

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

刘俊^{1,2,4}, 刘时银^{1,3}, 上官冬辉¹, 徐敬东⁴

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 101407;

3. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 600500; 4. 新疆阿克苏水文勘测局, 新疆 阿克苏 843000)

摘要:我国西北地区地形复杂、环境恶劣、气象观测水平有限,在海拔较高的山区缺乏长期观测资料。再分析气象数据集(产品)基于气象卫星、数值模拟等技术,结合站点实测资料制作而成,具有时空分辨率高、可靠性好等优点,越来越多地被应用于大气水文相关的研究工作中。选择西北典型的高寒山区流域为研究对象,首先分析3套具有代表性的再分析气象数据产品(CMADS、ITPCAS和TRMM 3B42)降水资料在研究区年际和年内的分布情况,然后利用3套降水资料驱动SWAT水文模型,将模型模拟的结果与水文站实测径流资料进行比较,并进行参数率定和敏感性分析,从而分析3套数据集在研究区对降水的模拟效果。最终获得以下结论:3套降水资料在流域内的降水量分布情况存在较大差异,CMADS和ITPCAS数据集在降水总量上大于TRMM 3B42数据集,且CMADS数据集的年际降水和年内降水分布与冰川分布较为一致;3套再分析数据产品中,CMADS数据集驱动水文模型的模拟效果最好,逐日、月的NSE系数达到0.53、0.71,ITPCAS和TRMM 3B42数据集的NSE系数较低,径流模拟效果较差。

关键词:CMADS; ITPCAS; TRMM 3B42; 降水数据集; SWAT水文模型; 径流模拟; 适用性评价

中图分类号:TV125; P94

文献标识码:A

文章编号:1002-5634(2017)05-0028-10

我国西北地区地形复杂,气候条件恶劣,河流多以冰雪融水补给,水资源系统在全球气候变化背景下显得十分脆弱^[1]。西北高寒山区由于其特殊的地理环境,对其进行长期的气象观测十分困难,而现有气象站点又多分布于低海拔地区,较难代表高海拔地区的降水分布情况,不能满足流域尺度水文和水资源的评估需求,常常利用气候模式或再分析资料作为其替代数据。全球气候模式的空间尺度较大,但缺少对地表复杂环境的考虑,不能直接应用于区域和局地气候预测^[2]。区域气候模式具有较高的空间分辨率,同时考虑到区域下垫面条件的变化,其在对气象因子的模拟上比全球气候模式有了较大的改善,但是,由于环流场偏差和物理过程偏差,在

应用过程中仍然存在较大误差^[3-4]。大气再分析数据产品是使用经过严格筛选的站点实测数据、气象卫星数据,结合气候模式,通过数据同化技术制作而成的历史观测数据集^[5-7]。再分析资料的降水场是在基本真实的环流场强迫下,由数值预报模式计算输出的,其可靠程度更高^[8]。基于再分析资料在空间和时间上具有的连续性、高精度、高分辨率的特点,其在国内外应用十分广泛。目前,已有很多学者采用再分析数据集来驱动水文模型,如:FUKA等^[9]利用CFSR(Climat Forecast System Reanalysis)数据集驱动流域水文模型,得到的模拟结果甚至好于传统站点实测数据的模拟结果。XU等^[10]在长江流域,采用WFD(WATCH Forcing Data)和APHRODI-

收稿日期:2017-06-02

基金项目:中国科学院重点部署项目“新疆山区径流水资源预测模型研制”(KZZD-EW-12-1);科技部科技基础性工作专项“中国西部主要冰川作用中心冰量变化调查”(2013FY111400)。

作者简介:刘俊(1993—),男,陕西商洛人,硕士研究生,从事寒区水文模型方面的研究。E-mail:liujun16@mails.ucas.ac.cn。

通信作者:刘时银(1960—),男,河南信阳人,教授,博导,博士,从事冰川变化及其影响方面的研究。E-mail:Shiyin.liu@ynu.edu.cn。

TE(Asian Precipitation Highly Resolved Observational Data Integrations Towards Evaluation of the water resources) 数据集分别驱动了新安江模型和 SWAT 模型,效果较好。孟现勇等^[11-12]在黑河和精博河流域运用 CMADS(the China Meteorological Assimilation Driving Datasets for the SWAT model) 等数据集来驱动水文模型,并取得了较好的效果。

降水分布具有高度的时空分异性和不确定性。高寒山区的地-气相互作用复杂,海拔、冰川都是影响降水的重要因素^[13]。通常,降水随着海拔的增加呈现出先增大后减小的趋势,即存在一个相对高度,降水从山前到该高度下随海拔的升高而增加,超过该高度后开始减少^[14]。根据赵成义等^[15]对新疆 102 个气象站 50 年来降水数据的分析研究结果可知,新疆地区海拔 < 2 500 m 的区域,降水随海拔的增加而增加;海拔 > 2 500 m 的地区,降水随海拔的增加先增大后减小。杨兴国、沈永平等^[16-17]的研究表明,冰川也是造成降水异常的因素。冰川区表面反射率高,水热过程强烈,其温度低、湿度高的区域环境与周围环境形成明显差异,使得对流加强形成多降水过程,观测资料同样指出了冰川区的降水量比河谷地区的降水量多数倍甚至十几倍。由于这种高度的不确定性,各种再分析数据集在山区的适用情况也存在较大差异。阚宝云等^[18]在叶尔羌河上游流域对 4 套降水数据集(CMORPH、TMPA 3B42、APHRODITE、ITPCAS)的适用性进行了分析,结果表明,4 套降水产品所模拟的降水量在时空分布上均存在较大差异且水文模型的模拟效果各异。TUO 等^[19]利用 SWAT 模型,选择山区作为研究区域,对比分析了站点数据、反距离权重差值数据、CHIRPS(Climatic Hazards Group Infra Red Precipitation with Station data)和 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)降水资料作为驱动数据的模拟效果,结果表明,不同驱动数据下参数的敏感性和率定结果不同。此外,评价气象数据产品适用性情况的研究案例还有很多^[20-23],不再赘述。

不同的再分析数据集对实测数据的筛选和利用方式不同。不同的气象卫星观测数据,根据不同的数据融合技术制作而成,对同一个地区的模拟能力将存在差异。利用再分析气象数据产品时,需要对数据产品在研究区的适用性进行评估,从而选择合适的降水数据产品。评估数据产品是否可靠的最有效方式是利用气象站实测数据与再分析数据进行对比,可是,在西北高寒山区,由于缺少气象站实测资料,无法利用此方法评估再分析数据集。而流域

出山口一般均设有水文站点,可利用再分析数据集驱动水文模型,将水文模型输出的模拟值与水文站点的实测值进行对比分析,进而评价再分析数据集是否适用于研究区,是可行且相对可靠的方式。本研究选择和田河支流玉龙喀什河作为研究区域。玉龙喀什河地形复杂,且上游分布着大量的冰川,属于典型的高寒山区,流域内无气象站点分布,无法通过实测降水资料对再分析数据在该流域内降水的计算情况进行验证。但是,可以利用流域出山口通古孜洛克水文站的实测径流资料。因此,本研究利用 3 套降水数据产品(CMADS V1.1、ITPCAS 和 TRMM 3B42)对 2008—2014 年研究区的年际和年内季节降水量的时空分布情况进行分析;然后利用分布式水文模型 SWAT 进行径流模拟,并根据实测径流数据对比分析 3 套降水数据集在流域出山口水文站的径流模拟效果,进而分析 3 套再分析数据集在流域内对降水的模拟情况。

1 研究区概况

和田河流域位于塔里木盆地南部,昆仑山北麓,属于温带大陆性荒漠气候,全年干旱、少雨、多风沙,流域面积近 75 900 km²,绿洲面积 4 100 km²^[24]。和田河有东、西两条支流^[25-26],本研究选择和田河东支玉龙喀什河(玉河)河源至通古孜洛克水文站之间的流域作为研究区。玉龙喀什河上游流域示意图如图 1 所示。

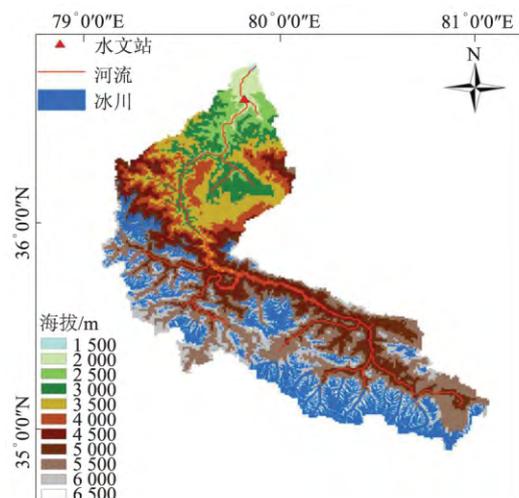


图 1 玉龙喀什河上游流域示意图

玉龙喀什河上游流域河长 340 km,集水面积 14 575 km²,土地类型主要以裸地、草地和冰川为主。研究区内最高海拔 6 598 m,最低海拔 1 471 m,海拔差达到 5 127 m。根据第二次冰川编目资料^[27],玉河流域共有冰川 1 294 条,总面积 2 881.03 km²,主要分

布在海拔 4 700 m 到 6 500 m 之间。和田河流域位于欧亚大陆腹地,东南季风无法到达,北部天山山脉阻挡了来自西伯利亚的水汽,南部受青藏高原和昆仑山阻挡,来自印度洋的暖湿空气难以进入,造成和田地区水汽匮乏。和田县多年平均气温 12.2 ℃,多年平均降水量 33.4 mm,多集中在 5—7 月^[26]。受地形影响,和田地区的气温由山区向平原升高,降水则相反^[28]。

2 材料与方法

2.1 地表数据

SWAT 模型需要的地表输入数据包括:数字高程模型(DEM)数据、流域河网数据、土地利用数据和土壤数据等。其中数字高程模型数据、土地利用数据和土壤数据均来源于“黑河计划数据管理中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)。其中:DEM 数据采用中国 1 km 分辨率数字高程模型数据集;土地利用数据采用 1 km 分辨率中国地区土地覆盖综合数据集中的 GCL 2000 数据集^[29];土壤数据采用基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(V 1.1)^[30]。SWAT 模型要求地表数据在输入时具有相同的投影和分辨率,因此在实验开始之前需将 DEM 数据、土地利用数据和土壤数据转换为相同的投影坐标系和分辨率。

2.2 气象数据

SWAT 模型中国大气同化驱动数据集(the China Meteorological Assimilation Driving Datasets for the SWAT model,CMADS)引入同化技术,利用数据循环嵌套、模式推算等多种科学手段而建立,具有多来源、多尺度和多分辨率的特点^[12]。CMADS V1.1 版本覆盖整个东亚(0°~65°N,60°~160°E),空间分辨率为 0.25°。CMADS 的源降水数据由多卫星数据与地面区域自动站的降水数据融合而成,其中中国区域的源降水数据是采用 CMORPH(Climate Prediction Center Morphing Technique)产品为背景场,

融合中国降水自动站的观测资料制作而成。此数据集最大的特点是按照 SWAT 模型规定的格式进行整理,在使用时不需要进行任何格式的转换即可直接输入模型。CMADS 的气温、气压、比湿、风速驱动数据利用 NCEP/GFS 为背景场,融合中国 2 421 个国家级气象局自动站的观测数据;降水数据利用 CMORPH 融合了我国近 40 000 个区域自动台站,数据可信度较高。因此,在使用 SWAT 模型模拟径流的过程中,除降水外,温、压、湿、风数据均以 CMADS 数据集为基准。

中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集(Institute of Tibetan Plateau Chinese Academy of Science,ITPCAS)利用 Princeton 再分析资料、GLDAS 资料、GEWEX-SRB 辐射资料以及 TRMM 降水资料为背景场,融合中国气象局常规气象观测数据制作而成^[31],包含近地面气温、近地面气压、近地面空气比湿、近地面全风速、地面向下短波辐射、地面向下长波辐射、地面降水率 7 个要素。其时间分辨率为 3 h,水平空间分辨率为 0.1°,时间序列长度为 1979—2015 年^[31]。

TRMM 3B42(TRMM(TMPA) Rainfall Estimate L3 3 hour 0.25 degree x 0.25 degree V7)是 TRMM 卫星与其他卫星联合反演的降水产品,可提供全球范围内 0.25°格点的 3 h 降水资料^[32]。TRMM 卫星是美国宇航局(NASA)和日本国家空间发展局(National Space Development Agency)联合研制的专门应用于定量测量热带、亚热带降水的卫星^[33]。3B42 降水产品首先对 TRMM 微波成像仪(TMI)资料进行订正,并联合 SSM/I、AMSR-E 和 AMSU-B 资料估算降水;其次利用全球降水气候计划(GPCP)的红外降水估值对微波降水进行订正,再利用微波和红外资料联合估值;最后再与逐月的雨量计观测资料匹配制作而成^[34]。CMADS、ITPCAS 和 TRMM 3B42 的基本资料见表 1。

表 1 CMADS、ITPCAS 和 TRMM 3B42 的基本资料

数据集	时间分辨率	水平空间分辨率	时间序列长度	本研究使用时间序列长度	载入流域站点个数
CMADS	1 d	0.25°	2008—2014 年	2008—2014 年	22
ITPCAS	3 h	0.10°	1979—2015 年	2008—2014 年	150
TRMM 3B42	3 h	0.25°	1997—2017 年	2008—2014 年	25

2.3 SWAT 水文模型

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)水文模型是美国农业部农业研究中心(USDA) Jeff Arnold

博士结合 GLEAMS 模型、CREAMS 模型和 EPIC 模型的优点在 SWRRB 模型基础上开发的一个基于不同流域尺度、时间上连续、物理机制的半分布式水文

模型^[35]。SWAT 水文模型是一个开放、发展的水文模型,在使用过程中被不断改进而日趋完善,能够与多种 GIS 平台集成,用户界面操作简便,代码容易获得,现已广泛应用于全球各地^[35]。SWAT 水文模型被应用于我国寒区流域进行相关分析的研究也越来越多,如黑河流域^[36]、石羊河流域^[37]、大通河流域^[38]、长江源区^[39]、玛纳斯河流域^[40]、乌鲁木齐河流域^[41]均在径流模拟中取得了不错的效果。由此可见,SWAT 水文模型在我国西北寒区流域进行径流模拟工作是可行的。因此,本文选用 SWAT 水文模型对玉河流域进行径流模拟,以此来分析 3 套降水数据集的适用性。

以 3 套降水数据集驱动 SWAT 水文模型进行径流模拟,采用纳什效率(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)系数、确定性系数 R^2 、相对偏差(PBLAS)作为评价指标^[42-43]分别对 3 个数据集的模拟结果进行评价。NSE 系数反映观测值与模拟值的拟合程度,系数越趋近于 1,说明模拟效果越好。一般, NSE 系数大于 0.5 则认为模型的模拟是较为成功的^[42]。 R^2 表征变量的相关程度,用于评价模拟值与实测值变化趋势的一致性,计算值越趋近于 1,说明模拟效果越好。PBLAS 表征模拟值与实测值之间的相对偏差,计算值越趋近于 0,说明效果越好^[43]。

2.4 SWAT-CUP 水文模型

水文模型是利用数学公式和物理方程描述复杂的水文过程,不可避免地要使用大量参数,且随着模型复杂程度的增加,参数的数量也随之增加,必须对水文模型进行参数率定和敏感性分析^[44]。参数率定可通过调整优化参数,使模型的模拟结果最大程度地接近实测值。SWAT 水文模型有 200 多个参数,但各个参数对研究区产汇流过程的影响程度不同,对模拟结果的敏感性也不同,需要对其进行敏感性分析^[43]。SWAT-CUP 水文模型是专门进行参数率定和敏感性分析的软件,使用十分简便^[44]。因此,本文将 SWAT 水文模型的模拟结果输入 SWAT-CUP 水文模型中进行模式参数率定和敏感性分析,进而对 3 套降水数据集的敏感性进行对比分析。

3 结果分析

3.1 3 套降水数据集的空间分布特征

在地形复杂的山区,海拔是影响降水分布的重要因素,采用基于高程的协克里金法进行空间插值获得的 2008—2014 年玉河上游流域多年平均降水量分布图和季节降水量分布图分别如图 2 和图 3 所示。图中采用分位数法对降水量进行分类,将 3 套降水数据集在流域内的年际和年内降水分为 7 个降水等级,等级越高表明降水量相对越大。

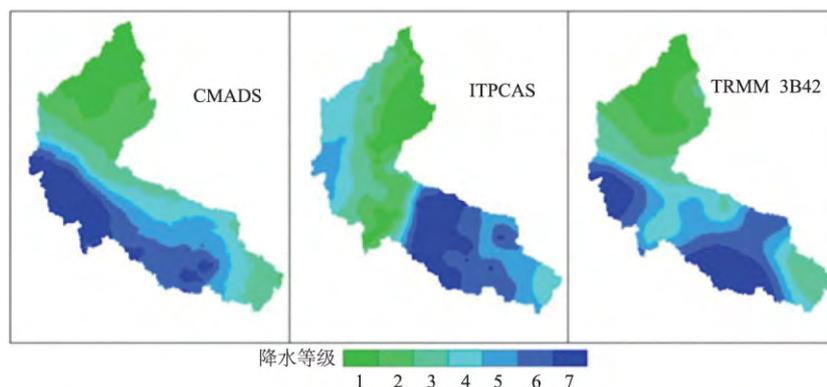


图 2 基于 CMADS、ITPCAS、TRMM 3B42 数据集的玉河上游流域多年平均降水量分布图

由图 2 可知:CMADS 数据集的第 6、7 等级降水区主要集中在流域的西南部;ITPCAS 数据集的第 6、7 等级降水区主要集中在流域的南部;TRMM 3B42 数据集的第 6、7 等级降水区主要分布在流域的西部和南部;在年降水量分布上,3 套数据集总体呈现出随着海拔升高,降水量先增大再减小的趋势。由历史资料可知,山前平原海拔较低,地势相对平坦,降水量相对较少;海拔上升到 2 500 m 左右,降水量开始增加,直到海拔 5 000 m 后,降水量又开始减少。

另外,冰川也是影响降水的重要因素,它会增强大气对流,增大冰川区的降水^[16],因此可从冰川分布特点分析流域大降水区的分布情况。在研究区内,冰川主要分布于流域的西部、西南部和南部。3 套数据集大体可以反映这一特性,但是 CMADS 数据集的大降水区分布特征与冰川的分布更为一致。

由图 3 可知:CMADS 数据集的第 7 等级降水区主要集中在流域的西部和南部;ITPCAS 数据集的第 7 等级降水区主要集中在流域的南部山区;TRMM 3B42

数据集的夏季降水量相对较少,第7等级降水区主要集中在流域南部的小范围地区;相比于夏季和冬季降水量,3套降水数据集在春、秋季节上的降水量分布

差异较小,CMADS和TRMM 3B42的第7等级降水区主要集中在流域的西部和南部,ITPCAS数据集的第7等级降水区主要集中于流域的西南部。

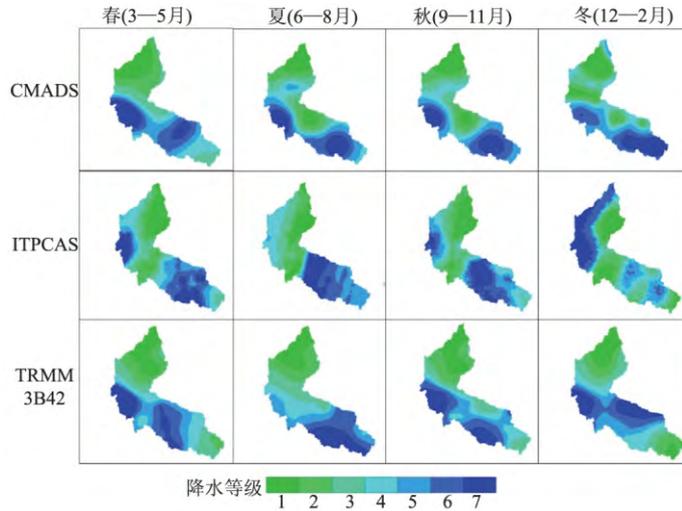


图3 基于CMADS、ITPCAS、TRMM 3B42数据集的玉河上游流域季节降水量分布图

2008—2014年3套降水数据集在研究区的季节及年降水量统计结果见表2。由表2可知:CMADS和ITPCAS数据集的年均降水量明显大于TRMM 3B42数据集,且约为TRMM 3B42数据集的

3倍;3套数据集年内各季节的降水量分布也存在差异,总体而言,3套数据集的年内降水量主要分布在夏季,夏季降水量分别占全年总降水量的39.5%、45.3%和35.4%。

表2 2008—2014年3套降水数据集在研究区的季节及年降水量的统计结果

数据集	春季		夏季		秋季		冬季		多年平均 降水量 /mm
	降水量 /mm	百分比 /%	降水量 /mm	百分比 /%	降水量 /mm	百分比 /%	降水量 /mm	百分比 /%	
CMADS	31.8	22.4	56.2	39.5	33.6	23.6	20.7	14.5	142.3
ITPCAS	48.4	26.2	84.4	45.3	38.0	20.4	15.2	8.1	186.0
TRMM 3B42	16.2	31.2	18.3	35.4	8.6	16.7	8.6	16.7	51.7

3.2 3套降水数据集驱动下的径流模拟

本文选择了20个与水文过程关系密切的参数

在SWAT-CUP水文模型中对SWAT的模拟结果进行率定,模型参数率定结果及敏感性排序见表3。

表3 模型参数率定结果及敏感性排序结果

参数名称	参数意义	取值范围	最终值			敏感性排序		
			CMADS	ITPCAS	TRMM 3B42	CMADS	ITPCAS	TRMM 3B42
CN2	SCS径流曲线数	-0.20~0.20	0.15	0.06	0.09	9	19	2
ALPHA_BF	基流α因子	0.000~1.000	0.400	0.155	0.520	20	5	12
GW_DELAY	地下水延时	0.0~500.0	27.5	417.0	442.5	3	16	11
GW_REVAP	地下水再蒸发系数	0.02~0.20	0.16	0.03	0.11	15	9	7
CH_N2	主河道曼宁系数	0.00~0.30	0.20	0.20	0.26	12	13	19
CH_K2	主河道有效渗透系数	5.00~130.00	26.90	88.12	49.37	8	3	16
ALPHA_BNK	河岸调蓄基流α因子	0.00~1.00	0.98	0.07	0.38	5	1	17
SOL_AWC	土壤有效含水率	-0.50~0.50	0.12	0.30	-0.25	16	7	20
SOL_K	土壤饱和导水率	-0.50~0.50	0.31	-0.15	-0.37	4	14	6
SFTMP	降雪基温/℃	-5.00~5.00	-0.50	-0.95	2.45	19	11	15
SLSUBBSN	平均坡长/m	-0.20~0.20	0.70	-0.19	-0.05	6	8	3
OV_N	坡面漫流的曼宁系数	-0.20~0.20	-0.11	-0.07	-0.13	14	15	14
SMTMP	融雪基温/℃	-5.00~5.00	4.75	1.00	4.05	17	17	9

续表

参数名称	参数意义	取值范围	最终值			敏感性排序		
			CMADS	ITPCAS	TRMM 3B42	CMADS	ITPCAS	TRMM 3B42
SMFMX	最大融雪因子	1.00 ~ 8.00	1.94	3.34	5.86	1	2	5
SMFMN	最小融雪因子	1.00 ~ 8.00	7.47	1.95	6.84	7	4	13
SURLAG	地表径流滞后系数	0.05 ~ 24.00	6.40	16.70	19.80	13	6	8
TIMP	积雪温度滞后因子	0.00 ~ 1.00	0.02	0.95	0.19	2	20	4
PLAPS	降水垂直变率/(mm/km)	0.00 ~ 300.00	246.50	286.15	276.75	11	12	10
TLAPS	温度垂直变率/($^{\circ}\text{C}/\text{km}$)	-8.00 ~ 0.00	-5.56	-0.52	-0.38	18	10	18
CH_K1	支流有效曼宁系数	0.0 ~ 300.0	244.5	10.2	22.5	10	18	1

考虑到高寒山区降水的特点,调大了 CMADS、ITPCAS 和 TRMM 3B42 3 套数据集的降水垂直变率 (PLAPS),分别调整为 246.50、286.15、276.75 mm/km。从表 3 中可以看出:CMADS 数据集的地下水延时 (GW_DELAY)、主河道有效渗透系数 (CH_K2)、支流有效曼宁系数 (CH_K1) 参数与另外两套数据集存在较大的差异;3 套数据集对于参数的敏感性也不尽相同,CMADS 数据集较为敏感的参数如最大融雪因子 (SMFMX)、积雪温度滞后因子 (TIMP) 与融雪过程相关,这与其他两个数据集不同,是造成模拟结果相差较大的重要原因。

3 套数据集逐日和逐月尺度对水文站实测径流过程的峰值和枯水期径流的模拟结果如图 4 和图 5 所示。由图 4 和图 5 可以看出:3 套数据集逐日和逐月尺度对水文站实测径流过程的峰值和枯水期径流的模拟效果较差。原因在于该流域主要受冰雪融水补给。夏季河流的径流量主要来自上游山区的冰雪融水,流量较大,但是模型并不具备模拟冰川变化过程的能力,造成 3 套数据集模拟的径流过程线在夏季没有出现较大的洪峰流量;而秋、冬枯水期,流域降水主要来源于固态降水,不会直接产生径流,3 套数据集在此阶段模拟的径流值基本接近于零。从 3 套数据集逐日、月的模拟效果来看,模拟的径流量过程线基本能够反映流域的径流过程,虽然降水总量上与实测径流资料存在较大的差距,但是基本上能反映出径流过程的大体趋势,模拟的径流过程与

实测径流过程呈正相关,对于枯水期流量的模拟效果较好,对于降级洪峰流量的模拟效果较差。

水文站实测径流与 CMADS、ITPCAS 和 TRMM 3B42 数据集逐月径流模拟结果如图 6 所示。3 套降水数据集模拟径流的结果评价见表 4。由图 6 和表 4 可以看出,CMADS 数据集的模拟效果最好,逐日、月 NSE 系数分别为 0.53、0.71,TRMM 3B42 数据集的模拟效果最不理想。

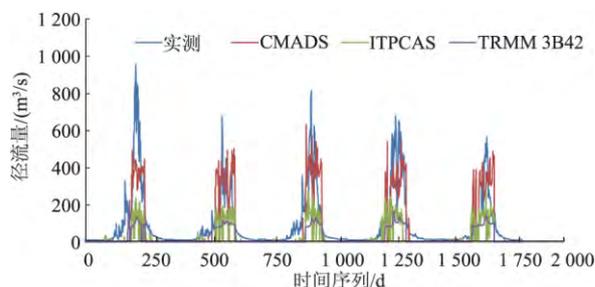


图 4 2010—2014 年水文站实测径流与 CMADS、ITPCAS 和 TRMM 3B42 数据集逐日径流模拟结果对比

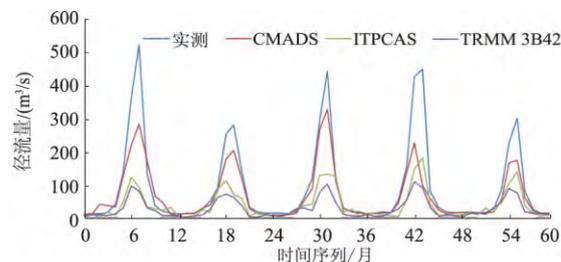


图 5 2010—2014 年水文站实测径流与 CMADS、ITPCAS 和 TRMM 3B42 数据集逐月径流模拟结果对比

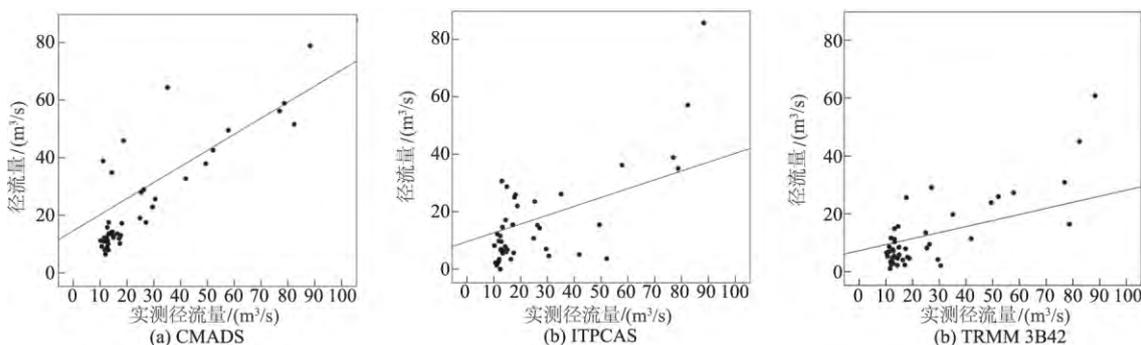


图 6 水文站实测径流与 CMADS、ITPCAS 和 TRMM 3B42 数据集逐月径流模拟结果对比

表4 3套降水数据集模拟径流的结果评价

数据集	逐日尺度			逐月尺度		
	NSE	R ²	PBLAS	NSE	R ²	PBLAS
CMADS	0.53	0.78	0.26	0.71	0.91	0.28
ITPCAS	0.21	0.70	0.70	0.32	0.88	0.59
TRMM 3B42	0.16	0.80	0.76	0.22	0.90	0.71

3.3 SWAT 水文模型对固态降水分布的模拟

在研究区内,固态降水主要发生在冬季(表2),3套数据集中冬季的降水分布相差较大,且占全年的比例较小。CMADS数据集的冬季大降水区主要分布在研究区的西部和南部,降水量占全年的14.5%;ITPCAS数据集的冬季大降水区主要集中在海拔较低的西部,流域的南部高海拔山区也有一部分降水,降水量占全年的8.1%;TRMM 3B42数据集的冬季大降水区分布较为均匀,主要分布在流域的中部和南部,降水量占全年的16.7%(图3)。SWAT水文模型根据降雪基温(SFTMP)参数,将输入模型的降水分为液态降水和固态降水。根据SWAT模型率定的结果,CMADS、ITPCAS和TRMM 3B42 3套降水的SFTMP参数的取值分别为-0.50、-0.95和2.45(表3)。基于CMADS、ITPCAS、TRMM 3B42数据集驱动SWAT水文模型模拟的研究区2010—2014年年均固态降水分布如图7所示。

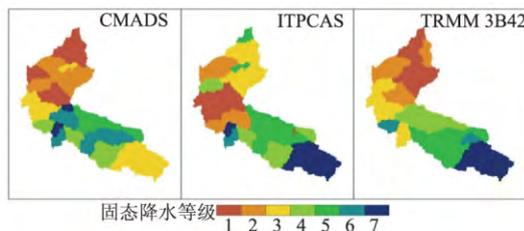


图7 基于CMADS、ITPCAS、TRMM 3B42数据集驱动SWAT水文模型模拟的年均固态降水分布

由图7可知:SWAT水文模型模拟的3套数据集固态降水的分布情况较为相似,其中CMADS数据集的第5、6、7等级固态降水区集中分布在流域的中部地区,南部的固态降水相对较少;而ITPCAS和TRMM 3B42数据集的对应等级固态降水集中分布在流域的中南部,且南部的降水量较大。

4 讨论与结语

4.1 讨论

我国西北地区限于复杂的地理环境和多变的气候状况,地区内气象数据观测工作难度大,运用再分析资料进行相关研究是解决缺乏实测资料这一问题的行之有效的方^[45-46]。笔者认为:不同数据集的

制作过程中,由于融合方法及数据源不同,导致对同一流域的降水估计存在显著差异。此外,笔者还发现:ITPCAS和TRMM 3B42数据集虽然在降水量上相差较大,但是在流域的分布上却十分相似。为此,笔者选择了距离研究区较近的民丰水文站(37.07°N, 82.72°E, ID: 51 839)的2008—2013年逐月降水信息(其中实测降水数据中的32 700值替换为0)与3套降水数据集对应的位置格点进行对比。2008—2013年民丰水文站实测逐月降水与3套降水数据集对应时段的模拟结果对比和评价如图8和表5所示。其中,ITPCAS数据集将TRMM 3B42的降水资料作为其源数据^[47],因此两者的表现能力较为趋近。

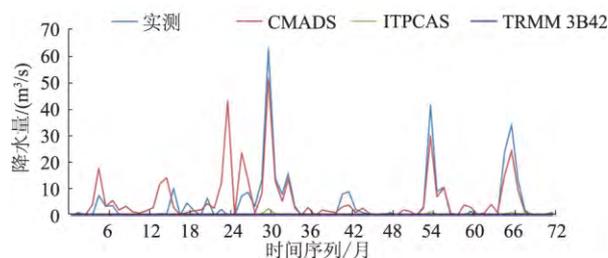


图8 民丰水文站实测逐月降水与3套降水数据集模拟结果对比

表5 民丰水文站逐月实测降水与3套降水数据集模拟结果评价

数据集	均值/mm	误差 RE	相对偏差(PBLAS)
实测	4.75	0.00	0.00
CMADS	5.74	-1.00	-0.21
ITPCAS	0.21	4.54	0.95
TRMM 3B42	0.00	4.75	1.00

分析结果验证了笔者的猜测,即:CMADS降水数据集与民丰水文站实测值的对比结果均较TRMM 3B42和ITPCAS数据集好,这说明降水数据的同化、融合方法及背景场对数据表现能力的影响巨大。TRMM卫星对于固态降水的捕捉能力较差,在降水稀少的西部地区的适用性不如东部地区,这可能是TRMM 3B42和ITPCAS数据集在径流模拟方面效果较差的部分原因。从而说明,合适的数据产品能够较为准确地反映流域降水等气候要素的地域分布及数量特征,如:在本次研究中CMADS数据集对玉河流域的模拟效果为最优。

SWAT水文模型是利用度日因子法来模拟融雪过程的,这会忽略冰川的变化过程,在径流模拟过程中只能将冰川视为裸地,因此,SWAT水文模型在冰川覆盖度较大地区的模拟能力较弱。在海拔较高的山区,大量降水冻结成冰,如ITPCAS数据集虽在降

水总量上大于 CMADS 数据集,但其在流域的高海拔山区固态降水上所占的比重较大(图 7),有大量的降水冻结于此,没有形成径流,造成径流过程线低于或小于 CMADS 数据集(图 4、图 5)。针对 SWAT 水文模型度日因子的弱势,国内外已有很多学者尝试改善该模型中相关的冰冻模块,如:孟现勇等^[48-49]针对模型的融雪模块进行了物理化改进;LUO 等^[50]也尝试在模型中加入冰川模块;YIN 等^[51]近期也在模型中加入了冰川模块,模拟结果有了很大的提高。对于受冰雪融水补给较大的河流,冰川变化过程显得至关重要。目前,模拟冰川水量变化的主要方式有度日模型、修正的度日模型以及能量平衡模型。在后续的工作中,在高寒山区使用再分析数据时,可以运用改进的 SWAT 水文模型或包含冰雪过程的水文模型如 VIC、HBV 等模型进行冰川区的径流模拟,以提高研究结果的精度。

4.2 结语

通过对比 3 套降水数据集在典型高寒山区流域的时空分布情况及对 SWAT 水文模型的驱动效果,评估了 3 套数据集在玉河上游流域的适用性,得出以下结论:

1) 3 套降水数据集在玉河上游流域的时空分布存在较大差异。在对降水总量的估算上,TRMM 3B42 数据集的降水总量小于其他两套数据集。基于在高海拔地区降水量随着海拔变化的情况,以及冰川区的降水变化情况,3 套降水数据集多年平均降水量在流域内遵从随着海拔的增加,降水量呈先增大后减小的规律,第 6、7 等级降水区主要集中在有冰川分布的地区。CMADS 数据集的分布情况较好,其次是 ITPCAS 数据集。

2) 将 3 套降水数据集分别输入 SWAT 水文模型进行径流模拟。CMADS 数据集的模拟效果最好,逐日、月 NSE 系数分别达到了 0.53、0.71;而其他两套数据集无法达到模型满意的标准。TRMM 3B42 数据集采用 TRMM 卫星对固态降水的捕捉能力较差,因此获得的固态降水量较小。以 TRMM 3B42 降水资料为源数据制作而成的 ITPCAS 数据集虽然降水量较大,但是主要分布在海拔较高的地区,实际产流较小。根据 SWAT 水文模型模拟的固态降水分布情况来看,CMADS 数据集固态降水在流域中部的分布较大,而 ITPCAS 和 TRMM 3B42 数据集固态降水在流域南部的分布较大。

3) 由于流域内缺乏实测的降水数据,本研究选取临近的民丰水文站对 3 套数据集进行了分析,发现 CMADS 数据集与观测站的结果最为接近。本研

究基于验证后的 3 套数据集对流域所在的昆仑山地区的气候特性进行分析发现:流域内降水主要集中在夏季。3 个数据集夏季降水在全年内的比例均比其他季节大。ITPCAS 数据集在 2008—2014 年的夏季的平均降水量占全年降水量的 45.3%,其次是 CMADS 数据集,夏季平均降水量占全年的 39.5%。

参 考 文 献

- [1] 陈亚宁,李稚,范煜婷,等.西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1295-1304.
- [2] 顾问,陈葆德,杨玉华,等. IPCC-AR4 全球气候模式在华东区域气候变化的预估能力评价与不确定性分析[J].地理科学进展,2010,29(7):818-826.
- [3] 张冬峰,石英.区域气候模式 RegCM3 对华北地区未来气候变化的数值模拟[J].地球物理学报,2012,55(9):2854-2866.
- [4] 林壬萍,周天军,薛峰,等. NCEP/NCAR 再分析资料所揭示的全球季风降水变化[J].大气科学,2012,36(5):1027-1040.
- [5] YATAGAI A, YASUTOMI N, HAMADA A, et al. APHRODITE: constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges [J]. American Meteorological Society, 2012, 93(9): 1401-1415.
- [6] HUFFMAN G J, ADLER R F, BOLVIN D T, et al. The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scale [J]. Hydrometeorol, 2009, 8(3): 237-247.
- [7] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553-597.
- [8] 胡增运,倪勇勇,邵华,等. CFSR、ERA-Interim 和 MER-RA 降水资料在中亚地区的适用性[J].干旱区地理,2013,36(4):700-708.
- [9] FUKA D R, WALTER M T, MACALISTER C, et al. Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(22): 5613-5623.
- [10] XU H, XU C Y, CHEN S, et al. Similarity and difference of global reanalysis datasets (WFD and APHRODITE) in driving lumped and distributed hydrological models in a humid region of China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 343-356.
- [11] 孟现勇,王浩,雷晓辉,等.基于 CMADS 驱动 SWAT 模式的精博河流域水文相关分量模拟、验证及分析[J].生态学报,2017,39(3):1-14.
- [12] 孟现勇,师春香,刘时银,等. CMADS 数据集及其在流

- 域水文模型中的驱动作用:以黑河流域为例[J]. 人民珠江 2016 37(7): 1-19.
- [13] MISH V. Climatic uncertainty in Himalayan watertowers [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres 2015 , 122(24): 1678-1688.
- [14] IMMERZEEL W W ,WANDERS N ,LUTZ A F ,et al. Reconciling high-altitude precipitation in the upper Indus Basin with glacier mass balances and runoff [J]. Hydrology and Earth System Sciences 2015 ,12(5): 4755-4784.
- [15] 赵成义 施枫芝 盛钰 等. 近50 a 来新疆降水随海拔变化的区域分异特征[J]. 冰川冻土 2011 33(6): 1203-1213.
- [16] 杨兴国,秦大河,秦翔. 冰川/积雪-大气相互作用研究进展[J]. 冰川冻土 2012 34(2): 392-402.
- [17] 沈永平,梁红. 高山冰川区大降水带的成因探讨[J]. 冰川冻土 2004 26(6): 806-809.
- [18] 阚宝云,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.
- [19] TUO Y ,DUAN Z ,DISSE M ,et al. Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: a case study in the Adige river basin (Italy) [J]. Science of the Total Environment 2016 573: 66-82.
- [20] 廖荣伟,张冬斌,沈艳. 6种卫星降水产品在中国区域的精度特征评估[J]. 气象 2015 41(8): 970-979.
- [21] 成璐,沈润平,师春香,等. CMORPH 和 TRMM 3B42 降水估计产品的评估检验[J]. 气象 2014 40(11): 1372-1379.
- [22] DIACONESCU E P ,GACHON P ,SCINOCCHA J ,et al. Evaluation of daily precipitation statistics and monsoon onset/retreat over western Sahel in multiple data sets [J]. Climate Dynamics 2015 45(5-6): 1325-1354.
- [23] KIM K ,PARK J ,BAIK J ,et al. Evaluation of topographical and seasonal feature using GPM IMERG and TRMM 3B42 over Far - East Asia [J]. Atmospheric Research , 2016 187: 95-105.
- [24] 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.
- [25] 吴益,程维明,任立良,等. 新疆和田河流域河川径流时序特征分析[J]. 自然资源学报 2006 21(3): 375-381.
- [26] 吴益. 和田河流域径流过程分析与模拟[D]. 南京: 河海大学 2006.
- [27] 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.
- [28] 徐宗学,米艳娇,李占玲,等. 和田河流域气温与降水量长期变化趋势及其持续性分析[J]. 资源科学, 2008 30(12): 1833-1838.
- [29] RAN Youhua ,LI Xin ,LU Lin. Evaluation of four remote sensing based land cover products over China [J]. Journal of Glaciology & Geocryology 2010 31(2): 391-401.
- [30] SHANG W ,DAI Y ,LIU B ,et al. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China [J]. Geoderma 2012 ,171-172(1): 85-91.
- [31] CHEN Y Y ,YANG K ,HE J ,et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres ,2011 ,116 (D20): 104-118.
- [32] BEYER M ,WALLNER M ,BAHLMANN L ,et al. Rainfall characteristics and their implications for rain-fed agriculture: a case study in the Upper Zambezi River Basin [J]. Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques , 2016 61(2): 1-53.
- [33] SEKARANOM A B ,MASUNAGA H. Comparison of TRMM-derived rainfall products for general and extreme rains over the maritime continent [J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology 2017 56(7): 1867-1881.
- [34] 李琼,杨梅学,万国宁,等. TRMM 3B43 降水数据在黄河源区的适用性评价[J]. 冰川冻土 2016 38(3): 620-633.
- [35] 张银辉. SWAT 模型及其应用研究进展[J]. 地理科学进展 2005 24(5): 121-130.
- [36] 黄清华,张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干游山区支流的改进与应[J]. 南京林业大学(自然科学版), 2004 28(2): 22-28.
- [37] 李成六. 基于 SWAT 模型的石羊河上游山区流域的径流模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学 2011.
- [38] 吴恒卿,刘赛艳,黄强. 基于 SWAT 模型的大通河流域径流模拟[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015 43(9): 210-216.
- [39] 张小咏,李佳,杨艳昭,等. 基于 SWAT 模型的长江源区径流模拟[J]. 西北林学院学报 2012 27(5): 38-44 234.
- [40] 李慧,雷晓云,包安明,等. 基于 SWAT 模型的山区日径流模拟在玛纳斯河流域的应用[J]. 干旱区研究, 2010 27(5): 686-690.
- [41] 赵杰,徐长春,高沈瞳,等. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐和流域径流模拟[J]. 干旱区地理, 2015 38(4): 666-674.
- [42] SCHAEFLI B ,GUPTA H V. Do Nash values have value? [J]. Hydrological Processes 2007 21(15): 2075-2080.
- [43] MORIASI D N. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the Asabe 2007 50(3): 885-900.
- [44] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 水文模型参数敏感性分析方法评述[J]. 水利水电科技进展 2015 35(6): 105-112.
- [45] 王中根,夏军,刘昌明,等. 分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨[J]. 自然资源学报 2007 22(4): 649-655.
- [46] ABBASPOUR K C ,VEJDANI M ,HAGHIHAT S ,et al. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for

- SWAT[J]. the Fourth International SWAT Conference , 2007 364(3) : 1603 – 1609.
- [47] 何杰. 中国区域高时空分辨率地面气象要素数据集的建立[D]. 北京: 中国科学院青藏高原所 2011.
- [48] 孟现勇, 吉晓楠, 刘志辉 等. SWAT 模型融雪模块的改进与应用研究[J]. 自然资源学报 2014 29(3) : 528 – 539.
- [49] MENG Xianyong. Energy balance-based SWAT model to simulate the mountain snowmelt and runoff: taking the application in Juntanghu watershed(China) as an example [J]. Journal of Mountain Science 2015 12(2) : 368 – 381.
- [50] LUO Y ,ARNOLD J ,LIU S ,et al. Inclusion of glacier processes for distributed hydrological modeling at basin scale with application to a watershed in Tianshan Mountains ,northwest China [J]. Journal of Hydrology. 2013 477: 72 – 85.
- [51] YIN Zhenliang ,FENG Qi ,LIU Shiyin ,et al. The Spatial and Temporal Contribution of Glacier Runoff to Watershed Discharge in the Yarkant River Basin ,Northwest China [J]. Water 2017 159(3) : 1 – 20.

Applicability Evaluation of Precipitation Datasets from CMADS、ITPCAS and TRMM 3B42 in Yurungkax River Basin

LIU Jun^{1 2} , LIU Shiyin^{1 3} , SHANGGUAN Donghui¹ , XU Jingdong⁴

(1. Northwest Institute of Eco-environment and Resources , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China;

2. University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 101407 , China;

3. Institute of International Rivers and Eco-security , Yunnan University , Kunming 600500 , China;

4. Aksu Hydrological and Water Resources Bureau , Aksu 843000 , China)

Abstract: In the northwest China , the terrain is complex and the environment is bad , the level of perennial meteorological observation is limited , and the long-term observation data are lacking especially in high altitude mountainous area. Combined with rigorous screening of the measured data , reanalysis datasets (products) based on the data from meteorological satellite and the technologies numerical simulation were obtained. Due to its high temporal resolution , higher reliability , reanalysis datasets are widely used in research work. In this paper , we chose a typical alpine mountain watersheds located in the northwest as the object of study , and three representative reanalysis meteorological data products (CMADS , ITPCAS and TRMM 3B42) were used to simulate the annual and inter-annual distribution of precipitation in the study area. Firstly , we analyzed the time and space distribution of precipitation data from three datasets in study area. And then we used the precipitation data to drive the distributed hydrological model SWAT. The results of the model simulation were compared with the runoff data measured by the hydrological station , the simulated results of precipitation data based on the three datasets from CMADS , ITPCAS and TRMM 3B42 in the study area were analyzed. The results show that: The time and space distributions of precipitation data in the basin reflected by the three datasets exist remarkable differences , and the total precipitation data from CMADS and ITPCAS datasets are much larger than that from TRMM 3B42 dataset in the annual scale , the annual and inter-annual precipitation distribution from CMADS datasets is more consistent with the distribution of glacier than those from ITPCAS and TRMM 3B42 datasets; For the three reanalysis data products , the simulated results of CMADS dataset driven hydrological model are better than the simulated results of ITPCAS and TRMM 3B42 datasets , and the month and day NSE efficiency coefficient of CMADS datasets is respectively reached to 0.53、0.71 , the simulated results of ITPCAS and TRMM 3B42 datasets are unsatisfactory identified by their NSE efficiency coefficient.

Keywords: CMADS; ITPCAS; TRMM 3B42; precipitation datasets; SWAT hydrological model; runoff simulation; applicability evaluation

(责任编辑: 张陵)