

# 基于 SWAT 模型的 TRMM 降水数据 径流模拟适宜性评价

朱红雷<sup>1</sup>, 史晓亮<sup>2</sup>, 李英臣<sup>1</sup>, 李颖<sup>3</sup>

(1. 河南师范大学, 河南 新乡 453002;

2. 西安科技大学, 西安 710054; 3. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

**摘要:**以辉发河流域为研究区,采用 SWAT 分布式水文模型,以实测降水数据和 TRMM 降水产品作为模型输入,在月尺度和日尺度上构建了四种径流模拟情景,并利用 SUFI\_2 算法分析了不同降水输入和时间尺度下模型的参数敏感性、参数不确定性和径流模拟结果。结果表明:(1) TRMM 降水产品的误差会改变参数的敏感性排序,尤其是在日尺度上;(2) 4 种模拟情景  $P$  因子的范围为 0.58~0.9,  $R$  因子的范围为 0.47~1.58,模型拟合精度较好。月尺度上 TRMM 数据的估算误差较小,其更高的空间分辨率可使径流模拟不确定性得到明显改进,而随着时间尺度的变化,TRMM 数据在日尺度上的误差增大会导致日径流模拟结果不确定性的增加;(3) 在月尺度和日尺度上,采用 TRMM 数据降水输入模拟径流,其  $NS$  和  $R^2$  系数均达到较好水平,实测降水模拟结果略优于 TRMM 数据。研究表明,在辉发河流域,TRMM 降水产品在径流模拟方面表现出较好的适宜性,是一种较为可靠的降水数据来源。

**关键词:** TRMM; 径流模拟; SWAT; 适宜性评价; 不确定性分析

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)05-0105-08

## Evaluation of Runoff Simulation Using TRMM Precipitation Data Based on SWAT Model

ZHU Honglei<sup>1</sup>, SHI Xiaoliang<sup>2</sup>, LI Yingchen<sup>1</sup>, LI Ying<sup>3</sup>

(1. He'nan Normal University, Xinxiang, He'nan 453002, China; 2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, 710054, China; 3. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

**Abstract:** Four runoff simulation scenarios were constructed in Huifa river basin using the distributed hydrological model SWAT at monthly and daily scales with observed precipitation data and TRMM precipitation products as the input of model. Then, parameter sensitivity, parameter uncertainty and runoff simulation were analyzed under different precipitation inputs and time scale using SUFI\_2 algorithm. The results showed that: (1) the error of TRMM precipitation products could change the parameters of sensitivity ranking, especially on the daily scale; (2)  $P$ -factor of four simulated scenarios was in the range of 0.58~0.9 and  $R$ -factor in the range of 0.47~1.58, which indicated that the model had the better fitting precision; TRMM data could make the runoff simulation uncertainty significantly improved due to its small estimate error at month scale and higher spatial resolution; with the change of time scale, increasing TRMM data error at daily scale could lead to the enlarged uncertainty of daily runoff simulation; (3) on the monthly and daily scales, both  $NS$  and  $R^2$  of runoff simulation using the TRMM data reached to a good level, and the result simulated by using measured rainfall was slightly better than that of the TRMM data. The results suggested that the TRMM precipitation products were a reliable source of precipitation data for runoff simulation in Huifa River Basin.

**Keywords:** TRMM; runoff simulation; SWAT; suitability evaluation; uncertainty analysis

降水是水文过程模拟的关键变量<sup>[1]</sup>。目前,降水观测方法主要有雨量计、雷达和卫星反演三种。雨量计是最准确的降水观测方法,但是由于单点观测的空间局限性,传统的雨量站点数据不能充分反映降水的时空特征<sup>[2-4]</sup>。与雨量计方法相比,雷达观测方法虽然其观测范围有所增大,但仍不能覆盖国家乃至全球尺度<sup>[5]</sup>。基于微波和红外观测技术的气象卫星遥感反演降水方法可以克服上述困难。遥感降水数据具有较高的时空分辨率,例如 Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM)、Precipitation Estimation from Remote Sensing Information using Artificial Neural Network (PERSIAN)和 Climate Prediction Center Morphing Method (CMORPH)等,在水文模拟中存在巨大的潜力。越来越多的学者开始探索遥感降水数据在模拟水文过程中的可行性。

Tobin 等<sup>[6]</sup>在美国地区选择了 7 个流域,分别利用 4 种遥感降水产品和实测降水数据模拟流域 30 d, 10 d, 5 d, 3 d 和 1 d 的径流量,结果表明在不同的流域内,随着径流模拟时间尺度的变化,不同遥感降水产品的径流模拟精度会产生不同的变化。Yu 等<sup>[7]</sup>利用 TRMM 数据模拟了中国西北降水站点稀少的 Manas 流域,结果表明,TRMM 数据可以应用到降水资料稀少的流域。Price 等<sup>[8]</sup>利用 Multisensor Precipitation Estimator(MPE or Stage IV Next-Generation Radar)降水数据模拟 Neuse River 的径流,并用实测降水数据做对比,结果表明,MPE 的模拟结果要优于实测降水站点的结果。Bitew 等<sup>[9]</sup>总结了利用遥感降水数据模拟径流的研究,指出遥感降水数据在水文模拟中有着巨大的潜力,模拟的精度取决于遥感降水数据的类型、流域的大小。

国内采用遥感降水数据模拟径流的研究相对较少<sup>[10]</sup>。此外,由于降水数据是径流模拟最关键的输入数据,遥感降水输入数据的不确定性分析是十分必要的。因此,本文以辉发河流域为研究区,基于目前国内应用最为广泛的 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)模型,评价 TRMM 3B42 V7 降水产品在径流模拟方面的适宜性,并对其进行参数不确定性分析。

## 1 研究区概况

辉发河发源于龙岗山脉北侧辽宁省清原满族自治县境内,流经梅河口、辉南、磐石和桦甸等县市,于桦甸市金沙乡福安屯东汇入第二松花江,是第二松花江的第一大支流,也是吉林省重要水源地——松花湖的主要补给水源。流域属温带大陆性季风气候区,夏季温热多雨,冬季漫长寒冷。根据流域内及周边气象站点 1960—

2010 年的统计资料,该地区多年平均气温 4.5℃,1 月份气温最低,年平均温度在 -16.2℃左右,极端最低气温达 -45℃;8 月份气温最高,年平均气温在 25℃左右,极端最高气温 37.2℃。降水量年内分配不均,辉发河流域年平均降水量为 776 mm,雨量主要集中在 6—9 月份,占全年降水量的 60%以上。径流量随季节变化较大,3—4 月为春汛,7—9 月为夏汛,11—2 月水位较为平稳,为枯水期。根据桦甸市五道沟水文站的监测资料,辉发河水位变幅 7.69 m,多年平均年径流量 26.4 亿 m<sup>3</sup>,平均流量 83.70 m<sup>3</sup>/s,最大洪峰流量 3 010 m<sup>3</sup>/s (1975 年),最小流量 0.44 m<sup>3</sup>/s (1979 年)。本文以五道沟水文站上游为研究区域,该区流域面积 12 400 km<sup>2</sup>,约占全流域的 84%(图 1)。

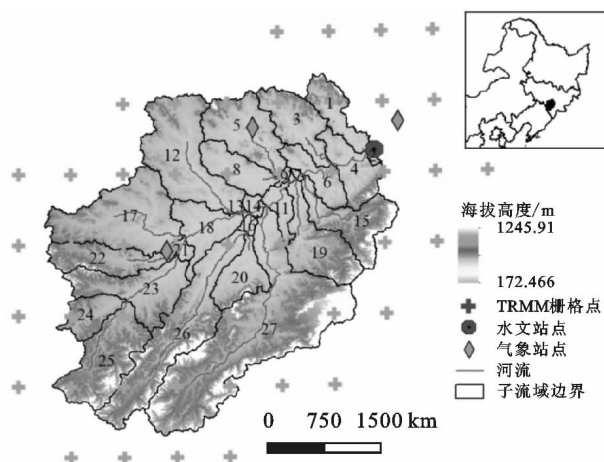


图 1 研究区水文气象站点及子流域划分

## 2 数据和方法

### 2.1 SWAT 模型水文循环基本原理

SWAT 模型中,流域水文过程分为两部分:(1) 陆面部分——子流域模块(即产流和坡面汇流部分);(2) 水循环的水面部分——汇流演算模块(即河道汇流部分)<sup>[11]</sup>。前者控制着每个子流域内主河道的水、沙、营养物质和化学物质等的输入量;后者决定水、沙等物质从河网向流域出口的输移运动。根据水文循环原理,SWAT 模型水量平衡方程可以用如下公式表示:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - O_i - ET_i - P_a - QR_i) \quad (1)$$

式中:SW<sub>t</sub>为土壤的最终含水量(mm);SW<sub>0</sub>为第 i 天可被植被吸收的土壤原始含水量,定义为原始土壤含水量减去凋萎点含水量(mm);t 为时间(d);R<sub>i</sub>为第 i 天的降水量(mm);Q<sub>i</sub>为第 i 天的地表径流量(mm);ET<sub>i</sub>为第 i 天的蒸散发(mm);P<sub>a</sub>为第 i 天存在于土壤剖面底层的渗透量和测流量(mm);QR<sub>i</sub>为第 i 天的地下水回流量(mm)。

### 2.2 数据准备

本研究所用的 DEM 数据来源于美国宇航局

(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA),以及德国与意大利航天机构联合测量的 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据集,空间分辨率为 90 m;气象数据选用辉发河流域内的桦甸、梅河口和磐石 2000—2010 年的逐日观测数据,包括最高气温、最低气温、降水、相对湿度、风速和日照时数。流域内所用气象站点均没有太阳辐射的实测资料,根据童成立等<sup>[12]</sup>的研究,利用基于站点位置和日照时数的模拟逐日太阳辐射的方法估算了各气象站逐日太阳辐射值;土壤空间数据来源于吉林省土肥站与长春地理所 1988 年联合编制的 1:50 万土壤图,并参照中国科学院南京土壤研究所土壤分中心的中国土壤数据库(<http://www.soil.csdb.cn/>),将其转换为模型所需的参数;五道沟径流数据来源于吉林省水文局,时间为 2006—2010 年;参考水文资料的获取时间,本研究以 2005 年 Landsat5 TM 影像为基础,采用人机交互的方式解译研究区土地利用类型<sup>[13]</sup>。为保持土地利用分类系统和 SWAT 模型一致,对本文的土地利用分类数据进行重分类。

TRMM 3B42 是美日联合发射的热带降水测量计划(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)卫星与其他卫星联合反演的降水产品<sup>[14-16]</sup>。TRMM 3B42 利用逐月的降水观测资料对其订正,去除了卫星观测中存在的系统误差。本文采用 2011 年发布的最新版本 TRMM V7 数据。相对于原来的 TRMM V6 数据, V7 在卫星遥感数据源、地貌雨量校正算法、热红外数据校正方案和微波数据处理方法等方面取得了重要改进,降水估算更为准确<sup>[17]</sup>。

### 2.3 参数敏感性分析

SWAT 模型中跟径流有关的参数共 28 个<sup>[18]</sup>,通过敏感性分析,可以剔除对模拟结果影响较小的参数,减少模型参数率定的工作量以及模型的不确定性。ArcSWAT 2012 版本取消了自带的参数敏感性分析,因此,本研究采用 SWATCUP 2012 中的 SUFI\_2 算法进行参数敏感性分析,模型的不确定性分析以及率定过程也可同时进行<sup>[19-20]</sup>。

SUFI\_2 算法提供了 3 种方法获取参数的敏感性<sup>[21]</sup>,本研究采用的是全局敏感度。通过多元回归模型进行参数敏感性分析,将拉丁超立方采样生成的参数与目标函数值进行回归分析,公式如下:

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (2)$$

式中:  $g$  为目标函数;  $\alpha, \beta_i$  为回归方程的系数;  $b_i$  为参数值;  $m$  为参数数目。

然后采用  $t$  检验检测每个参数的敏感性,  $t$ -Stat

的绝对值越大,表明该参数越敏感。P-Value 是  $t$ -Stat 查表对应的  $p$  概率值,  $p$  值体现了  $t$ -Stat 的显著性。参数的  $p$  值越接近 0,显著性越大。

### 2.4 模型校准和验证

选择决定性系数( $R^2$ )和 Nash-Sutcliffe 效率系数(NS)用来评价模型参数率定和模型验证的精度与效果<sup>[22-23]</sup>。

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{(\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}}))^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2} \quad (4)$$

式中:  $Q_{obs}$  为实测流量值;  $Q_{sim}$  为模拟流量值;  $\overline{Q_{obs}}$  为实测径流平均值;  $\overline{Q_{sim}}$  为模拟径流平均值。一般认为  $R^2 > 0.6$  且  $NS > 0.5$ ,模型模拟结果满足要求<sup>[24]</sup>。

### 2.5 不确定性分析

SUFI-2 算法采用两个指标来衡量参数的不确定性:  $P$ -factor 和  $R$ -factor。  $P$ -factor 是指 95% 置信水平上的不确定性区间(95% prediction uncertainty, 95PPU)所包含的实测值占总体的比例。95PPU 是指置信水平为 2.5% ( $X_L$ ) 和 97.5% ( $X_U$ ) 之间模拟结果的累积分布区间<sup>[25-27]</sup>。95PPU 的平均宽度可由以下公式获得:

$$\bar{d} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (X_U - X_L)_i \quad (5)$$

式中:  $l$  为数据的个数。

$\bar{d}$  越接近于 0,  $P$ -factor 越接近于 1,表明模拟的结果越好,然而事实上很难达到这种理想的状况。因此,定义了  $R$ -factor 来描述模型模拟结果的好坏,公式如下:

$$R\text{-factor} = \frac{\bar{d}}{\sigma} \quad (6)$$

式中:  $\sigma$  为观测数据的标准差。

$R$ -factor 的物理意义是 95PPU 内样本的聚集程度。  $R$ -factor 越大,样本分布越零散,反之,则样本分布越集中。当  $P$ -factor 取 1,  $R$ -factor 取 0 时,表明模拟结果与实测数据一致。实际模拟当中,一般认为,当  $P$ -factor  $> 0.6$ , 且  $R$ -factor  $< 1$  时,模型的模拟精度满足要求。

## 3 结果与分析

### 3.1 TRMM 降水数据精度分析

遥感降水数据的精度决定了径流模拟结果的准确性。以桦甸、梅河口和磐石三个站点实测降水数据为基准,从 TRMM 影像中提取站点所对应的栅格值,分别在月尺度和日尺度上对比遥感降水数据与实测降水数据(图 2)。

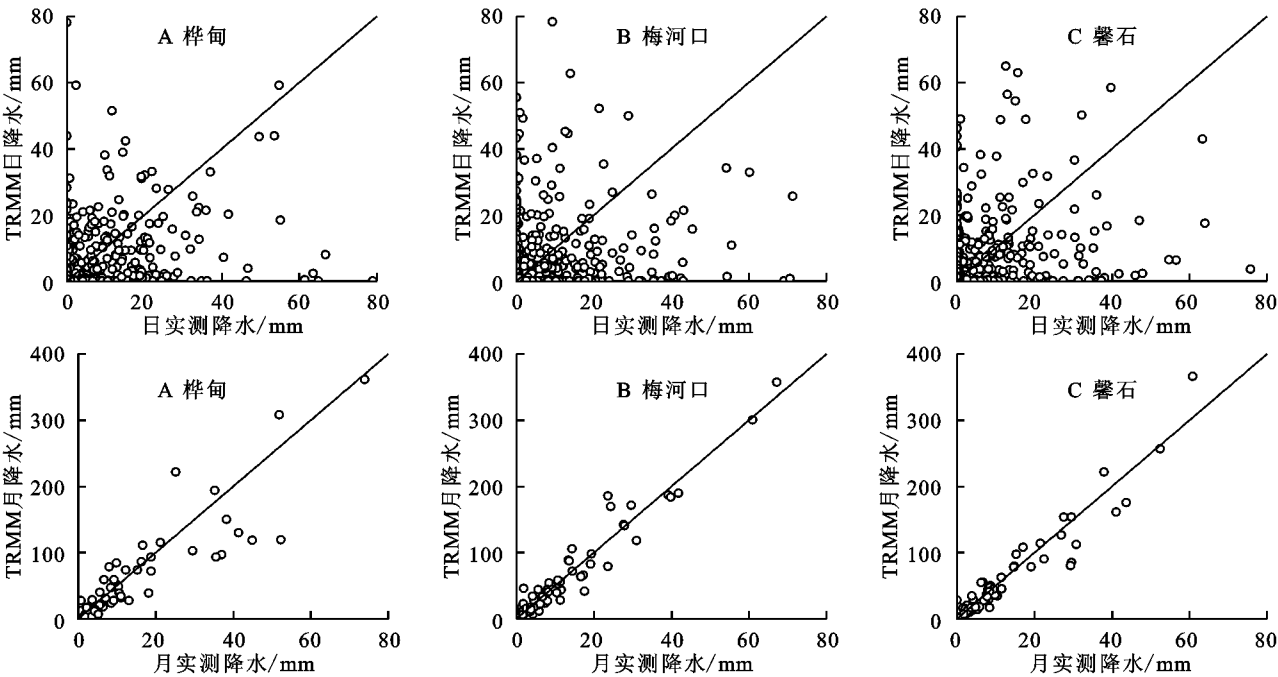


图 2 TRMM 降水数据和实测数据比较

从图 2 中可以看出,在日尺度上,TRMM 降水产品的估算结果与实测值有较大差距,而在月尺度上,TRMM 对降水的估算精度明显优于日尺度。这是由于 TRMM 3B42 融合了逐月的降水观测资料,因此,月尺度的降水精度明显优于日尺度。表 1 列出了桦甸、梅河口和磐石三个站点 TRMM 降水与实测降水的相关系数。从表 1 中可以看出,在日尺度上,TRMM 降水数据与桦甸、梅河口和磐石三个站点的相关系数分别为 0.37,0.28,0.36,相关系数较低。月尺度上,三个站点的相关系数较好,分别为 0.88,0.97,0.96。

表 1 TRMM 降水与站点实测降水相关性分析			
降水产品	桦甸	梅河口	磐石
TRMM 日降水	0.37	0.28	0.36
TRMM 月降水	0.88	0.97	0.96

3.2 参数敏感性分析结果

本文选择对辉发河流域径流影响较大的 14 个参数,参数的意义及初始值见表 2。采用 SUFI\_2 算法进行参数敏感性分析,以实测降水数据输入作为对照,设置 4 种径流模拟情景:实测日径流、实测月径流、TRMM 日径流和 TRMM 月径流。每种模拟情景运行 500 次,参数敏感性分析结果见表 3。

从表 3 中可以看出,随着径流模拟时间尺度及降水输入数据的变化,参数的敏感程度也发生了较大的变化。在月尺度上,采用实测降水数据作为模型输入模拟径流,最为敏感的 5 个参数分别为 CN2,CANMX,ALPHA\_BF,SOL\_AWC 和 SOL\_Z;以 TRMM 降水数据作为模型输入,前 5 位敏感的参数分别为 CN2,ALPHA\_BF,GWQMN,CANMX 和 SOL\_K,

除个别参数排名不一致外(SOL\_Z,GW\_DELAY 和 GW\_REVAP),其他参数敏感性排序基本一致。但两种情景 t-Stat 值的差异较大。

以三个实测降水站点为参考,进一步分析 TRMM 降水与实测降水的误差分布。从图 3 中可以看出,在日尺度上,TRMM 降水数据的误差主要集中在 40~−40 mm,且时间上主要集中在该地区的雨季,即每年的 6—9 月份。在月尺度上,误差的分布范围与日尺度相似,但时间上没有明显的规律性。表 4 列出了日尺度和月尺度上 TRMM 降水数据的相对误差平均值( $\overline{E/R}$ )%和相对平均偏差( $|\overline{E}|/\overline{R}$ )%。从表 4 中可以看出,相对误差平均值( $\overline{E/R}$ )%的范围为 0.72%~15.43%,表明在降水的总量上,TRMM 降水数据与实测降水的误差较小。但在日尺度上,TRMM 数据的( $|\overline{E}|/\overline{R}$ )%值都在 134%以上,明显大于月尺度(桦甸 19.62%,梅河口 22.98%,磐石 38.29%),表明 TRMM 降水数据在日尺度上有较大的波动,而在月尺度上波动较小。这是由于 TRMM 3B42 在月尺度上用实测降水数据进行了修正。因此,在模型其他输入数据一致的情况下采用 TRMM 降水数据模拟辉发河流域径流,参数敏感性排序在月尺度上变化较小。

在日尺度上,实测降水输入情景最为敏感的 5 个参数为 ALPHA\_BF,CN2,CH\_N2,CH\_K2 和 EP-CO,除前两者参数与月尺度保持一致外,其他参数的敏感性排序差异较大;TRMM 降水输入情景最为敏感的 5 个参数分别为 CH\_N2,CH\_K2,SOL\_Z,ALPHA\_BF 和 ESCO,与月尺度参数敏感性排名差异

较大。日尺度上,实测降水输入情景和 TRMM 降水输入情景两者 t-Stat 值大小较为相似,但参数敏感性排序迥异。径流模拟时间尺度由月变为日,扩大了 TRMM 降水数据误差对参数敏感性的影响。

表 2 辉发河流域径流模拟所用参数

参数	描述	初始运行参数取值范围
CN2	湿度条件Ⅱ的初始 SCS 径流曲线值	−20%~30%
ALPHA_BF	基流衰退常数 $\alpha_{gw}(d)$ ,基流衰退常数 $\alpha_{gw}$ 是地下水复水(recharge)的一个直接指数	0~1
ESCO	土壤蒸发补偿因子,该值越小,模型得到的最大蒸发量就越大	0.01~1
CH_K2	主河道河床有效水力传导度(mm/h)	0.01~150
EPCO	作物消耗补偿因子。当该参数为 1.00 时,模型允许底层土壤满足用水需求,当该参数为 0 时,允许取水深度变小	0.01~1.00
CH_N2	主河道曼宁(Manning)n 值	−0.01~0.3
CANMX	最大冠层储水量(mm H <sub>2</sub> O)。作物冠层对渗透、地表径流、蒸发有显著影响。计算地表径流时,SCS 曲线值法把冠层中途拦截作为初始截流	0~100
GW_DELAY	地下水迟滞时间(ds)	0~500
SOL_Z	土壤剖面最大根深(mm)	−50%~50%
GWQMN	浅层含水层产生“基流”的阈值深度(0~5000,默认为 0)	0~2000
GW_REVAP	地下水蒸发系数。当 GW_REVAP 趋于 0 时,水分从浅层蓄水层向根层的运动受到限制,当 GW_REVAP 趋向于 1 时,水分从浅层蓄水层向根层的运动接近潜在蒸散发的速率。该参数取值范围 0.02~0.20	0.02~0.2
SOL_K	土壤饱和导水率(mm/h)	−50%~50%
SOL_AWC	土层中可利用水的量(mmH <sub>2</sub> O/mmsoil)(田间持水量和萎蔫系数之差)	−50%~50%
SURLAG	地表径流延滞系数(surface runoff lag coefficient)。在大的子流域中,只有部分径流能在产生当天到进入河流,其余部分汇集后进入河流的时间超过 1 d	0.05~24

表 3 辉发河流域参数敏感性分析结果

参数名称	实测月径流		实测日径流		TRMM 月径流		TRMM 日径流	
	t-Stat	P-Value	t-Stat	P-Value	t-Stat	P-Value	t-Stat	P-Value
R__CN2. mgt	25.28	0.00	4.79	0.00	9.49	0.00	−0.32	0.75
V__ALPHA_BF. gw	13.80	0.00	6.12	0.00	5.80	0.00	1.94	0.05
V__GW_DELAY. gw	0.00	1.00	−0.47	0.64	−1.74	0.08	−0.57	0.57
V__ESCO. hru	1.02	0.31	1.56	0.12	0.86	0.39	1.92	0.06
R__SOL_AWC(.). sol	−5.43	0.00	−2.06	0.04	−1.60	0.11	−1.39	0.17
V__GW_REVAP. gw	−1.67	0.10	0.20	0.84	−0.46	0.65	−0.80	0.42
V__CH_N2. rte	−0.70	0.48	4.01	0.00	−0.77	0.44	4.21	0.00
V__CH_K2. rte	−1.93	0.05	3.54	0.00	0.96	0.34	4.02	0.00
V__GWQMN. gw	−1.50	0.13	−0.97	0.33	−3.44	0.00	−0.19	0.85
R__SOL_K(.). sol	2.60	0.01	1.50	0.13	2.59	0.01	0.24	0.81
R__SOL_Z(.). sol	−2.89	0.00	−1.89	0.06	−0.98	0.33	−2.06	0.04
V__CANMX. hru	−14.21	0.00	−1.42	0.16	−3.34	0.00	0.53	0.59
V__SURLAG. bsn	0.89	0.37	0.07	0.95	−0.75	0.46	−0.77	0.44
V__EPCO. hru	−1.66	0.10	−2.63	0.01	−1.11	0.27	0.65	0.52

3.3 不确定性分析结果

采用 SWATCUP 2012 中的 SUFI\_2 算法进行参数的率定和不确定性分析。设置 2006 年为模型的预热期,2007—2008 年为率定期,2009—2010 年为模型验证期。初始的参数取值范围往往较大,会增加模型的不确定性和降低模型模拟精度。因此,以表 2 中的数据作为参数

初始取值范围,将 4 种径流模拟情景各运行 500 次后,SUFI\_2 算法会提供模型下一次迭代推荐的参数范围值。以该组参数范围值再运行500 次,得到 4 种径流模拟情景的参数不确定性结果。

从表 5 中可以看出,在模型模拟期内,4 种模拟情景 P 因子的范围为 0.58~0.9,R 因子的范围为

0.47~1.58,模型拟合精度较好。部分  $P$  因子值较小的原因是由于在模型率定时和验证时将 NS 系数设为目标函数,为了取得较高的 NS 值, $P$  因子值会有所降低。在月尺度上,率定期实测降水和 TRMM 的  $P$  因子为 0.88 和 0.83, $R$  因子为 1.19 和 1.58,实测降水的不确定性较小;验证期实测降水和 TRMM 的  $P$  因子为 0.58 和 0.75, $R$  因子为 0.47 和 0.59,TRMM 数据的不确定性较小。日尺度上实测降水和 TRMM 的不确定性结果与月

尺度正好相反,率定期  $P$  因子和  $R$  因子基本一致,实测降水的  $R$  因子略高,为 1.56;验证期实测降水模拟径流的不确定性明显小于 TRMM 数据。结合 TRMM 数据与实测降水的误差分析结果可以发现,月尺度上 TRMM 数据的估算误差较小,其更高的空间分辨率可使径流模拟不确定性得到明显改进,而随着时间尺度的变化,TRMM 数据在日尺度上的误差增大会导致日径流模拟结果不确定性的增加。

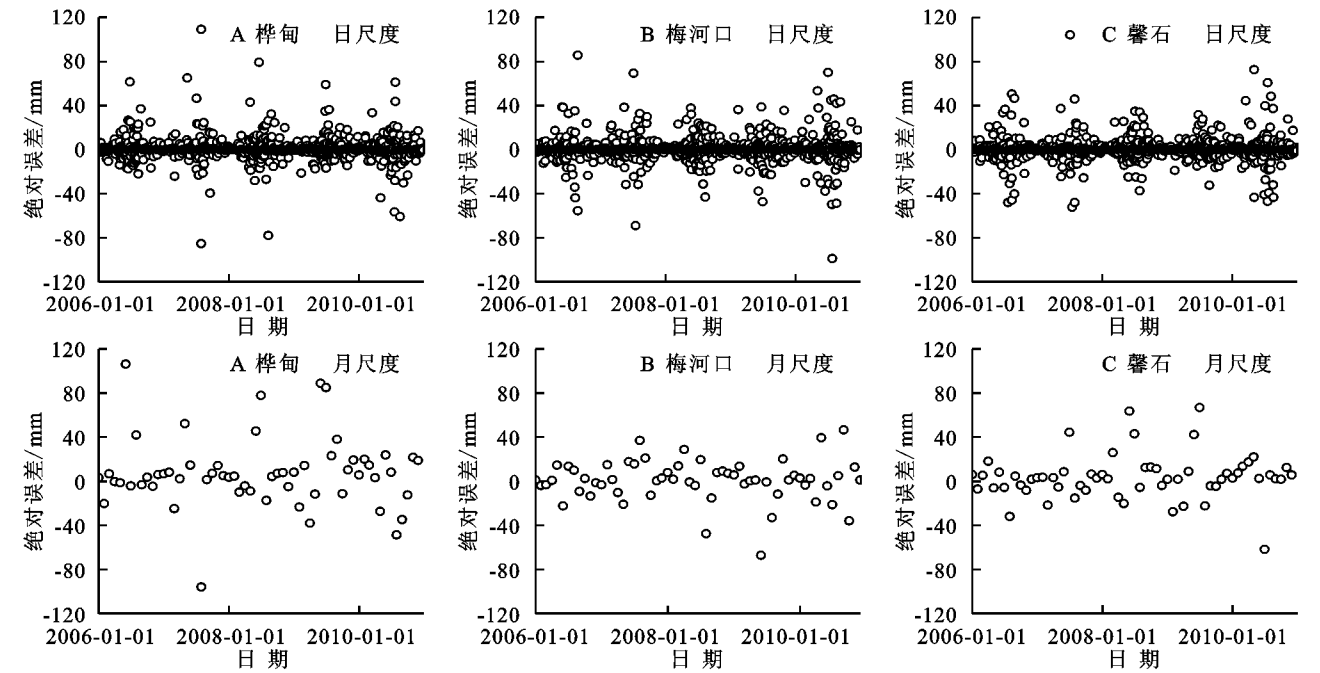


图 3 TRMM 降水数据在不同时间尺度下的误差分布

表 4 TRMM 与实测降水数据在不同时间尺度下的误差分析

实测降水 站点	日尺度					月尺度				
	$\bar{R}$	$\bar{E}$	$(\bar{E}/\bar{R})\%$	$ E $	$( E /\bar{R})\%$	$\bar{R}$	$\bar{E}$	$(\bar{E}/\bar{R})\%$	$ E $	$( E /\bar{R})\%$
桦甸	2.16	0.02	0.72	3.05	141.26	65.61	0.47	0.72	12.88	19.62
梅河口	1.95	0.11	5.65	2.62	134.00	59.43	3.36	5.65	13.66	22.98
磐石	1.97	0.30	15.43	2.67	135.45	60.09	9.27	15.43	23.01	38.29

备注: $\bar{R}$ 为该时间尺度下实测降水数据的平均降水量(mm); $\bar{E}$ 为 TRMM 与实测降水数据绝对误差的平均值(mm); $(\bar{E}/\bar{R})\%$ 为相对误差的平均值; $|E|$ 为 TRMM 与实测降水数据的平均偏差(mm); $\%$ 为平均相对偏差。

表 5 辉发河流域不确定性分析结果

模拟期	实测月径流		实测日径流		TRMM 月径流		TRMM 日径流	
	$P$ 因子	$R$ 因子	$P$ 因子	$R$ 因子	$P$ 因子	$R$ 因子	$P$ 因子	$R$ 因子
率定期(2007—2008)	0.88	1.19	0.9	1.56	0.83	1.58	0.86	1.28
验证期(2009—2010)	0.58	0.47	0.86	0.58	0.75	0.59	0.64	0.57

3.4 径流模拟结果

表 6 为辉发河流域径流率定和验证结果。采用实测降水输入模拟辉发河流域月径流,验证期模拟结果最好,NS 和  $R^2$  为 0.97;模拟结果表现较差的为 TRMM 数据模拟日径流,NS 为 0.55, $R^2$  为 0.57。一般认为日径流模拟 NS 和  $R^2$  大于 0.5,即可满足模型模拟精度需求。与不确定分析结论相似,在月尺度

和日尺度上,采用实测数据降水输入模拟径流,其结果略优于 TRMM 数据,但模拟结果相差较小;不同时间尺度模拟结果相比较,月径流的模拟结果明显优于日径流模拟,如率定期(2007—2008 年),使用 TRMM 数据模拟月径流,其 NS 为 0.72, $R^2$  为 0.74;日径流模拟 NS 为 0.55, $R^2$  为 0.57。图 4 为辉发河流域径流实测值、模拟值和 95 PPU 范围。从图

中可以看出,虽然采用实测降水数据的总体模拟结果略优于 TRMM 降水数据,但从模拟期的径流过程线来看,TRMM 降水的模拟结果与实际的径流曲线更为接近,如月径流模拟结果中 2009 年 1 月至 8

月的两次径流小高峰,日径流模拟结果中 2010 年 4 月份的径流高峰。综上所述,高时空分辨率的 TRMM 降水产品在辉发河流域的径流模拟中具有较好的适宜性。

表 6 辉发河流域径流模拟结果

模拟期	实测月径流		实测日径流		TRMM 月径流		TRMM 日径流	
	NS	R <sup>2</sup>	NS	R <sup>2</sup>	NS	R <sup>2</sup>	NS	R <sup>2</sup>
率定期(2007—2008)	0.79	0.81	0.63	0.67	0.72	0.74	0.55	0.57
验证期(2009—2010)	0.97	0.97	0.83	0.84	0.94	0.95	0.68	0.69

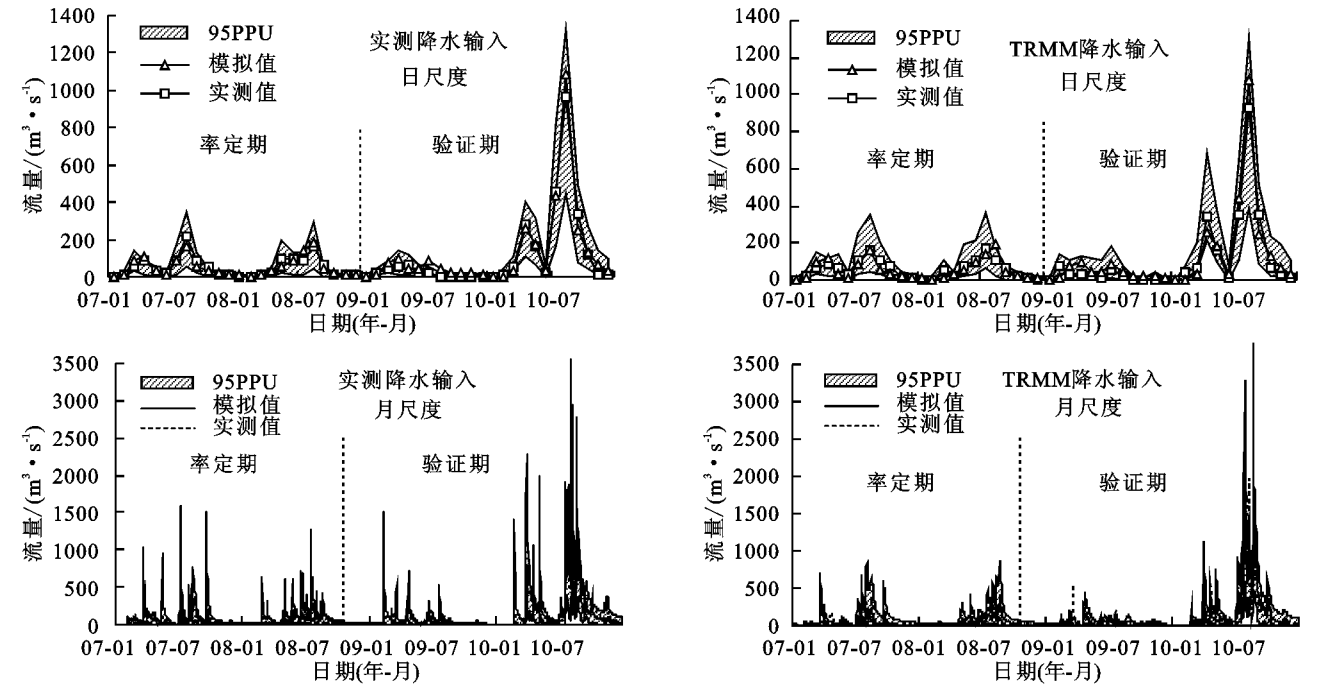


图 4 辉发河流域径流实测值、模拟值和 95PPU 范围

4 结论和讨论

本文以辉发河流域为研究区,采用实测降水数据和 TRMM 降水产品作为模型输入,在月尺度和日尺度上构建了 4 种径流模拟情景,分析了不同降水输入和时间尺度下模型的参数敏感性和参数不确定性,最后比较了 4 种径流模拟情景的径流模拟结果。结果表明:(1) 随着径流模拟时间尺度及降水输入数据的变化,参数的敏感程度也发生了较大的变化。其中,时间尺度对参数敏感性的影响更为显著;(2) 月尺度上 TRMM 数据的估算误差较小,其更高的空间分辨率可使径流模拟不确定性得到明显改进,而随着时间尺度的变化,TRMM 数据在日尺度上的误差增大会导致日径流模拟结果不确定性的增加;(3) 采用 TRMM 数据降水输入模拟径流,其结果略优于 TRMM 数据;不同时间尺度模拟结果相比较,月径流的模拟结果明显优于日径流模拟。综上所述,在辉发河流域,TRMM 降水产品在径流模拟方面表现出较

好的适宜性,是一种较为可靠的降水数据源。

受获取的数据所限,本文仅以辉发河流域分析了 TRMM 降水数据的适宜性。我国地域广阔,降水和下垫面情况复杂多变,尤其是在南方山地和丘陵地区,TRMM 降水数据能否较好地模拟径流仍是一个需要探讨的问题。此外,随着空间技术的不断发展,遥感降水产品种类逐渐增多,如 CMORPH, PERSIANN, GLDAS、我国的风云降水产品等等。在今后的研究中,将进一步对多源遥感降水产品在我国不同地区的适宜性进行评价。

参考文献:

[1] 郝芳华,陈利群,刘昌明,等. 降雨的空间不均性对模拟产流量和产沙量不确定的影响[J]. 地理科学进展, 2011,22(5):446-453.

[2] Anctil F, Lauzon N, Andr Assian V, et al. Improvement of rainfall-runoff forecasts through mean areal rainfall optimization [J]. Journal of Hydrology, 2006, 328(3):717-725.

- [3] Sun H, Cornish P, Daniell T M. Spatial variability in hydrologic modeling using rainfall-runoff model and digital elevation model [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, 7(6): 404-412.
- [4] Xu H, Xu C Y, Chen H, et al. Assessing the influence of rain gauge density and distribution on hydrological model performance in a humid region of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 505: 1-12.
- [5] 成璐. 融合降水及多种卫星降水产品评估研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [6] Tobin K J, Bennett M E. Temporal analysis of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) performance based on remotely sensed precipitation products [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(4): 505-514.
- [7] Yu M, Chen X, Li L, et al. Streamflow Simulation by SWAT Using Different Precipitation Sources in Large Arid Basins with Scarce Raingauges [J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(11): 2669-2681.
- [8] Price K, Purucker S T, Kraemer S R, et al. Comparison of radar and gauge precipitation data in watershed models across varying spatial and temporal scales [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(9): 3505-3520.
- [9] Bitew M M, Gebremichael M, Ghebremichael L T, et al. Evaluation of High-Resolution Satellite Rainfall Products through Streamflow Simulation in a Hydrological Modeling of a Small Mountainous Watershed in Ethiopia [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(1): 338-350.
- [10] 张小丽, 彭勇, 王本德, 等. 基于 SWAT 模型的降雨数据适用性评价[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 88-96.
- [11] Kiniry J R, Williams J R, King K W. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation (Version 2005) [J]. *Computer Speech & Language*, 2005, 24(2): 289-306.
- [12] 童成立, 张文菊, 汤阳, 等. 逐日太阳辐射的模拟计算[J]. *中国农业气象*, 2005, 26(3): 165-169.
- [13] 史晓亮, 李颖, 赵凯, 等. 诺敏河流域土地利用与覆被变化及其对水文过程的影响[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(1): 23-28.
- [14] 常远勇, 侯西勇, 于良巨, 等. 基于 TRMM3 B42 数据的 1998—2010 年中国暴雨时空特征分析[J]. *水资源与水利工程学报*, 2013(3): 105-112, 115.
- [15] 韦芬芬, 汤剑平, 惠品宏. 基于雨量计的高分辨率格点降水数据与 TRMM 卫星反演降水数据在亚洲区域的比较[J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 2013(3): 320-330.
- [16] Liu X, Liu F M, Wang X X, et al. Combining rainfall data from rain gauges and TRMM in hydrological modelling of Laotian data-sparse basins [J]. *Applied Water Science*, 2015: 1-10.
- [17] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. 基于 TRMM3B43V7 的赣江流域月径流过程模拟[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(5): 6-12.
- [18] 左德鹏, 徐宗学. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的渭河流域月径流分布式模拟[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(5): 490-496.
- [19] Akhavan S, Abedi-Koupai J, Mousavi S F, et al. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4): 675-688.
- [20] Azimi M, Heshmati G A, Farahpour M, et al. Modeling the impact of rangeland management on forage production of sagebrush species in arid and semi-arid regions of Iran [J]. *Ecological Modelling*, 2013, 250(1753): 1-14.
- [21] 李谦, 张静, 宫辉力. 基于 SUFI-2 算法和 SWAT 模型的奶水河流域水文模拟及参数不确定性分析[J]. *水文*, 2015, 35(3): 43-48.
- [22] 杨军军, 高小红, 李其江, 陈强, 冯仕超. 湟水流域 SWAT 模型构建及参数不确定性分析[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 82-88, 93.
- [23] Le T B, Al-Juaidi F H, Sharif H. Hydrologic Simulations Driven by Satellite Rainfall to Study the Hydroelectric Development Impacts on River Flow [J]. *Water*, 2014, 6(12): 3631-3651.
- [24] 汤洁, 刘畅, 杨巍, 李昭阳, 吴佳曦. 基于 SWAT 模型的大伙房水库汇水区农业非点源污染空间特性研究[J]. *地理科学*, 2012, 32(10): 1247-1253.
- [25] 张余庆, 陈昌春, 杨绪红, 尹义星, 都金康. 基于 SUFI-2 算法的 SWAT 模型在修水流域径流模拟中的应用[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(9): 24-28.
- [26] Leta O T, Nossent J, Velez C, et al. Assessment of the different sources of uncertainty in a SWAT model of the River Senne (Belgium) [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 68(C): 129-146.
- [27] Zhang X, Xu Y P, Fu G. Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 515(13): 205-222.