的线性拟合程度并能展现 TRMM 数据的偏差状况，并采用相关系数 R 定量描述两者相关程度，计算了降雨总量相对误差 δ 、平均误差 ME、平均绝对误差 MAE 等指标来衡量 TRMM 数据的偏差程度，比较了 TRMM 和站点数据的雨量均值、各雨强级别的频率分布等统计量以分析数据特点和精度规律。再利用 TRMM 和站点的降雨资料分别作为水文模型的输入，模拟得到流量系列的模型输出，将模拟流量和实测流量对比评估 TRMM 降雨数据用于水文模型的可行性和效果，而径流模拟效果又从侧面反映了

TRMM 数据的精度。在径流模拟中采用纳西效率系数 NSE、水量相对误差 RE 进行模拟效果和偏差的定量分析。

3. 结果与分析

3.1. 不同时间尺度流域面雨量精度评估

为评估 TRMM 数据与站点数据流域尺度下的精度，同时为使 TRMM 栅格型数据与雨量站离散点状数据具有可比性，分别将两种资料进行处理从而比较面雨量。全流域尺度下的研究有利于分析 TRMM 数据在湘江流域的适用性，且避免了各栅格精度差异对评估产生影响。由表 2 可知 TRMM 数据精度良好，年降水总量偏差较小，相对误差为-2.9%，且 TRMM 相对站点面雨量总体表现为低估；在绝对值意义上 TRMM 数据日尺度偏差较大达 53.3%，而月尺度偏差为 8.5%表现较好；日尺度下两者相关系数总体为 0.83，相关性较好见图 2(a)；而 TRMM 数据月精度则大大提高，两者呈高度线性相关且相关系数总体达 0.99，见图 2(b)。说明 TRMM 数据有必要进行精度订正的是日降雨数据。

考虑降雨在年际间变化大，而各年精度可能存在差异，分别对比各年 TRMM 数据与站点数据精度发现基本与 8 年整体结果一致，TRMM 数据大体表现为低估。由表 3 可知日尺度下各年两者相关系数在 0.74~0.91 之间，且 2000 年以后 TRMM 数据日精度有所提高；月尺度下两者在各年均呈高度相关；降水总量相对误差各年有差异但均在可接受范围内，需进一步研究影响 TRMM 精度的因素。

3.2. 不同时期面雨量日精度分析

为探究时间对 TRMM 数据精度的影响，将 8 年资料逐月同期计算，在各月对 TRMM 与站点数据面雨量的日精度进行了分析。表 4 反映了 TRMM 数据能很好刻画降雨在年内各月分配规律，且整体结果显现出湿润季节(4~8 月)相对干旱季节(9~2 月除 10 月)两者相关性更高。但具体分析各年不同月份数据日精度发现也存在干旱季节某月精度高而湿润季节某月精度较低现象，说明不同时期对 TRMM 数据的精度影响整体有一定规律但各年仍有不确定性，样本数量有一定影响，但同时可进一步分析与月份相关的降雨强度等因素对精度的影响。

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
相关系数	$R = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(T_i - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}}$	相对误差	$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n S_i} \times 100\%$
平均误差	$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - S_i)$	平均绝对误差	$MAE = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n T_i - S_i \right)$
纳西效率系数	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2}$	水量相对误差	$RE = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{Si} - \sum_{i=1}^n Q_{oi}}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} \times 100\%$

式中：n 为系列长度， S_i 为站点雨量， T_i 为 TRMM 雨量， \bar{S} 为站点平均雨量， \bar{T} 为 TRMM 平均雨量， Q_{Si} 为模型模拟径流量， Q_{oi} 为实测径流量， \bar{Q}_{oi} 为平均实测径流量。

Table 2. Comparisons of the TRMM 3B42 V7 and rain-gauged area precipitation (1998~2005)

表 2. TRMM 3B42 V7 与站点数据面雨量比较(1998~2005 年)

评价指标	点数 n	相关系数 R	站点均值 P_{obs} (mm)	TRMM 均值 P_{TRMM} (mm)	平均误差 ME (mm)	平均绝对误差 MAE (mm)	年降水总量相对误差 (δ)
日尺度	2922	0.83	4.33	4.20	-0.12	2.31	-2.9%
月尺度	96	0.99	131.66	127.88	-3.78	11.23	-2.9%

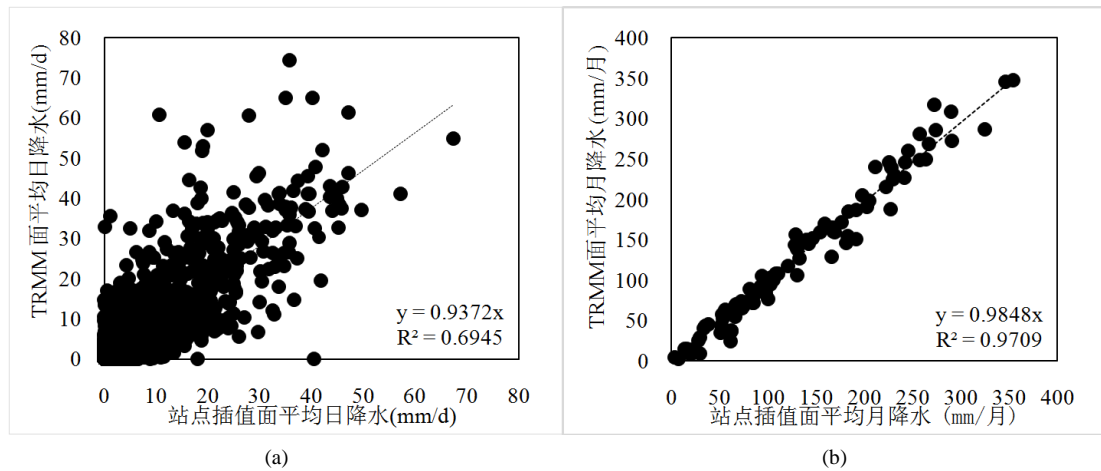


Figure 2. Scatter plots of the TRMM and the rain-gauged precipitation at daily scale (a) and monthly scale (b)
图 2. TRMM 与站点数据日尺度(a)与月尺度(b)散点图

Table 3. Comparison of TRMM data and rain-gauged data at basin scale in each year

表 3. 流域尺度下各年 TRMM 与雨量站数据比较

年份	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	备注
相关系数 R	0.80	0.77	0.74	0.86	0.89	0.91	0.87	0.85	日尺度
	1.00	0.98	1.00	0.97	0.99	0.98	0.99	0.99	月尺度
总量相对误差 δ	-6.0%	2.5%	-4.2%	-3.6%	1.3%	-7.5%	-5.3%	-2.8%	

Table 4. Analysis of the daily area precipitation of TRMM 3B42 V7 and rain-gauged data in different periods

表 4. 不同时期下 TRMM 3B42 V7 与站点数据面平均日降雨分析

月份	相关系数	站点(mm/d)	TRMM(mm/d)	平均误差 ME(mm/d)	相对误差 δ
1	0.70	2.81	2.60	-0.21	-8.9%
2	0.79	3.09	3.20	0.11	3.6%
3	0.68	4.62	4.56	-0.06	-1.3%
4	0.85	6.29	6.47	0.18	2.9%
5	0.89	7.87	7.75	-0.12	-1.6%
6	0.86	8.16	8.05	-0.11	-1.4%
7	0.86	4.65	4.60	-0.05	-1.1%
8	0.86	5.47	5.20	-0.27	-5.0%
9	0.74	2.54	2.28	-0.26	-10.6%
10	0.91	0.95	0.93	-0.02	-6.0%
11	0.85	2.14	1.97	-0.17	-8.3%
12	0.81	1.52	1.24	-0.28	-18.3%

3.3. 不同雨强级别精度分析

通过对整个湘江流域 1998~2005 年 140 个 TRMM 栅格和 188 个站点日降雨数据的统计,由图 3 可知 TRMM 数据在各雨强级别发生频率上与站点较为一致,精度较好,但对无雨表现为较明显高估,和对小雨表现为低估,中雨稍微低估,而对大雨和暴雨则略微高估;各雨强级别累计雨量所占比重方面,TRMM 数据在小雨、中雨级

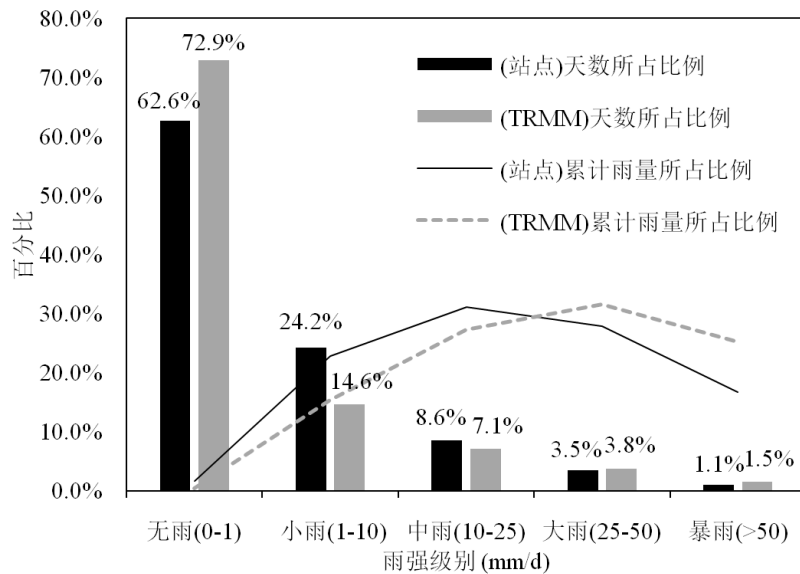


Figure 3. Comparison of the proportion of occurrence frequency and cumulative precipitation in different rain intensity levels based on TRMM and the rain-gauged data

图 3. TRMM 与站点数据在各雨强级别发生频率与累计雨量所占比重的对比

别相对站点偏低，而大雨、暴雨级别相对站点偏高。

3.4. 单个栅格尺度下 TRMM 日降雨精度及与高程关系

前文对研究区整体评估刻画了 TRMM 数据的区域精度，可为概念性水文模型的应用奠定基础。而单个栅格的网格精度也备受关注，同时可为分布式水文模型中的应用提供参考。本研究为避免分析的栅格数目少或选取随机而导致不确定性，同时考虑到评估方法的科学性，对 TRMM 数据单个栅格尺度下的精度评估选取湘江流域 140 个栅格中有站点分布的 95 个栅格进行精度统计分析，并取每个栅格内对应所有站点的算术平均雨量值作为 TRMM 栅格雨量的对比数据。统计结果表明栅格尺度下 TRMM 数据日精度在可接受范围内，两者相关系数在 0.59 至 0.72 之间，且相关系数与高程的相关关系不明显；整体上 95 个栅格中 60% 以上偏差为正(即 TRMM 数据高估降雨)，而流域整体表现为低估，这反映空间尺度范围和分布不同 TRMM 数据偏差具不确定性，这可能与空间地形有关。基于此建立各栅格平均误差随高程的变化关系(见图 4)，发现了 TRMM 偏差趋势与高程的关系：随着栅格中心高程超过 350 m 时，日降雨平均误差表现出由主要为正偏差转变为主要为负偏差，说明 TRMM 数据对高程较低区域估计倾向偏高而对高程较高区域降雨估计倾向偏低；少部分栅格不满足该规律可能由于栅格中心高程不能完全反映整个栅格内地形而引起的。

3.5. 径流模拟评估

本文将 TRMM 3B42 V7 和站点计算的日降雨数据分别用于驱动新安江模型，用于模拟湘潭站以上径流过程。如表 5 所示：率定期站点降水模拟日径流的 NSE 达 0.95，RE 为 0.7%；而率定期 TRMM 降水模拟日径流的 NSE 则为 0.78，RE 为 -1.8%。在验证期站点的 NSE 为 0.95，RE 为 0.5%；而验证期 TRMM 的 NSE 为 0.84，RE 为 -3.6%。日径流模拟上 TRMM 与站点仍存一定的差距。图 5、图 6 分别选取率定期和验证期中一年内站点数据和 TRMM 数据模拟的日径流与实测径流的对比效果，如图可见：TRMM 数据能基本描绘出日径流过程趋势且能较好展现径流年内变化特征，但在日径流模拟中 TRMM 数据对部分洪水过程模拟不够精准，洪峰、洪量及峰现时间不如站点模拟精准，对洪峰模拟偏大偏小不稳定。在月径流模拟中，站点模拟与实测径流的纳西效率系

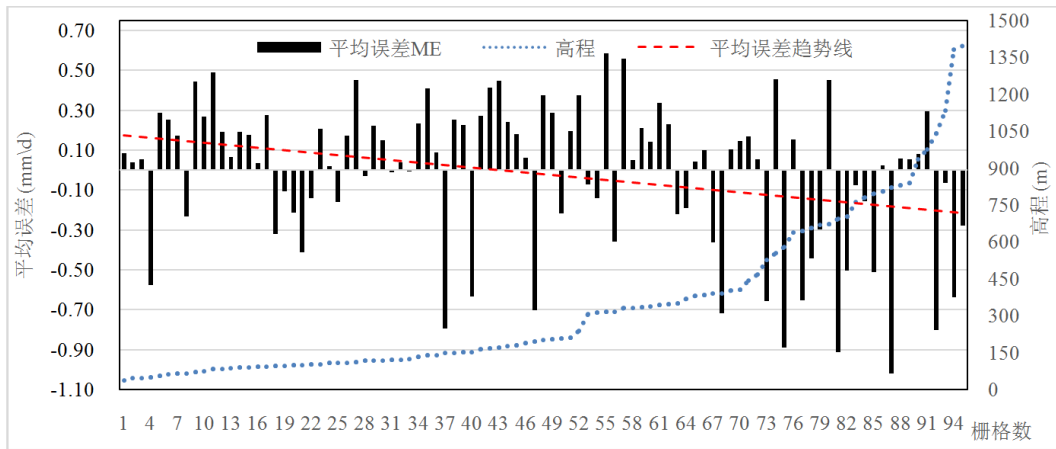


Figure 4. The trend of average error with elevation change at 95 TRMM-grid
 图 4. 95 个栅格平均误差随高程变化趋势

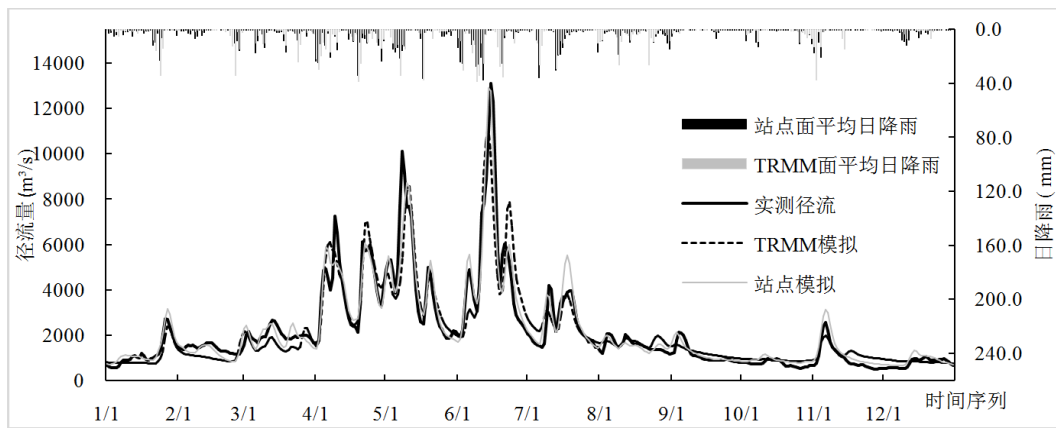


Figure 5. Comparison of daily streamflow hydrograph at the Xiangtan station in calibration period (2001)
 图 5. 率定期 2001 年湘潭站日径流过程对比

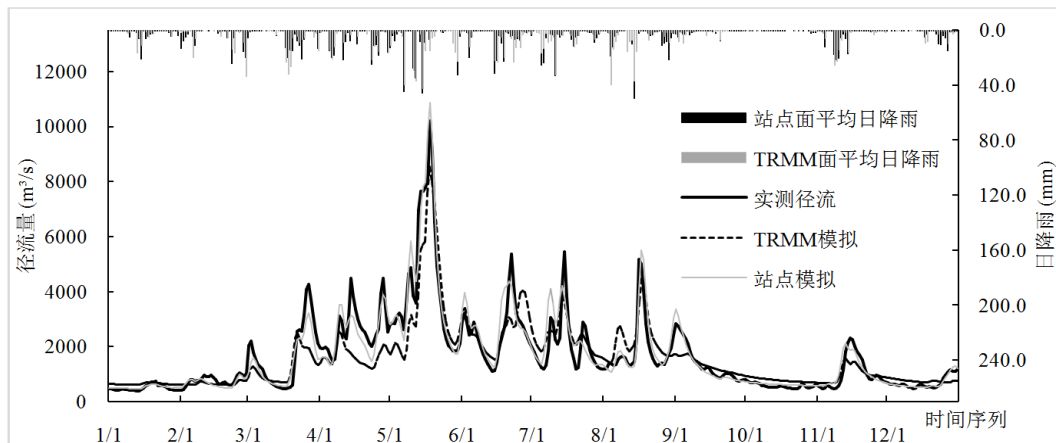


Figure 6. Comparison of daily streamflow hydrograph at the Xiangtan station in validation period (2004)
 图 6. 检验期 2004 年湘潭站日径流过程对比

数为 0.99，水量相对误差为 0.1%；而 TRMM 数据模拟径流与实测径流的纳西效率系数为 0.92，水量相对误差为 -2.9%。图 7 展示了月径流模拟的对比效果：总体上 TRMM 数据月径流模拟效果较好，基本与实测径流资料

Table 5. Evaluation indexes of streamflow hydrograph at the Xiangtan station
表 5. 湘潭站径流过程评价指标值

评价指标	纳希效率系数 NSE		水量相对误差 RE(%)		年份
	站点	TRMM	站点	TRMM	
日径流率定期	0.95	0.78	0.7	-1.8	1998~2002
日径流验证期	0.95	0.84	0.5	-3.6	2003~2005
月径流	0.99	0.92	0.1	-2.9	1999~2005

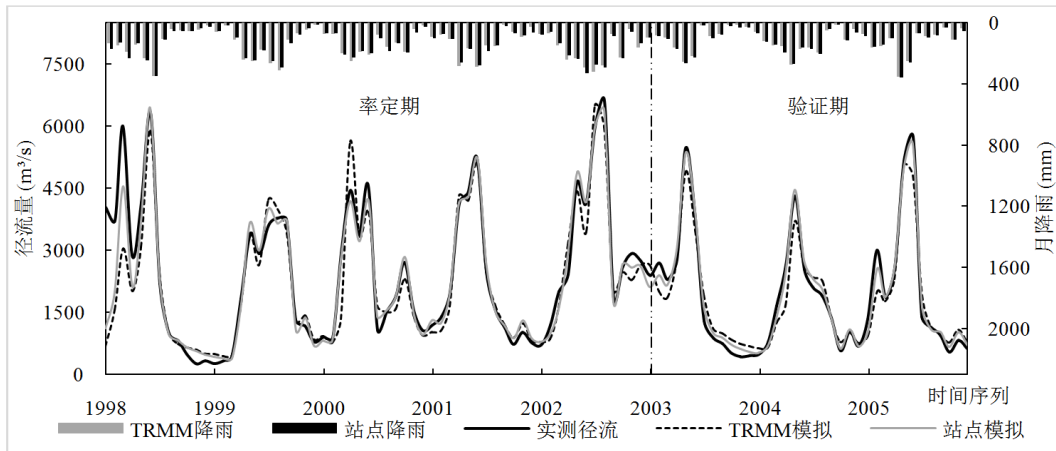


Figure 7. Comparison of monthly streamflow hydrograph at the Xiangtan station (1998~2005)

图 7. 湘潭站月径流过程对比(1998~2005)

一致且偏差较小，相对日径流模拟效果更好；1998 年为模型预热期模拟初期偏差稍大，在其他年份 TRMM 的模拟效果均不错。综上，径流模拟表明 TRMM 降雨数据模拟流量与实测流量资料大致吻合，精度比站点低，月径流模拟优于日径流模拟，水量模拟上整体表现为低估，偏差在可接受范围内。该结果与日、月尺度的降雨数据精度和流域内降雨整体低估的结论一致，相互印证。

4. 结论

本文对比了 1998 年至 2005 年湘江流域 TRMM 3B42 V7 产品与雨量站点降雨数据，基于流域和栅格的空间尺度及日、月的时间尺度对 TRMM 降雨数据的精度进行评估，同时分析了不同时期、雨强级别及高程等因素对精度的影响，并将上述两种数据输入新安江模型模拟径流过程，通过与实测径流资料对比分析了径流模拟效果。得到以下结论：

1) TRMM 卫星降雨数据与站点观测数据相关性较好，偏差在可接受范围内。从时间尺度上，TRMM 数据月精度明显优于日精度。从空间尺度上，TRMM 数据在流域尺度的表现相对栅格尺度要好：在流域尺度下 TRMM 与站点面雨量相关系数为 0.83，在可接受范围内；在栅格尺度下两者相关系数在 0.59~0.72 之间，精度有待提高。

2) TRMM 日降雨在不同时期、不同雨强级别和不同高程下数据表现不同且精度有差异。研究区内总体表现为在湿润季节相对于干旱季节 TRMM 与站点面雨量数据相关性更高。在对各雨强级别的估计上，TRMM 对小强度降雨偏低估，而对强降雨和无雨事件偏高估。在雨量大小的估计上：流域尺度下 TRMM 面雨量数据相对站点插值面雨量数据整体表现为低估；但栅格尺度下 TRMM 降雨估计偏差受高程影响，表现为在较高程较大区域倾向低估降雨，而在高程较低区倾向高估降雨。说明 TRMM 数据对区域雨量高估还是低估，与该区域空间范围及区域内地形有关，可进一步深入研究地形地势对 TRMM 精度的影响。

3) TRMM 降水数据的月径流模拟效果比日径流模拟效果好, 均在可接受范围, 同时侧面反映了 TRMM 数据精度良好。但 TRMM 的模拟效果在洪峰、洪量及峰现时间方面不如站点精准, 后期通过对 TRMM 数据精度订正提高其应用价值具有可行性。

综上所述 TRMM 测雨精度较好, 且根据 TRMM 数据在不同时期、雨强、高程下的规律, 后期可进一步深入研究, 以期通过分期、分雨强级别及结合地形高程等对 TRMM 进行精度订正, 尤其需要改进 TRMM 的日精度。为其更好地应用于水文模拟及预报、水资源规划及管理等方面奠定基础, 并使其更具应用价值。

基金项目

国家自然科学基金重点项目(51539009)。

参考文献 (References)

- [1] 李景刚, 李纪人, 黄诗峰, 等. 基于 TRMM 数据和区域综合 Z 指数的洞庭湖流域近 10 年旱涝特征分析[J]. 资源科学, 2010, 32(6): 1103-1110.
LI Jinggang, LI Jiren, HUANG Shifeng, et al. Characteristics of the recent 10-year flood/drought over the Dongting Lake Basin based on TRMM precipitation data and regional integrated Z-index. Resources Science, 2010, 32(6): 1103-1110. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] 杨绍锴, 吴炳方, 熊隽, 等. 基于 TRMM 降水产品计算月降水量距平百分率[J]. 遥感信息, 2010(5): 62-66.
YANG Shaoe, WU Bingfang, XIONG Juan, et al. Calculation of monthly precipitation anomaly percentage using TRMM rainfall product. Remote Sensing Information, 2010(5): 62-66. (in Chinese)
- [4] KOO, M. S., HONG, S. Y. and KIM, J. An evaluation of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) multi-satellite precipitation analysis (TMPA) data over South Korea. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 45(3): 265-282.
- [5] 白爱娟, 刘长海, 刘晓东. TRMM 多卫星降雨分析资料揭示的青藏高原及其周边地区夏季降雨日变化[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 704-714.
BAI Aijuan, LIU Changhai and LIU Xiaodong. Diurnal variation of summer rainfall over the Tibetan Plateau and its neighboring regions revealed by TRMM multi-satellite precipitation analysis. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(3): 704-714. (in Chinese)
- [6] 白爱娟, 方建刚, 张科翔. TRMM 卫星资料对陕西及周边地区夏季降雨的探测[J]. 灾害学, 2008, 23(2): 41-45.
BAI Aijuan, FANG Jiangan and ZHANG Kexiang. Summer rainfall in Shaanxi and its neighborhood regions observed by TRMM satellite. Journal of Catastrophology, 2008, 23(2): 41-45. (in Chinese)
- [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. Shuikexue Jinzhan/Advances in Water Science, 2010, 21(3): 343-348. (in Chinese)
- [8] 谷黄河, 余钟波, 杨传国, 等. 卫星雷达测雨在长江流域的精度分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(8).
GU Huanghe, YU Zhongbo, YANG Chuanguo, et al. Application of satellite radar observed precipitation to accuracy analysis in Yangtze River Basin. Water Resources & Power, 2010, 28(8). (in Chinese)
- [9] 李相虎, 张奇, 邵敏. 基于 TRMM 数据的鄱阳湖流域降雨时空分布特征及其精度评价[J]. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1164-1170.
LI Xianghu, ZHANG Qi and SHAO Min. Spatio-temporal distribution of precipitation in Poyang Lake Basin based on TRMM data and precision evaluation. Progress in Geography, 2012, 31(9): 1164-1170. (in Chinese)
- [10] 吴雪娇, 杨梅学, 吴洪波, 等. TRMM 多卫星降水数据在黑河流域的验证与应用[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 310-319.
WU Xuejiao, YANG Meixue, WU Hongbo, et al. Verifying and applying the TRMM TMPA in Heihe River Basin. Journal of Glaciology & Geocryology, 2013, 35(2): 310-319. (in Chinese)
- [11] 蔡研聪, 金昌杰, 王安志, 等. 中高纬度地区 TRMM 卫星降雨数据的精度评价[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3296-3306.
CAI Yancong, JIN Changjie, WANG Anzhi, et al. Accuracy evaluation of the TRMM satellite-based precipitation data over the mid-high latitudes. The Journal of Applied Ecology, 2014, 25(11): 3296-3306. (in Chinese)
- [12] 高洁. 基于 TRMM 卫星数据的降雨测量精度评价[J]. 水力发电, 2015(6): 28-31.
GAO Jie. Accuracy assessment of rainfall measurement based on TRMM products. Water Power, 2015(6): 28-31. (in Chinese)

- [13] 李威, 蒋平, 赵卫权, 等. TRMM 卫星降水数据在喀斯特山区的适用性分析——以贵州省为例[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 97-102.
LI Wei, JIANG Ping, ZHAO Wei-quan, et al. Analysis on applicability of TRMM precipitation data in Karst Areas——A case study in Guizhou province. Research of Soil & Water Conservation, 2016, 23(1): 97-102. (in Chinese)
- [14] 杨雨蒙, 杜鹃, 程琳琳. TRMM 卫星降水数据在湖南省的精度和可靠性评定[J]. 水资源与水工程学报, 2016(1).
YANG Yumeng, DU Juan and CHENG Linlin. Evaluation of accuracy and reliability of TRMM satellite precipitation data in Hunan province. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016(1). (in Chinese)
- [15] XUE, X., HONG, Y., LIMAYE, A. S., et al. 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? Journal of Hydrology, 2013, 499(13-14): 91-99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.042>
- [16] ZULKAFI, Z., BUYTAERT, W., ONOF, C., et al. A comparative performance analysis of TRMM 3B42 (TMPA) versions 6 and 7 for hydrological applications over Andean-Amazon River Basins. Journal of Hydrometeor, 2014, 15(2): 581-592. <http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-13-094.1>
- [17] 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.032>
- [18] 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)
- [19] 赵晶晶, 袁飞, 江善虎, 等. TMPA 卫星降水数据质量评估及水文过程模拟[J]. 水电能源科学, 2012(12): 10-12.
ZHAO Jingjing, YUAN Fei, JIANG Shanhu, et al. Evaluation of TMPA satellite rainfall data and its application in hydrologic process simulation. Water Resources & Power, 2012(12): 10-12. (in Chinese)
- [20] 江善虎, 任立良, 雍斌, 等. TRMM 卫星降水数据在冰河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)
- [21] 周萌, 江善虎, 任立良. TRMM 卫星降水数据在小尺度流域的评估与应用[J]. 水文, 2016(1).
ZHOU Meng, JIANG Shanhu and REN Liliang. Application of TRMM satellite precipitation data in small-scale watershed. Journal of China Hydrology, 2016(1). (in Chinese)
- [22] 杨纫章. 湘江流域水文地理[J]. 地理学报, 1957, 23(2): 161-181.
Yang Jenchang. Hydrography of the Hsiang-Kiang Basin, Hunan province. Acta Geographica Sinica, 1957, 23(2): 161-181. (in Chinese)
- [23] HENG, T., HEUVELINK, G. B. M. and STEIN, A. Comparison of Kriging with external drift and regression-Kriging. Technical Note, 2003.
- [24] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6).
ZHAO Renjun, WANG Peilan. The parameters analysis of Xin'anjiang model. Journal of China Hydrology, 1988(6). (in Chinese)
- [25] DUAN, Q., SOROOSH, S. and VIJAI, G. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Research, 1992, 28(4): 1015-1031. <http://dx.doi.org/10.1029/91WR02985>