

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0117

刘洁, 夏军, 邹磊, 等. 多卫星遥感降水数据在塔里木河流域的适用性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 01-08. LIU J, XIA J, ZOU L, et al. Applicability analysis of multi satellite remote sensing precipitation data in Tarim River basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 01-08. (in Chinese)

多卫星遥感降水数据在塔里木河流域的适用性分析

刘洁¹, 夏军^{1,2}, 邹磊², 王强¹, 余江游³

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程院重点实验室, 北京 100101;

3. 中国电建集团 昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650051)

摘要: 资料缺乏地区由于其复杂的地形, 站点布设困难, 实测资料匮乏, 遥感降水产品是实测资料的有益补充及替代。以塔里木河流域的子流域开都孔雀河流域为研究区, 采用国家基准气象站观测的降水量为基准数据, 评估了 TRMM 3B42RT、TRMM 3B42V7、CMORPH RAW、CMORPH CRT 等四种遥感降水产品的精度。同时, 在塔里木河的子流域玉龙喀什河流域, 基于 SRM 模型, 评估了以上几种遥感降水产品模拟径流的适用性。结果表明, TRMM 3B42V7 的精度最高, TRMM 3B42RT 的精度较低, CMORPH 在山区的精度也较高, 而 CMORPH 在平原地区高估了降水量; 在四种遥感降水产品中, TRMM 3B42V7 最适于模拟径流, 可以基本表征日径流变化过程。

关键词: 遥感降水数据; 融雪径流模型; 塔里木河流域; 精度评估; 径流模拟

中图分类号: P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0001-08

Applicability analysis of multi-satellite remote sensing precipitation data in Tarim River basin

LIU Jie¹, XIA Jun^{1,2}, ZOU Lei², WANG Qiang¹, YU Jiangyou³

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Kunming Engineering Corporation Limited of PowerChina, Kunming 650051, China)

Abstract: Because of the complex terrain in the cold and dry region, there are few stations and little measured data. Remote sensing precipitation product is a useful supplement to the measured data. Based on the observed precipitation data from the surface meteorological stations, taking Kaikong River sub basin of Tarim River basin as the study area, we evaluated the accuracy of four remote sensing precipitation products, TRMM 3B42RT, TRMM 3B42V7, CMORPH RAW and CMORPH CRT. Meanwhile, in the Yurungkash River sub basin, based on the SRM model, we evaluated the applicability of the above remote sensing precipitation products for runoff simulation. The results showed that TRMM 3B42RT had low accuracy while the TRMM 3B42V7 had the highest accuracy. CMORPH had high accuracy in mountainous areas, but overestimated the precipitation in plain areas. Among the four kinds of remote sensing precipitation products, TRMM 3B42V7 was the most suitable for runoff simulation, and could basically characterize the process of daily runoff.

Key words: remote sensing precipitation data; snow melt runoff model; Tarim River basin; accuracy assessment; runoff simulation

收稿日期: 2018-04-15 修回日期: 2018-07-16 网络出版时间: 2018-08-02
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180731.1049.002.html>
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA06003702)

Fund: National Key R & D Program of China (2017YFA06003702)

作者简介: 刘洁(1993-), 女, 山西太原人, 主要从事水文水资源研究。E-mail: liujie16@whu.edu.cn

通讯作者: 夏军(1954-), 男, 湖北孝感人, 中国科学院院士, 博士生导师, 长期从事水文学及水资源方面研究。E-mail: xiaj@igsrr.ac.cn

降水是水文循环系统的基本要素,准确观测降水对于区域及全球的水资源管理、水文过程模拟、干旱预警及洪水预报等起着至关重要的作用^[1]。获取降水数据最直接的方式是布设气象或雨量观测站点,但在发展中国家与环境恶劣的地区,站网布设密度往往较低或无站点布设,空间代表性不足^[2]。在乏资料地区,尤其在难以到达的偏远山区和沙漠,受地理因素的影响,降水观测困难加大。为解决上述地面降水观测方式的不足,世界各国相继发射了搭载着不同传感器的气象卫星,并采用传感器实时传回地面的不同波段数据联合地面雨量站数据进行校正,开发出了不同版本的实时与滞时遥感降水产品。代表性产品有:TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)^[3]、CMORPH (the Climate Prediction Center MORPHing technique)^[4]、CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data)^[5]、PERSIANN (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks)^[6]等。遥感降水产品因能提供高精度和连续时间序列的栅格降水数据而在各类水文研究中被广泛应用。受数据源和反演算法等因素的影响,不同遥感降水产品的精度表现各异;受时间尺度、地形、气候等因素的影响,同一遥感降水产品在不同区域的精度也存在差异。因此,在使用遥感降水产品之前,应全面认识和比较遥感降水产品的精度特征。

目前已有一些关于遥感降水产品在塔里木河流域的适用性研究。当前研究多侧重于评估 TRMM 数据的精度,例如蔡晓慧等^[7]分析了 TRMM 3B43 月降水在西北内陆河流域的适用性,卢新玉等^[8]研究了 TRMM 3B43 月降水产品在新疆地区的适用性,杨艳芬等^[9]研究了 TRMM 数据在西北干旱区的探测能力。也有一些研究基于分布式水文模型研究了多源降水的精度,例如阚宝云等^[10]基于 VIC 模型在塔里木河的子流域叶尔羌河上游流域对 CMORPH、TRMM 3B42V6、APHRODITE、ITPCAS 等 4 套降水数据集的适用性进行了分析,刘俊等^[11]基于 SWAT 模型分析了 CMADS、ITPCAS、TRMM 3B42V7 等 3 套降水数据产品在玉龙喀什河流域内对降水的模拟情况。上述研究多侧重于单一遥感降水产品相较于实测降水数据的精度评估,尤其是对 TRMM 3B43 月降水数据的评估,故之前的研究未能给塔里木河流域逐日径流模拟中多源遥感降水数据较实测降水数据的可替代性提供全面的依据与支持;同时,塔里木河河流源区空间变异性

大,但考虑分区地形因素,明晰不同地形区多源遥感降水产品精度特征的研究相对较少。

为全面认识和比较遥感降水产品的精度特征,本文以塔里木河流域为研究对象,分别在平原与山区,对多种遥感降水产品在不同时间尺度的精度特征进行了评价,并基于 SRM (Snowmelt Runoff Model) 融雪径流模型评估了各遥感降水产品模拟径流的适用性,从而为其在水文过程模拟中的应用提供依据和支持。

1 研究区概况

塔里木河位于新疆南部,是我国最大的内陆河,流域总面积 102 万 km²。塔里木河是环塔里木盆地的 9 大水系 144 条河流的总称,其中,阿克苏河、叶尔羌河、和田河、开都-孔雀河(以下简称为开孔河)四条源流和塔里木河干流组成“四源一干”^[12]。河流主要发源于山区,河水主要源自高山冰雪融水、中山森林带降水和低山基岩裂隙水^[13]。

开孔河是塔里木河的四大源流之一,地理位置位于 82° 57' E-90° 39' E、40° 25' N-43° 21' N 之间^[14]。流域内地势西北高东南低,海拔高度在 749~4 485 m 之间,其中,山区面积 3.1 万 km²,平原面积 2.6 万 km²。开孔河流域的国家基准气象站相对较多,且在平原区、山区均分布有 1 个以上的气象站点,有较好的空间代表性。因此本文选择开孔河流域作为遥感降水产品精度评估的流域(图 1(a)),其气象站点分布及基本信息见表 1。和田河也是塔里木河的四大源流之一,和田河有东、西两条支流,本文选择和田河东支玉龙喀什河古孜洛克水文站以上的流域研究遥感降水产品模拟径流的适用性(图 1(b))。该区域集水面积 14 575 km²,海拔差 5 039 m,土地类型主要为裸地、草地和冰川^[11],其中冰川主要分布在海拔 4 700 m 到 6 500 m 的区域内^[15]。玉龙喀什河流域的出山口控制站是同古孜洛克水文站,该站以上的区域内没有设置国家基准气象站,距离玉龙喀什河流域最近的国家基准气象站是流域外

表 1 开孔河气象站基本信息

Tab. 1 Basic information of the meteorological stations in Kaikong River basin

地貌	区站号	站名	纬度(N)	经度(E)	海拔/m
山区	51542	巴音布鲁克	43° 02'	84° 09'	2458
	51467	巴仑台	42° 44'	86° 18'	1739
	51567	焉耆	42° 05'	86° 34'	1055.3
平原	51642	轮台	41° 47'	84° 15'	976.1
	51656	库尔勒	41° 45'	86° 08'	931.5

的和田气象站。本文选择的两个小流域同属塔里木河流域,属典型的温带大陆性荒漠气候区,气候特点

是干燥少雨,蒸发强烈,多风沙、浮尘天气^[16],具有较强的相似性,适于作比较研究。

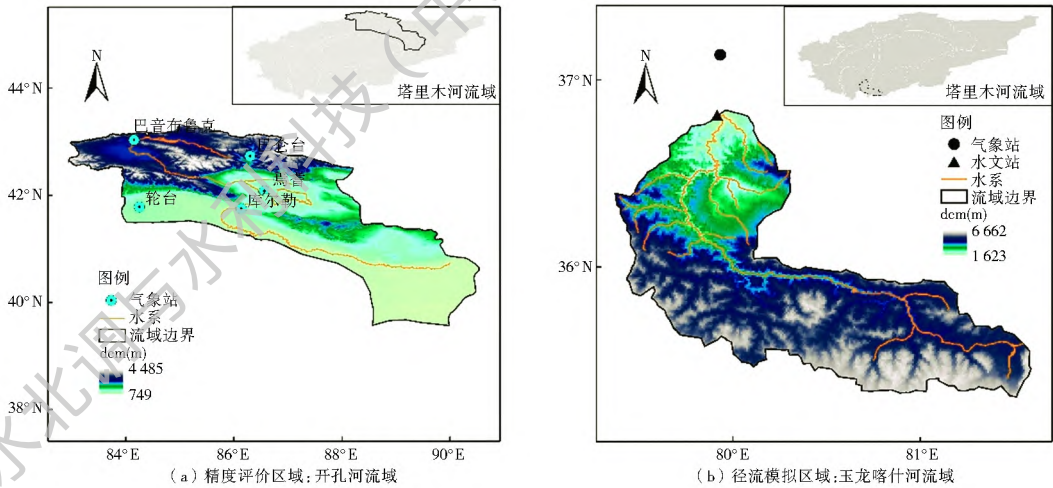


图 1 研究区域概况

Fig. 1 The map of the study area

2 资料与方法

2.1 降水数据介绍

基准降水数据主要用于评价遥感降水产品在塔里木河流域的估计精度。文中地面观测数据采用的是 5 个国家基准气象站 2001– 2014 年的逐日降水数据(表 1),数据来自国家气象信息中心提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。

本文选取常用的 TRMM 3B42V7、TRMM 3B42RT、CMORPH RAW、CMORPH CRT 四种遥感降水产品开展精度评价研究,时间范围为 2001– 2014 年。TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)是由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)与日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)联合开发的用于气象与气候降水研究的卫星。TRMM 3B42 产品由 TPMA(TRMM Multi satellite precipitation analysis)算法反演得到,其中 TRMM 3B42RT 是近实时产品,TRMM 3B42V7 是经 GPCP 月降水数据校正的产品^[3]。CMORPH 产品是美国 NOAA 气候预测中心(Climatic Prediction Center, CPC)基于 MORPHing 技术估计的降水产品。该技术将基于多个低轨道卫星的被动微波降水估计和来自多个同步卫星的红外辐射数据相结合^[4]。其中 CMORPH RAW 是实时产品,CMOPRH CRT 是经 CPC 和 GPCP 校正偏差的产品。以上 4 种遥感降水产品的具体信息见表 2。本文使用已逐日合成的遥感降水产品,提取出与气象站点位置对应的栅

格降水量,与实测降水量进行比较分析。

表 2 遥感降水产品基本信息

Tab. 2 Basic information of remote sensing precipitation products

产品名称	空间分辨率	时间分辨率	覆盖范围
TRMM 3B42RT	0.25°	3 h	60°S– 60°N
TRMM 3B42V7	0.25°	3 h	50°S– 50°N
CMORPH RAW	0.25°	3 h	60°S– 60°N
CMORPH CRT	0.25°	3 h	60°S– 60°N

2.2 SRM 模型

本文使用 SRM 模型模拟径流。SRM 模型结构简单,采用度日因子计算融雪径流,常用于年内径流过程的模拟。模型的输入变量包括日降雨资料、日气温资料和积雪覆盖资料,适用于资料相对缺乏的地区,特别是难以观测地面资料的高山流域。SRM 模型的基本思路是:计算当日积雪融化的产流量和降水产流量,并且将当日的融雪、降水产流量叠加到前一日的退水流量上,进而得到当日的径流量,具体的计算公式如下:

$$Q_{n+1} = [C_s \cdot a \cdot (T_n + \Delta T) \cdot S_n + C_r \cdot P_n] \times \frac{A \times 10000}{86400} \cdot (1 - k_{n+1}) + Q_n \cdot k_{n+1} \quad (1)$$

式中: Q 为日平均流量(m^3/s); C 为径流系数,其中 C_s 和 C_r 分别表示融雪径流系数和降雨径流系数; a 为度日因子($cm \cdot ^\circ C^{-1} \cdot d^{-1}$),表示每天气温升高 $1^\circ C$ 产生的融雪深度; T 为度日因子数($^\circ C \cdot d$); ΔT 为由气温直减率得出的在不同高程带的度日因子数修正值; S_n 为积雪覆盖率; P 为降水径流补给(cm); A 为流域面积(km^2); k 为退水系数; n 为研究时段

内天数的序号; 10000/86400 是将径流深化为径流量的转换系数。

模型在应用时, 一般将流域划分为不同的高程分带, 在每个分带都用式(1)计算径流量, 总的径流量值为各个高程分带计算出的径流量之和。本文将流域分为 6 个高程带, 具体的高程分带信息见表 3。模型使用遗传算法进行参数率定。

表 3 玉龙喀什河流域分带面积与平均高程

Tab. 3 The zoning area and average elevation of the Yurungkash River basin

高程带	高程范围 /m	面积 /km ²	占比 (%)	平均高程 /m	温度梯度 /℃
A	1 283~2 700	1 323.50	9.06	2 298.71	6.00
B	2 701~3 700	2 248.50	15.40	3 188.99	11.79
C	3 701~4 700	2 169.75	14.86	4 253.34	18.71
D	4 701~5 200	2 486.00	17.03	4 975.71	23.40
E	5 201~5 700	3 238.50	22.18	5 442.49	26.44
F	5 701~6 777	3 135.00	21.47	6 017.82	30.18

玉龙喀什河流域内没有国家基准气象站点, 因此气象数据选择距离流域最近的和田气象站。气温数据选择和和田气象站的逐日气温数据, 降水数据选择和和田气象站的逐日降水数据与遥感降水产品在和田气象站对应位置栅格的降水量, 其中和田气象站的数据来自国家气象信息中心提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。文中使用的水文数据是同古孜洛克水文站的逐日实测流量数据。文中使用的积雪数据是由美国冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center)提供的 MOD10A2 产品。该产品由连续 8 天的 MOD10A1 数据合成, 反映的是 8 天内最大的积雪覆盖范围, 其空间分辨率为 500 m^[18]。将积雪覆盖率进行插值, 得到每天的积雪覆盖率。用于 SRM 模型模拟径流的水文气象积雪数据的时间范围均为 2003 年 1 月 1 日至 2012 年 12 月 31 日。

2.3 精度评估方法

本文使用定量指标与分类指标评估遥感降水产品的精度。定量指标中, 相关系数 R 反映了遥感降水同地面雨量站降水的线性相关程度; 平均绝对误差 M_{AE} 和均方根误差 R_{MSE} 反映了遥感降水同地面雨量站降水平均误差的大小; 相对偏差 B_{IAS} 反映了遥感降水数据的系统偏差程度。分类指标反映了遥感降水产品对日降水时间发生可能性的估计能力, 包括探测率 P_{OD} 、空报率 F_{AR} 、成功系数 C_{SI} 。探测率 P_{OD} 反映了遥感降水产品对降水事件的漏报程度; 空报率 F_{AR} 反映了遥感降水产品对降水事件的错报程度; C_{SI} 反映了遥感降水产品成功观测到降水

事件的比例。各指标的具体公式及最优值见表 4。

表 4 遥感降水产品评估的统计指标

Tab. 4 The statistical indexes of remote sensing precipitation product evaluation

指标	公式	最优值
相关系数(R)	$R = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - G)(P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - G)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}}$	1
相对偏差(B_{IAS})	$B_{IAS} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n G_i} - 1$	0
平均绝对误差(M_{AE})	$M_{AE} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - G_i }{n}$	0
均方根误差(R_{MSE})	$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - G_i)^2}{n}}$	0
探测率(P_{OD})	$P_{OD} = \frac{H}{H + M}$	1
空报率(F_{AR})	$F_{AR} = \frac{F}{H + F}$	0
成功系数(C_{SI})	$C_{SI} = \frac{H}{H + M + F}$	1

表 4 公式中: G_i 和 P_i 分别表示第天的基准降水量与遥感产品降水量; H 为遥感降水数据和地面雨量站同时有雨的频数; M 是遥感数据无雨而地面雨量站有雨的频数; F 为遥感降水数据有雨而地面雨量站无雨的频数。本文判断是否有雨的阈值是 $0.1 \text{ mm}^{[19]}$ 。

本文采用 Nash 效率系数(N_{SE})与相关系数(R)作为评价 SRM 模型结果精度的指标。 N_{SE} 、 R 的计算见式(2)、式(3):

$$N_{SE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q)^2} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q)(Q'_i - Q')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q'_i - Q')^2}} \quad (3)$$

式中: Q 为实测流量(m^3/s); Q' 为模拟流量(m^3/s); Q 为实测流量均值(m^3/s); Q' 为模拟流量均值(m^3/s); n 为序列长度。

3 结果分析

3.1 降水精度对比分析

开孔河流域各气象站点的实测降水与各类遥感降水产品的多年平均降水量见图 2。根据图 2 可知, TRMM 3B42RT 严重高估了降水量, TRMM 3B42V7 数据较为准确, 在山区(51542 巴音布鲁克,

51467 巴仑台), CMORPH RAW 和 CMORPH CRT 对年均降水量的估计较为精确,而在平原地区(51567 焉耆, 51642 轮台, 51656 库尔勒), CMORPH RAW 和 CMORPH CRT 都严重高估了年均降水量。

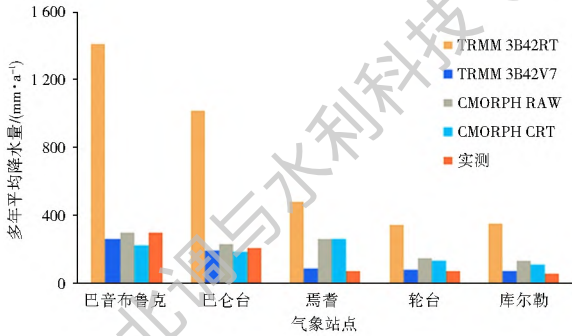


图 2 开孔河流域各类遥感降水产品及实测降水的多年年均降水量

Fig. 2 Multi-year average precipitation of various remote sensing precipitation products and measured precipitation in the Kaikong River basin

为了直观展示网格尺度上降水产品的精度,文中给出了五个气象站点与所处降水网格在日和月时间尺度上的泰勒图(图 3)。泰勒图中,在横坐标方向,定义距原点一个单位的点为观测值其半径长度,表示标准差的变化幅度,纵坐标为表征遥感降水产品较实测降水值的标准差,距离观测点的长度表示误差,与纵坐标的角度代表相关系数^[20]。因此,泰勒图可直观看出不同遥感降水产品与地面雨量站点实测降水资料的偏差,模拟值距离观测点的长度越短,表示模拟值越接近于观测值。如图 3 所示,产品 A 距离观测点的距离最远,表示 TRMM 3B42RT 的精度最低,产品 B 距离观测点的距离最近,表示 TRMM 3B42V7 的精度最高,产品 C 与产品 D 在泰勒图中的位置相近,表示 CMORPH RAW 与 CMORPH CRT 的精度相近;随着时间尺度的扩展,相关性增大。

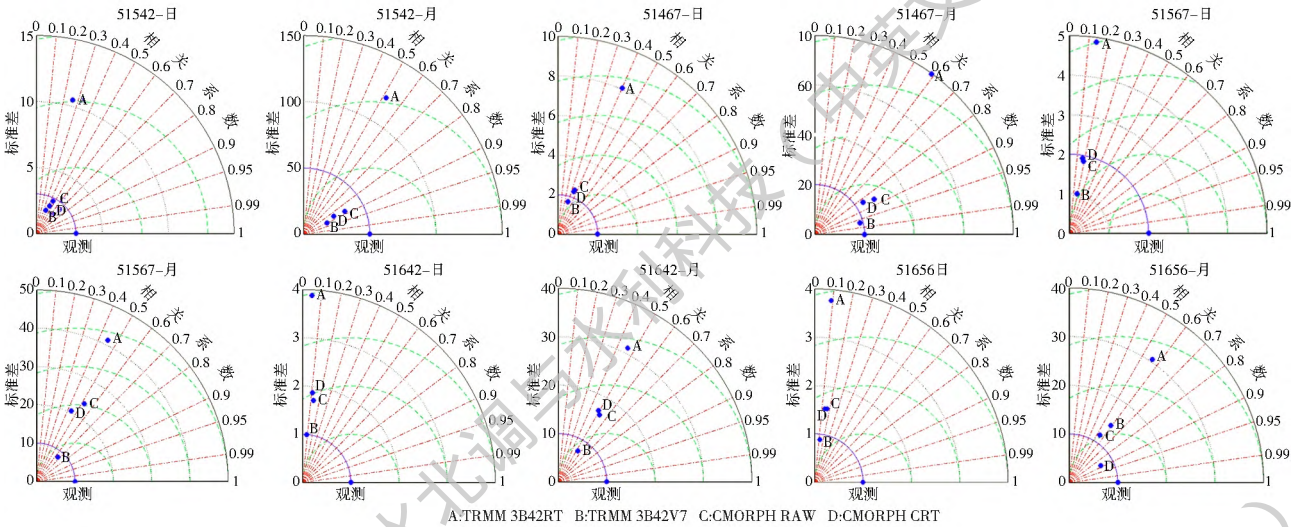


图 3 各站点实测降水与遥感降水的泰勒图

Fig. 3 Taylor diagrams of observed precipitation and remote sensing precipitation at five stations

遥感降水产品在山区及平原地区的日尺度精度评估结果分别见表 5、表 6。据表 5 和表 6,在日尺度上,就 M_{AE} 与 R_{MSE} 而言,遥感数据在平原区的精度较高,其中 TRMM 3B42RT 的精度最低,TRMM 3B42V7 的精度较高,而 CMORPH 的两种产品的精度相近;就其他指标而言,遥感数据在山区站的精度较高,其中 TRMM 3B42RT 的误差比较大,其余三种产品的精度相近,但经校正的 TRMM 3B42V7 与 CMORPH CRT 的 B_{IAS} 为负值,表现为对实测降水的低估。

在月时间尺度上,一般不需考虑遥感降水产品的分类估计精度指标。同时, B_{IAS} 在日、月时间尺度上的数值是倍比关系,故在月尺度上,只评估 R 、

M_{AE} 、 R_{MSE} 等三个指标。遥感降水产品在山区及平原地区的月尺度精度评估结果分别见表 7、表 8。时间尺度由日扩展到月,遥感降水产品的精度有一定程度的提高。据表 7 和表 8,无论在山区还是平原地区,TRMM 3B42V7 的精度都显著高于其他产

表 5 山区网格日尺度精度评估结果

Tab. 5 The accuracy evaluation results of the daily and grid scale of the mountainous area

产品名称	R	M_{AE}	R_{MSE}	$B_{IAS}(\%)$	P_{OD}	F_{AR}	C_{SI}
TRMM 3B42RT	0.32	3.07	9.25	383.25	0.62	0.59	0.33
TRMM 3B42V7	0.32	0.62	2.79	-10.73	0.52	0.55	0.32
CMORPH RAW	0.39	0.73	2.96	5.30	0.53	0.55	0.32
CMORPH CRT	0.38	0.55	2.86	-19.57	0.50	0.52	0.33

表 6 平原格网日尺度精度评估结果

Tab. 6 The accuracy evaluation results of the daily and grid scale of plain areas

产品名称	R	M_{AE}	R_{MSE}	$B_{IAS}(\%)$	P_{OD}	F_{AR}	C_{SI}
TRMM 3B42RT	0.10	1.15	4.39	513.54	0.36	0.81	0.14
TRMM 3B42V7	0.13	0.22	1.55	22.86	0.30	0.78	0.14
CMORPH RAW	0.16	0.49	2.02	176.98	0.48	0.82	0.15
CMORPH CRT	0.14	0.46	2.09	160.97	0.46	0.82	0.15

品, TRMM 3B42RT 的精度最低, CMORPH RAW 与 CMORPH CRT 的精度相近。总体上看, 就相关系数而言, 遥感降水产品在山区的精度较高; 而较其他两种指标来说, 遥感降水产品在平原地区精度较高。胡庆芳等^[19]指出, 在地形复杂的地区, 卫星传感器对降水信息的反映能力相对较低, 高程对遥感降水产品的精度有一定的影响。另一方面, 有研究表明^[21], 遥感降水的检测算法倾向于检测到较大的降水, 而对微量降水的把握不好, 在开孔河流域, 山区降水多, 平原降水少, 因此探测到山区降水的可能性更大。根据以上精度评估结果, 在塔里木河流域, 从总体上看, TRMM 3B42V7 的精度最高。

表 7 山区格网月尺度精度评估结果

Tab. 7 Accuracy evaluation results of grid and monthly scale of mountainous areas

产品名称	R	M_{AE}	R_{MSE}
TRMM 3B42RT	0.55	81.07	121.46
TRMM 3B42V7	0.93	18.70	12.44
CMORPH RAW	0.87	22.09	16.00
CMORPH CRT	0.85	16.88	15.60

表 8 平原格网月尺度精度评估结果

Tab. 8 Accuracy evaluation results of grid and monthly scale of plain areas

产品名称	R	M_{AE}	R_{MSE}
TRMM 3B42RT	0.47	28.52	42.03
TRMM 3B42V7	0.68	6.57	6.91
CMORPH RAW	0.51	14.82	19.07
CMORPH CRT	0.45	13.96	17.92

3.2 模拟径流与实测径流对比

使用流域附近的和田气象站的实测降水资料率定模型参数。表 9 展示各年内实测降水驱动 SRM 模型的 N_{SE} 与 R 。

因篇幅原因, 以下仅展示效果较好的 2009 年。使用流域附近的和田气象站的实测降水资料率定模型参数, 经遗传算法优化率定的参数为: 融雪径流系数 0.395, 降雨径流系数 0.9, 度日因子 0.207。基

于此套参数, 使用不同遥感降水产品作为驱动数据驱动 SRM 模型模拟径流。不同降水输入的径流模拟结果见图 4, 采用 N_{SE} 与 R 对径流模拟结果进行评估, 结果见表 10。

表 9 各年内实测降水驱动 SRM 模型的 N_{SE} 与 R Tab. 9 The N_{SE} and correlation coefficient table of SRM model driven by measured precipitation in different years

年份	N_{SE}	R	年份	N_{SE}	R
2003	0.52	0.72	2008	0.55	0.74
2004	0.49	0.71	2009	0.75	0.87
2005	0.43	0.66	2010	0.66	0.83
2006	0.52	0.72	2011	0.54	0.74
2007	0.47	0.69	2012	0.46	0.68

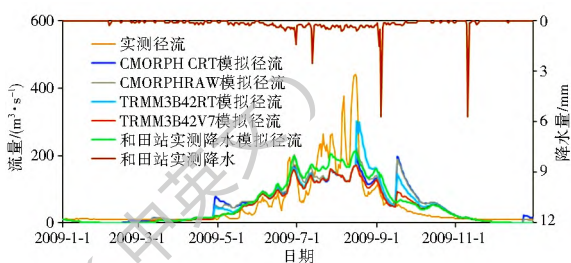


图 4 各类遥感降水产品径流模拟图

Fig. 4 The runoff simulation of various remote sensing precipitation products

表 10 各类遥感降水产品模拟径流的 N_{SE} 、 R Tab. 10 N_{SE} and R correlation coefficient table for simulated runoff of various remote sensing precipitation products

降水数据	N_{SE}	R
CMORPH RAW	0.57	0.76
CMORPH CRT	0.56	0.75
TRMM 3B42RT	0.58	0.76
TRMM 3B42V7	0.65	0.84
和田气象站实测降水	0.75	0.87

据图 4, 该流域发生前三场次较强降水时(6 月底、7 月中旬、9 月初), SRM 模型较好地模拟了径流; 流域发生第四场较强降水时(11 月中旬), 流域大部分区域气温已低于 0°C , 故没有直接产流。由图 4 与表 10 可知, 利用和田气象站的降水资料基本上可以较好地模拟玉龙喀什河流域的径流过程。我们注意到, 8 月中旬并未发生强降水事件, 但 SRM 模型对洪峰模拟的效果相对较差, 这可能是由于未准确考虑该流域以气温主导的融雪过程在夏季对径流贡献的比例比较大。根据杨针娘等^[22]的研究, 在玉龙喀什河流域, 冰雪融水对径流的贡献比例约为 66.4%, 但该流域的气温资料代表性不足。对各类遥感降水产品而言, TRMM 3B42V7 模拟径流的精度最高, 可以基本表征日径

流变化过程,这与前面多种降水产品精度评估的结果是一致的。

4 结论与展望

本文以塔里木河的子流域开孔河流域为研究对象,评估了 TRMM 3B42RT、TRMM 3B42V7、CMORPH RAW、CMORPH CRT 等四种遥感降水产品的精度;并在塔里木河流域的子流域玉龙喀什河流域,基于 SRM 模型,研究了各种遥感降水产品的适用性。主要得到以下结论。

(1) 四种遥感降水产品与地面气象站点实测降水有不同程度的偏差,其中 TRMM 3B42V7 的精度整体相对较高,CMORPH 在山区的精度也较为准确。

(2) 基于多种降水产品进行径流模拟,TRMM 3B42V7 相较其余产品更加适用于塔里木河流域的径流模拟,可以基本表征日径流变化过程。

SRM 模型中使用简单的气温阈值法判断降水状态,此方法不够准确。新一代遥感降水产品 GPM 可区分降水的状态,在缺乏资料地区应用有着巨大的可能性^[23]。在资料缺乏地区,应该进一步加强对气温数据、降水数据的观测,以提高模型的模拟精度。

参考文献(References):

- [1] EBERT E E, JANOWIAK J E, KIDD C. Comparison of near real time precipitation estimates from satellite observations and numerical models[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(1): 47-64. DOI: 10.1175/BAMS-88-1-47.
- [2] JAVANMARD S, YATAGAI A, NODZU M A, et al. Comparing high resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM_3B42 over Iran[J]. *Advances in Geosciences*, 2010, 25(25): 119-125. DOI: 10.5194/adgeo-25-119-2010.
- [3] HUFFMAN G J, BOLVIN D T, NELKIN E J, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined sensor precipitation estimates at fine scales[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(1): 38-55. DOI: 10.1175/JHM560.1.
- [4] JOYCE R J, JANOWIAK J E, ARKIN P A, et al. Cmorph: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(3): 287-296. DOI: 10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2.
- [5] FUNK C, PETERSON P, LANDSFELD M, et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes[J]. *Scientific Data*, 2015, 2(9): 150066. DOI: 10.1038/sdata.2015.66.
- [6] HSU K, GAO X, SOROOSHIAN S, et al. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36(9): 1176-1190. DOI: 10.1175/1520-0450(1997)036<1176:PEFRSI>2.0.CO;2.
- [7] 蔡晓慧, 邹松兵, 陆志翔, 等. TRMM 月降水产品在西北内陆河流域的适应性定量分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2013(3): 291-298. (CAI X H, ZOU S B, LU Z X, et al. Evaluation of TRMM monthly precipitation data over the inland river basins of Northwest China[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2013(3): 291-298. (in chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0455-2059.2013.03.002.
- [8] 卢新玉, 魏鸣, 王秀琴, 等. TRMM-3B43 降水产品在新疆地区的适用性研究[J]. *国土资源遥感*, 2016, 28(3): 166-173. (LU X Y, WEI M, WANG X Q, et al. Applicability research on TRMM-3B43 precipitation over Xinjiang[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2016, 28(3): 166-173. (in chinese)) DOI: 10.6046/gtzyyq.2016.03.26.
- [9] 杨艳芬, 罗毅. 中国西北干旱区 TRMM 遥感降水探测能力初步评价[J]. *干旱区地理(汉文版)*, 2013, 36(3): 371-382. (YANG Y F, LUO Y. Evaluation on detective ability of TRMM remote sensing precipitation in arid region of northwest China[J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(3): 371-382. (in chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2013.03.008.
- [10] 阙宝云, 苏凤阁, 童凯, 等. 四套降水资料在喀喇昆仑山叶尔羌河上游流域的适用性分析[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 710-722. (KAN B Y, SU F G, TONG K, et al. Analysis of the applicability of four precipitation datasets in the upper reaches of the Yarkant River, the Karakorum[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 710-722. (in chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0081.
- [11] 刘俊, 刘时银, 上官冬辉, 等. CMADS、ITPCAS 和 TRMM 3B42 3 套降水数据集在玉龙喀什河流域的适用性评价[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(5): 28-37. (LIU J, LIU S Y, SHANGGUAN D H, et al. Applicability evaluation of precipitation datasets from CMADS, ITPCAS and TRMM 3B42 in Yurungkax River Basin[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power*, 2017, 38(5): 28-37. (in chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-5634.2017.05.004.
- [12] 段建军, 王彦国, 王晓风, 等. 1957-2006 年塔里木河流域气候变化和人类活动对水资源和生态环境的影响[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(5): 781-791. (DUAN J J, WANG Y G, WANG X F, et al. Impact of climate change and human activities on the water resources and ecological environments in the Tarim River Basin in 1957-2006[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 781-791. (in chinese))
- [13] 杨鹏, 陈亚宁, 李卫红, 等. 2003-2012 年新疆塔里木河径流量变化与断流分析[J]. *资源科学*, 2015, 37(3): 485-493. (YANG P, CHEN Y N, LI W H, et al. Analysis of changes in runoff and drying in the Tarim River from 2003 to 2012[J]. *Resources Science*, 2015, 37(3): 485-493. (in chinese))
- [14] 田霖, 孟凡浩, 刘铁, 等. 干旱典型山区 CFSR 降水数据的偏差校正方法研究—以新疆开孔河流域为例[J]. *干旱气象*, 2017, 35(2): 313-320. (TIAN L, MENG F H, LIU T, et al. Com

- parison of bias correction methods for CFSR reanalysis precipitation data in typical arid mountainous regions: A case study in Kaikong River Basin[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2017, 35(2): 313-320. (in chinese) DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-02-0313.
- [15] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. *地理学报*, 2015, 70(1): 3-16. (LIU S Y, YAO X J, GUO W Q, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3-16. (in chinese) DOI: 10.11821/dlxb201501001.
- [16] 刘海涛, 张向军, 李绣东, 等. 和田河流域 1954-2007 年气温及降水气候特征分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2009, 3(4): 26-30. (LIU H T, ZHANG X J, LIX D, et al. Climatic characteristics of temperature and precipitation in Hetian River Basin during 1954-2007[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2009, 3(4): 26-30. (in chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1002-0799.2009.04.006.
- [17] 刘俊峰, 杨建平, 陈仁升, 等. SRM 融雪径流模型在长江源区冬克玛底河流域的应用[J]. *地理学报*, 2006, 61(11): 1149-1159. (LIU J F, YANG J P, CHEN R S, et al. The simulation of snowmelt runoff model in the Dongkemadi River Basin, Headwater of the Yangtze River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1149-1159. (in chinese) DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2006.11.004.
- [18] 黄晓东, 张学通, 李霞, 等. 北疆牧区 MODIS 积雪产品 MOD10A1 和 MOD10A2 的精度分析与评价[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(5): 722-729. (HUANG X D, ZHANG X T, LI X, et al. Accuracy analysis for MODIS snow products of MOD10A1 and MOD10A2 in Northern Xinjiang Area[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(5): 722-729. (in chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2007.05.008.
- [19] 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(4): 447-459. (HU Q F, YANG D W, WANG Y T, et al. Accuracy and spatiotemporal variation of high resolution satellite rainfall estimate over the Ganjiang River Basin. *Sci China Tech Sci*, 2013(4): 447-459. (in chinese) DOI: 10.1360/092012-1091.
- [20] 邹磊, 夏军, 陈心池, 等. 多套降水产品精度评估与可替代性研究[J]. *水力发电学报*, 2017, 36(5): 36-46. (ZOU L, XIA J, CHEN X C, et al. Accuracy evaluation and substitutability analysis of multiple precipitation products for gauge based observation[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(5): 36-46. (in chinese) DOI: 10.11660/slfdbx.20170505.
- [21] CHEN S, HONG Y, CAO Q, et al. Intercomparison of precipitation estimates from WSR 88D radar and TRMM measurement over continental United States[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2015, 53(8): 4444-4456. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2399307.
- [22] 杨针娘. 中国冰川概论[M]. 北京: 科学出版社, 1988, 187-204. (YANG Z N. The introduction to glacier in China[M]. Beijing: Science Press, 1988, 187-204. (in Chinese))
- [23] TANG G, MA Y, LONG D, 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. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.008.

郑重声明

《南水北调与水利科技》自创刊以来, 从未委托任何中介机构、网站及个人征稿, 请广大读者、作者提高警惕, 不要通过他人投稿, 更不要向他人或不明机构缴纳任何费用。

《南水北调与水利科技》编辑部