

CFSR 数据集在辉发河流域水文模拟中的应用

黄艳伟¹, 李颖², 朱红雷¹, 彭星玥¹, 王雨蝶¹

(1.河南师范大学, 河南 新乡 453007; 2.中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要: Climate Forecast System Reanalysis(CFSR)是美国国家环境预报中心利用全球预报系统反演的全球再分析数据产品,包含 1979—2014 年的气温、降水、风速、太阳辐射和相对湿度资料。以往的研究较少考虑 CFSR 数据集除降水外的其他气象因素对流域水循环模拟精度的影响。以辉发河流域为研究区,在比较 CFSR 数据集和实测气象数据精度的基础上,采用 SWAT 模型,从径流模拟和蒸散发两个角度评价了 CFSR 数据集在该流域的适宜性。结果表明:(1) 在径流模拟方面,CFSR 数据集日尺度的 R^2 和 NS 值范围为 0.57~0.71,月尺度为 0.72~0.82,均表现较好。CFSR 数据集对春季径流存在一定程度的高估,相对偏差为 32.61%;(2) 采用 CFSR 数据集作为模型输入,其模拟的 PET 和 ET 均高于实测气象数据的模拟结果,即使将 CFSR 中的降水替换为实测降水数据,ET 仍存在一定程度的高估。综上所述,在将 CFSR 数据集应用于流域水循环模拟时,应全面评价 CFSR 中各气象因子的精度及其对水循环各组分模拟结果的影响,对数据集中各要素进行全面校正可能会得到更为准确的模拟结果。

关键词: CFSR; 径流模拟; 蒸散发模拟; SWAT; 适宜性评价

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0300-07

Application of CFSR Dataset to Hydrological Simulation of Huifa River Basin

HUANG Yanwei¹, LI Ying², ZHU Honglei¹, PENG Xingyue¹, WANG Yudie¹

(1.Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453002, China; 2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: Climate forecast system reanalysis (CFSR) is a global reanalysis data product retrieved by the U. S. National Environmental Prediction Center using the global prediction system, which includes the temperature, precipitation, wind speed, solar radiation and relative humidity data from 1979 to 2014. In previous studies, the influence of meteorological factors other than precipitation in CFSR dataset on the accuracy of basin water cycle simulation was seldom considered. On the basis of comparing the accuracy of CFSR dataset with the measured meteorological data, we used SWAT model to evaluate the suitability of CFSR dataset in Huifa River Basin from the perspectives of runoff and evapotranspiration simulation. The results showed that: (1) in terms of runoff simulation, the ranges of the daily and monthly scale R^2 and NS produced by the CFSR dataset were 0.57~0.71 and 0.72~0.82, respectively, both of which performed well; CFSR dataset overestimated spring runoff to a certain extent, with a relative error of 32.61%; (2) using CFSR dataset as model input, the simulated PET and ET were higher than the results of the measured meteorological data; even if the precipitation data in CFSR were replaced by the measured precipitation data, ET was still overestimated to a certain extent. In conclusion, when applying CFSR dataset to watershed water cycle simulation, the accuracy of each meteorological factor in CFSR and its impact on the simulation results of each component of water cycle should be comprehensively evaluated. Comprehensive correction of each element in the dataset may lead to more accurate simulation results.

Keywords: CFSR; runoff simulation; evapotranspiration simulation; SWAT; suitability evaluation

收稿日期:2020-03-08

修回日期:2020-04-18

资助项目:河南省高等学校重点科研项目计划(17A170007);河南师范大学国家级科研项目培育基金(校 20180083)

第一作者:黄艳伟(1985—),女,河北邯郸人,硕士,助教,主要研究方向为遥感与地理信息系统应用。E-mail:2015111@htu.edu.cn

通信作者:朱红雷(1987—),男,河北邯郸人,博士,讲师,主要研究方向为遥感与地理信息系统应用。E-mail:zhuhonglei@htu.edu.cn

卫星降水产品和气象资料再分析数据集目前已成为流域水文模拟的重要数据源^[1-4]。TRMM^[5]、CMORPH^[6]、PERSIANN^[7]和 GSMaP 等^[8]卫星降水产品在国内外被广泛应用于无资料或缺资料地区的水文研究。气象资料再分析数据集主要以美国国家环境预报中心的 CFSR 再分析数据集、欧洲中期数值预报中心的 ERA-Interim 和美国国家航空航天局的 MERRA 数据集为代表^[9-10]。其中, CFSR 和当前应用最为广泛的水文模型 SWAT 相结合, 在其官网(<https://globalweather.tamu.edu/>)提供了 1979—2014 年的气温、降水、风速、太阳辐射和相对湿度等模型输入数据, 省去了从气象站点资料计算、分析和整理格式的步骤, 受到了国内外学者的广泛青睐。如, 于宴民和穆振侠^[11]对 CFSR 降水数据进行了修正, 结合 SWAT 模型对高山寒区河流喀什河进行了径流模拟。胡胜等^[12]以灞河流域为研究区, 从年和月尺度评价了传统气象数据和 CFSR 气象数据的径流模拟结果, 并提出了 CFSR 气象数据订正的方法。Yu 等^[13]结合实测降水数据, 利用泰森多边形和相关系数对 CFSR 降水进行了修正, 发现修正后的径流模拟结果 NSE 提高了 18.92%, R^2 增加了 2.3%。Liu 等^[14]比较了 CMADS 和 CFSR 数据在青藏高原的精度, 并利用 SWAT 分析了两种气象数据驱动下黄河源区流域径流模拟的精度。与以往仅采用遥感降水产品驱动模型的研究不同, CFSR 再分析数据集还提供了气温、风速、太阳辐射和相对湿度等其他输入数据。因此, 只根据径流模拟结果评价 CFSR 数据集的适宜性可能不太全面。本文以辉发河流域为研究区, 在比较 CFSR 数据集和实测气象数据精度的基础上, 采用 SWAT 模型, 从径流模拟和蒸散发两个角度评价 CFSR 数据集在该流域的适宜性。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

辉发河是吉林省吉林市以上松花江第一大支流, 发源于辽宁省清原县龙岗山, 流经梅河口市、辉南县、于桦甸市金沙乡许家店流入松花江。流域面积 14 896 km², 本文以五道沟水文站上游为研究区域, 约占全流域面积的 84%。流域内水系较为发达, 有白银河、梅河、莲河、大沙河和一统河等众多支流, 多年平均径流量 17.49 亿 m³, 多年平均径流深 196 mm。流域属温带大陆性季风气候区, 夏季温热多雨, 冬季寒冷漫长, 多年平均气温为 4.5℃, 1 月份年平均温度在 -16.2℃ 左右,

8 月份平均气温在 25℃ 左右。流域年平均降水量 776 mm, 主要集中在 6—9 月份, 占年降水量的 70% 左右, 受降雨影响, 河水季节变化较大(图 1)。

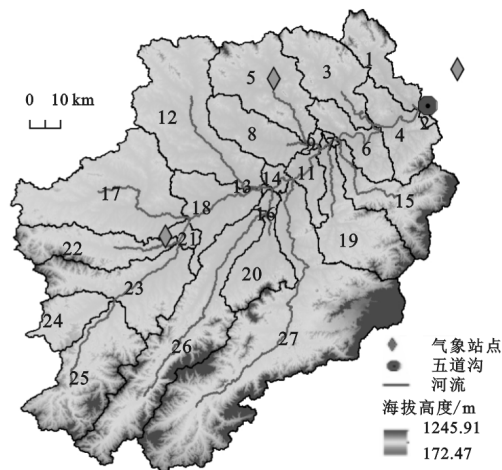


图 1 研究区位置

1.2 CFSR 精度分析

提取与梅河口、磐石和桦甸 3 个气象站点对应的 CFSR 栅格降水、气温、风速、太阳辐射和相对湿度数据, 以实测气象数据为基准, 采用相关系数(CC)和相对误差(Bias)两个指标评价 CFSR 数据在日尺度和月尺度上的估算精度。

$$CC = \frac{\sum (P_{obs} - \overline{P}_{obs})(P_{CFSR} - \overline{P}_{CFSR})}{\sqrt{\sum (P_{obs} - \overline{P}_{obs})^2 \sum (P_{CFSR} - \overline{P}_{CFSR})^2}} \quad (1)$$

$$Bias = \frac{\sum (P_{CFSR} - P_{obs})}{\sum P_{obs}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_{obs} 为实测气象要素值; P_{CFSR} 为 CFSR 数据集气象要素值; \overline{P}_{obs} 为实测气象要素平均值; \overline{P}_{CFSR} 为 CFSR 数据集气象要素平均值。

1.3 SWAT 模型输入数据

SWAT 模型是美国农业部(USDA)开发的分布式水文模型, 具有较强的物理基础^[15], 模型的水量平衡方程可以用如下公式表示:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - O_i - ET_i - Pe_i - QR_i) \quad (3)$$

式中: SW_t 为土壤的最终含水量(mm); SW_0 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(days); R_i 为第 i 天的降水量(mm); Q_i 为第 i 天的地表径流量(mm); ET_i 为第 i 天的蒸散发(mm); Pe_i 为第 i 天存在于土壤剖面底层的渗透量和测流量(mm); QR_i 为第 i 天的地下水回流量(mm)。

SWAT 模型的输入数据主要包括 DEM 数据、土地利用数据、土壤数据、气象数据以及水文站实测径流数据等。本文数据及其来源如下:

(1) 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。

(2) 以 2005 年 Landsat 5 TM 影像为基础,在 ArcGIS 中采用人机交互的方式获取研究区土地利用/覆被数据。为保持土地利用分类系统和 SWAT 模型一致,对本文的土地利用数据进行了重分类。

(3) 土壤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。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/>),获取不同土壤类型分层结构和理化性质数据,并按照模型输入要求计算相关参数,建立流域土壤数据库。

(4) 实测气象数据选用桦甸、梅河口和磐石 2006—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。本文所用气象站点均没有太阳辐射的实测资料,参考童成立等^[16]的研究结果,利用基于站点位置和日照时数的方法估算了各气象站逐日太阳辐射值。CFSR 气象数据为官网上直接下载的 2006—2010 的逐日数据。

(5) 五道沟径流数据来源于吉林省水文局。

1.4 模型率定、验证及不确定性分析

由于 ArcSWAT 2012 版本取消了自带的参数敏感性分析,因此本文采用 SWAT CUP 2012 中的 SUFI_2 算法进行参数敏感性分析、径流率定和验证,以及参数的不确定性分析^[17]。选择决定性系数(R^2)和 Nash-Sutcliffe 效率系数(NS)用来评价模型率定和验证的精度与效果

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

(4)

$$R^2=\frac{[\sum(Q_{obs}-\overline{Q}_{obs})(Q_{sim}-\overline{Q}_{sim})]^2}{\sum(Q_{obs}-\overline{Q}_{obs})^2\sum(Q_{sim}-\overline{Q}_{sim})^2}$$

(5)

表 1 日尺度上 CFSR 与站点实测数据的比较结果

地点	参数	降水/ mm	风速/ (m·s ⁻¹)	最高 温度/℃	最低 温度/℃	相对 湿度/%	辐射/ (MJ·m ⁻²)
梅河口	CFSR	1.95	3.43	11.31	0.53	0.71	16.06
	实测	1.97	2.12	11.93	0.78	0.68	14.39
	CC	0.66	0.80	0.99	0.98	0.65	0.84
磐石	CFSR	2.03	3.29	11.23	0.36	0.71	15.86
	实测	1.95	2.12	11.66	-0.65	0.70	14.16
	CC	0.74	0.78	0.99	0.98	0.63	0.90
桦甸	CFSR	2.21	2.98	10.88	-0.49	0.73	15.61
	实测	2.16	1.91	11.91	-0.47	0.67	13.46
	CC	0.72	0.64	0.99	0.97	0.59	0.82

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^[18]。

采用 P -factor 和 R -factor 两个指标来衡量参数的不确定性。 P -factor 是指 95%置信水平上的不确定性区间(95%prediction uncertainty,95 PPU)所包含的实测值占总体的比例。95 PPU 是指置信水平为 2.5%和 97.5%之间模拟结果的累积分布区间。95 PPU 宽度越小,同时 P -factor 越接近于 1,表示模型模拟的结果越好。 R -factor 是指 95 PPU 内样本的聚集程度,公式如下:

$$R\text{-factor}=\frac{\overline{d}}{\sigma}$$

(6)

式中: \overline{d} 为 95 PPU 的平均宽度; σ 为观测数据的标准差。

R -factor 越大,实测值在 95 PPU 中的分布越零散,反之,则实测值分布越集中。当 P -factor 取 1, R -factor取 0 时,表明模拟结果与实测数据完全一致。但是这种情况很难达到,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。

2 结果与分析

2.1 CFSR 精度分析结果

从表 1 中可以看出,在所有气象要素中 CFSR 数据集的温度与实测数据相关性最高,3 个站点均在 0.97以上。其次为辐射数据,3 个站点的相关系数分别为0.84,0.9,0.82。CFSR 的降水和风速与实测数据的相关系数范围在 0.64~0.8。相关系数最低值出现在相对湿度要素,3 个站点分别为 0.65,0.63,0.59。6 个气象要素相对误差值的分布和相关系数并不一致,相对误差的最大值为磐石市的最低温度,高达-155.28%。其次为风速要素,3 个站点相对误差分别为 61.33%,55.46%和 56.58%。降水和相对湿度的相关系数较低,但相对误差值却较小,均低于 10%。

表 2 为月尺度上 CFSR 与站点实测数据的相关系数。与日尺度相比,除相对湿度外,各气象要素的相关系数均有不同程度的提高,最高温度、最低温度、降水和辐射的相关系数在 0.93 以上。月尺度上 3 个站点的风速相关系数分别为 0.86,0.78,0.84。相对湿度的相关系数反而有所下降,下降幅度分别为 0.04,0.05,0.09。

表 2 月尺度上 CFSR 与站点实测数据相关系数

参数	梅河口	磐石	桦甸
降水	0.93	0.97	0.94
风速	0.86	0.78	0.84
最高温度	1.00	0.99	1.00
最低温度	1.00	0.99	1.00
相对湿度	0.61	0.58	0.50
辐射	0.97	0.98	0.98

2.2 径流模拟适宜性评价

以 2006 年作为模型的预热期,2007—2008 年为率定期,2009—2010 年为验证期。采用 SWAT CUP 2012 中的 SUFI_2 算法进行模型率定、验证和参数的不确定性分析。本文选择了对辉发河流域径流敏感性较高的 14 个参数,参数的意义及初始值范围的设置详见 Zhu 等^[19]的相关内容。初始的参数取值范

围通常较大,会增加模型的不确定性和降低模型模拟精度。SUFI_2 算法在执行完每次模拟后会推荐一组新的、较小的参数范围值。将 4 种径流模拟情景(CFSR 和实测站点的日尺度和月尺度径流模拟)各执行两次迭代,每次迭代模拟次数为 500,以最后一次迭代推荐的参数范围值对 4 种径流模拟情景进行验证和不确定性分析。

2.2.1 日尺度径流模拟结果 图 2 和表 3 为辉发河流域日尺度径流和参数不确定性分析结果。从图 2 中可以看出,CFSR 和实测气象站点模拟的日径流和观测径流具有较好的一致性。CFSR 95 PPU 的宽度明显大于实测气象站点 95 PPU 的宽度,意味着 CFSR 的 95 PPU 可能会包含更多数量的观测数据,但分布较为零散。因此,CFSR 在率定期和验证期的 P 因子和 R 因子都高于实测气象站点。对于目标函数 R^2 和 NS,CFSR 和实测气象站点在率定期的结果较为接近,而在验证期,实测气象站点的模拟结果相对较好, R^2 和 NS 值分别为 0.85,0.84。CFSR 模拟的径流相对误差在率定期和验证期分别为 0.40% 和 -8.40%,实测气象站点模拟的径流值相对偏低,相对误差分别为 -23.77% 和 -19.12%。

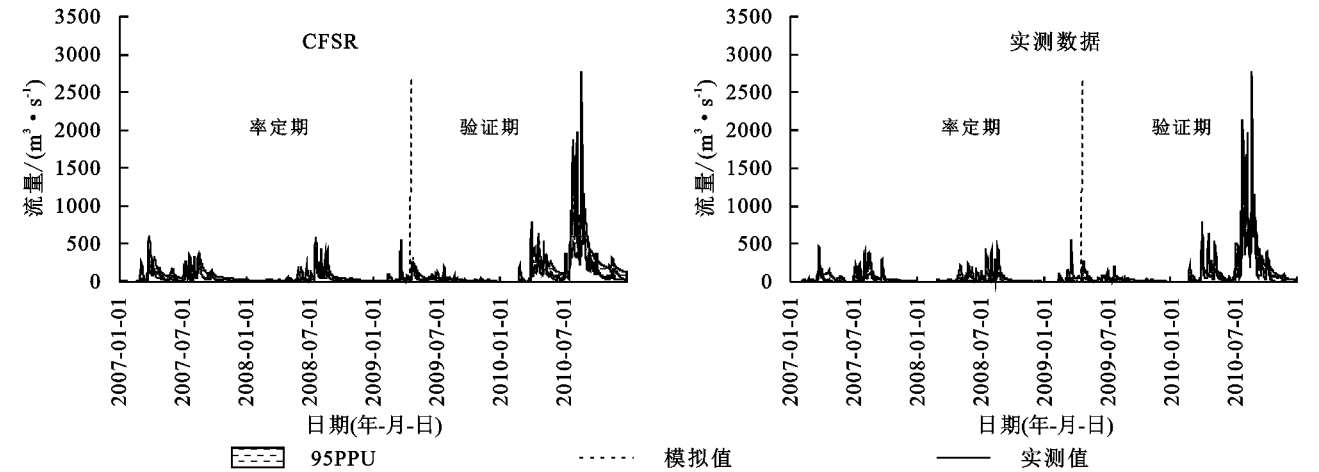


图 2 日尺度径流模拟结果

表 3 日尺度径流模拟和不确定性分析结果

参数	时期	P 因子	R 因子	R^2	NS	Bias/%
CFSR	率定期	0.69	0.75	0.60	0.57	0.40
	验证期	0.60	0.31	0.71	0.70	-8.40
实测	率定期	0.30	0.56	0.63	0.58	-23.77
	验证期	0.34	0.27	0.85	0.84	-19.12

2.2.2 月尺度径流模拟 辉发河流域月尺度径流和参数不确定性分析结果见图 3 和表 4。相较于日尺度的模拟结果,月尺度的 R^2 和 NS 值都有不同程度的提高,最高值出现在实测气象站点在验证期的结果, R^2 和 NS 值均为 0.97。实测气象站点模拟的径流相对误差在月尺度也明显降低,CFSR 的径流相对误

差由负值转化为正值。对于 P 因子和 R 因子,CFSR 和实测气象站点在月尺度上并没有明显的提高。2.2.3 融雪径流模拟精度评价 辉发河流域属于东北寒区,降雪可从每年的 10 月份持续到次年 4 月份。春季气温回暖,积雪融化速率加快,极易形成融雪性洪水。为评价 CFSR 数据集对融雪径流的模拟精度,从月尺度模拟结果中选取每年 3—5 月的径流数据,与水文站点实测的径流量进行比较,同时,以实测气象站点模拟的结果作为参考,结果见图 4。从图中可以看出,实测气象站点和 CFSR 数据集模拟的春季径流与水文站点的观测结果整体趋势较为一致。其中,利用实测气象站点的模拟的结果拟合较好,相对误差

为-4.78%。CFSR 数据集对春季径流的模拟存在

一定程度的高估,相对偏差为 32.61%。

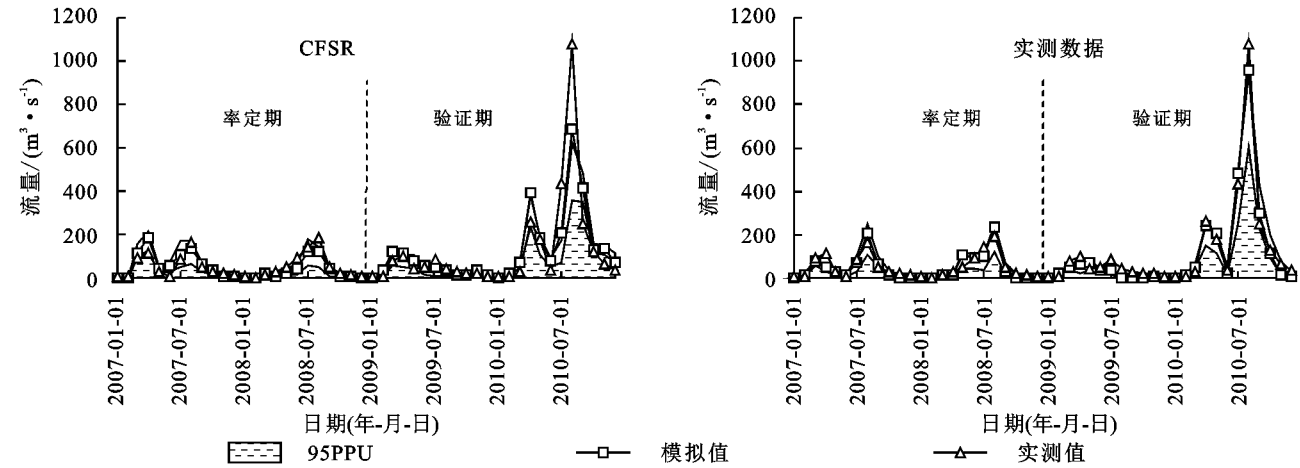


图 3 月尺度径流模拟结果

表 4 月尺度径流模拟和不确定性分析结果						
参数	时期	<i>P</i> 因子	<i>R</i> 因子	<i>R</i> ²	NS	Bias/%
CFSR	率定期	0.46	0.73	0.74	0.72	5.80
	验证期	0.42	0.24	0.82	0.78	0.60
实测	率定期	0.54	0.67	0.84	0.82	-11.94
	验证期	0.38	0.28	0.97	0.97	-5.68

2.3 蒸散发模拟结果与分析

SWAT 模型引入了 3 种方法计算蒸散发:Penman-Monteith,Priestley-Taylor 和 Hargreaves,本文采用的是模型默认的 Penman-Monteith 方法。首先计算潜在蒸散发(PET),SWAT 采用 40 cm 高的紫花苜蓿作为 Pen-

man-Monteith 方法的参照作物。确定潜在蒸散发后,实际蒸散发按以下流程计算:首先蒸发植被冠层截留的降水,然后 SWAT 采用 Richtie^[20]提出的方法计算最大散发量和最大升华/土壤蒸发,接着计算土壤的实际升华和蒸发。如果 HRU 中存在雪,将发生升华,没有雪时,土壤蒸发才会发生。将从以下 3 个方面分析蒸散发的模拟结果:(1) CFSR 和实测气象数据中影响蒸散发因素的对比分析;(2) 蒸散发模拟结果的分析;(3) 假设降水因素校正后,CFSR 其他气象因素对蒸散发模拟的影响。

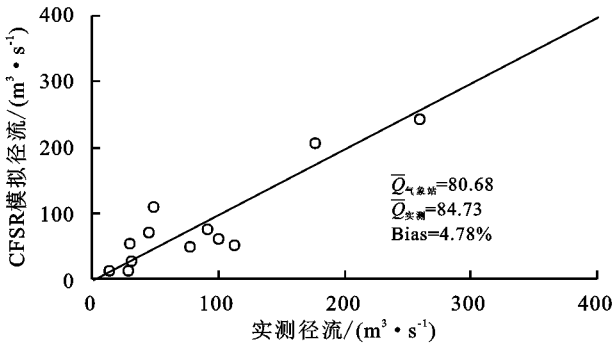
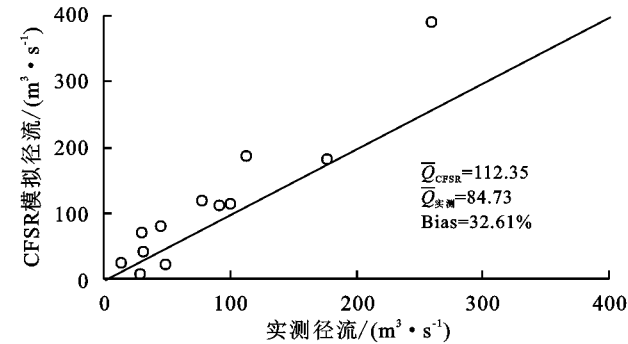


图 4 CFSR 和气象站模拟的春季径流精度评价

2.3.1 蒸散发影响因素比较 Penman-Monteith 方法中影响潜在蒸散发计算结果的因素主要为温度、相对湿度、风速和净辐射,进一步比较实测气象站点和 CFSR 的温度、相对湿度、风速和净辐射在空间上的异质性可以更好地理解潜在蒸散发的模拟结果。图 5 为 CFSR 和实测气象数据日最高温度、最低温度、相对湿度、风速和日照辐射在各子流域上的相对误差,图中蓝色表示相对误差为负值,红色表示正值。从图 5 中可以发现,CFSR 的日最高温度在整个流域都低于实测日最高温度,相对误差范围为-11.41%~-2.97%。CFSR 日最低温度在流域上游低于实测值,而在下游高于实测值。CFSR 和实测日最低温

度平均值范围分别为-0.25~0.53℃和-0.65~0.78℃,由于两者值较小,导致相对误差计算结果范围偏大(-120.98%~167.25%)。CFSR 的相对湿度、风速和日照辐射在整个流域均大于实测值,相对误差范围分别为 1.16%~8.64%,48.1%~67.89%和 7.71%~17.3%。根据刘小莽等^[21]和杨林山等^[22]对潜在蒸散发气候敏感性分析的研究结果,温度、风速和太阳辐射与潜在蒸散发的敏感系数为正值,即潜在蒸散发会随着温度、风速和太阳辐射的增加而增大,相对湿度敏感系数为负值。与实测气象数据相比,CFSR 数据集中各气象因素对潜在蒸散发估算结果正负效应都存在。

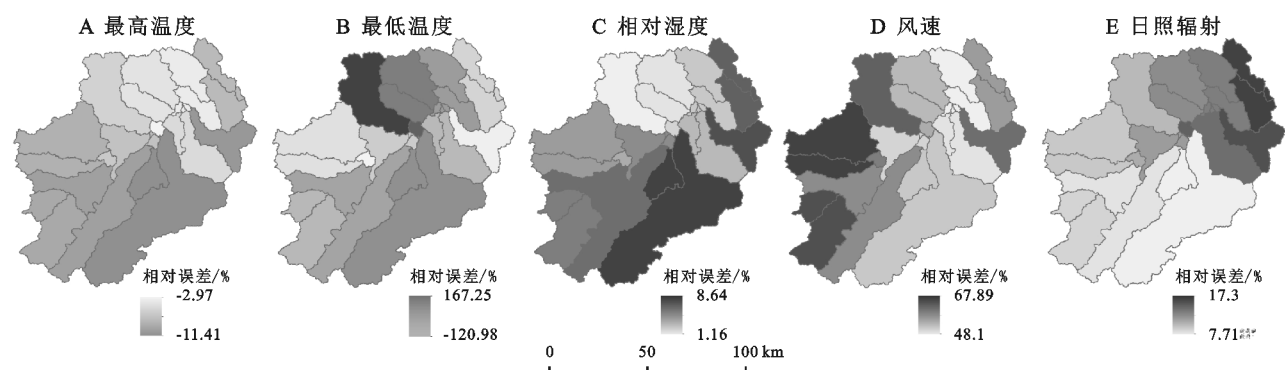


图 5 CFSR 和实测气象数据各气象因素的相对误差

2.3.2 蒸散发模拟结果比较 图 6 为 CFSR 和实测气象数据两者作为模型输入计算的 PET 和 ET 相对误差。从图 6 中可以得出,在整个流域上 CFSR 的 PET 和 ET 估算结果均高于实测气象数据的结果, PET 和 ET 的相对误差范围分别为 0.57%~20.23% 和 4.83%~17.98%,模拟误差较大。PET 和 ET 的相对误差在空间分布上并不一致, PET 相对误差较高的部分主要集中在流域下游,而 ET 相对误差较高的部分则分布在流域中上游。这是由于实际蒸散发还要考虑降水量、地表覆被类型和土壤含水量等多个因素的影响^[23-24]。综合图 5—6 的结果发现,辉发河流域 CFSR 数据集中偏高的风速和日照辐射导致其模拟的 PET 和 ET 比实测气象数据的结果偏大。

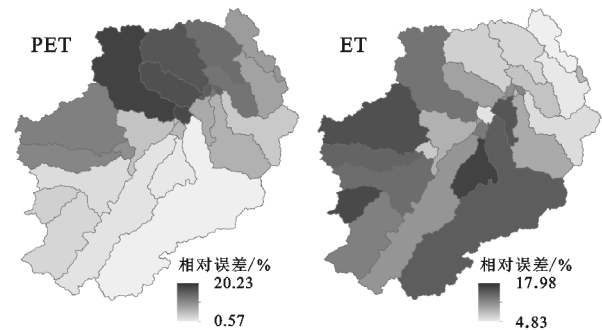


图 6 CFSR 和实测气象数据 PET 和 ET 的相对误差

2.3.3 CFSR 其他气象因素对蒸散发模拟的影响 将 CFSR 数据集中的降水因素替换为实测降水,其他因素不变,重新驱动模型,模型参数选用实测气象站点率定得到的参数。假设 CFSR 数据集中的降水经过校正后与实测结果完全一致,以实测气象站点的模拟结果作为参考,评价 CFSR 的气温、风速、相对湿度和日照时数对蒸散发模拟结果的影响,模拟结果见图 7。从图中可以看出,该模拟情景下,仅有两个子流域存在较少的低估,流域整体上的 ET 模拟结果仍然偏高,相对误差最高可达到 7.75%。这意味着,即使 CFSR 数据集中的降水经过校正后,其他气象因素对蒸散发的影响仍不可忽略。

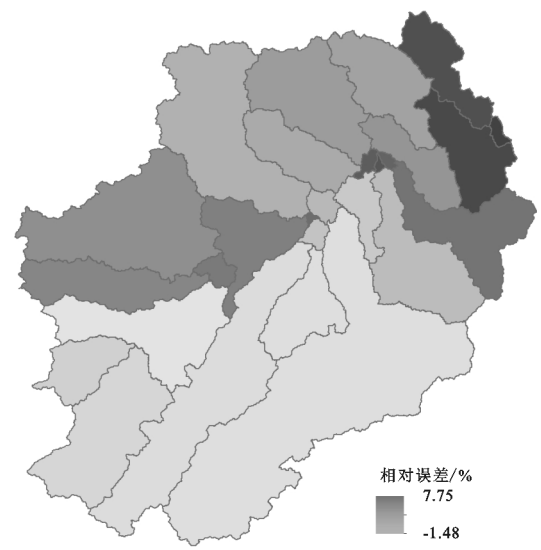


图 7 CFSR 其他气象因素对蒸散发模拟的影响

3 讨论和结论

3.1 讨论

无资料和缺资料地区水文水资源的模拟和评估是当前水文学研究的热点问题。全球再分析气象资料因其时空分辨率高、时间序列长和更新速度快等优点,越来越受到相关学者的青睐。本文以 CFSR 数据集为例,采用 SWAT 模型,评价了其在辉发河流域的适宜性。

- (1) 从精度分析结果中可以发现,和其他因素相比, CFSR 数据集中对径流模拟起关键作用的降水因素与观测值在日尺度上的相关性并不高。与 Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) 降水产品类似, CFSR 的降水因素在总量上与实测数据保持了较好的一致性,但是逐日降水的误差仍然较大,导致其相关性较低。
- (2) 与实测气象数据模拟的径流相比, CFSR 数据集在日尺度和月尺度上均表现出较好的模拟结果。实测气象数据的径流模拟结果中, Bias 值较大是由于率定过程中追求更高的目标函数 R^2 和 NS 值导致的。

(3) CFSR 数据集模拟的春季径流存在一定程度的高估。SWAT 中的融雪采用(雪堆温度与最高气温的平均值,与融雪温度阈值之差)的线性函数计算。虽然 CFSR 数据集中的最高温度和最低温度相对实测值较为偏低,但从融雪到产生径流的过程受多个因素和参数的影响,例如降雪量、CN2、ESCO 和 SOL_AWC 等参数。CFSR 和实测气象数据的差异必然导致率定得到的参数值有所不同,继而影响春季径流的模拟结果。

(4) 以往的研究通过建立 CFSR 降水数据与实测气象站点的统计关系,对 CFSR 逐格点进行校正,寻求更为准确的径流模拟结果^[11,13,25-26],但较少考虑 CFSR 数据集中温度、风速、相对湿度和日照辐射等气象因素对流域水循环其他组分的影响。本文的研究结果表明,采用 CFSR 数据集作为模型输入,其模拟的 PET 和 ET 均高于实测气象数据的模拟结果,即使将 CFSR 中的降水替换为实测降水数据,ET 仍存在一定程度的高估。

3.2 结论

本文以辉发河流域为研究区,采用 SWAT 模型,分别从径流和蒸散发两个角度评价 CFSR 数据集在该流域的适宜性。在月尺度和日尺度上构建了 4 种径流模拟情景,分析了不同数据输入和时间尺度下径流的模拟结果;以子流域作为空间单元,比较了 CFSR 数据集和实测气象数据中 PET 影响因素的相对误差,以及 PET 和 ET 的模拟误差。结果表明:(1) CFSR 数据集与站点实测数据存在一定程度的差异,尤其是风速、辐射和温度;(2) 在径流模拟方面,整体上 CFSR 数据集在日尺度和月尺度上均表现较好,但春季径流模拟结果较高;(3) 在将 CFSR 数据集应用于水文模拟时,还应考虑温度、风速和日照辐射等其他因素对流域水循环各组分的影响,对 CFSR 中各气象因素都进行校正可能会得到更为准确的模拟结果。

参考文献:

[1] Behrangi A, Khakbaz B, Jaw T, et al. Hydrologic evaluation of satellite precipitation products over a mid-size basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2011,397(3):225-237.

[2] Shen Y, Xiong A, Wang Y, et al. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115:D02114.

[3] 卫林勇,江善虎,任立良,等.多源卫星降水产品在不同省份的精度评估与比较分析[J].*中国农村水利水电*, 2019(11):38-44.

[4] 王书霞,张利平,喻笑勇,等.遥感降水产品在澜沧江流域径流模拟中的适用性研究[J].*长江流域资源与环境*, 2019,28(6):1365-1374.

[5] Li D, Christakos G, Ding X, et al. Adequacy of TRMM satellite rainfall data in driving the SWAT modeling of Tiaoxi catchment(Taihu lake basin, China)[J]. *Journal of Hydrology*, 2018,556:1139-1152.

[6] Bitew M M, Gebremichael M. Assessment of satellite rainfall products for streamflow simulation in medium watersheds of the Ethiopian highlands[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011,15(4):1147-1155.

[7] Zhu Q, Xuan W, Liu L, et al. Evaluation and hydrological application of precipitation estimates derived from PERSIANN-CDR, TRMM3B42V7, and NCEP-CFSR over humid regions in China[J]. *Hydrological Processes*, 2016,30(17):3061-3083.

[8] Prakash S, Mitra A K, Rajagopal E N, et al. Assessment of TRMM-based TMPA-3B42 and GSMaP precipitation products over India for the peak southwest monsoon season[J]. *International Journal of Climatology*, 2016,36(4):1614-1631.

[9] Bao X, Zhang F. Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Climate*, 2013,26(1):206-214.

[10] Rienecker M M, Suarez M J, Gelaro R, et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications[J]. *Journal of Climate*, 2011,24(14):3624-3648.

[11] 于宴民,穆振侠. CFSR 数据在高寒山区径流模拟中的适用性[J].*灌溉排水学报*, 2015,34(11):93-97.

[12] 胡胜,曹明明,邱海军,等. CFSR 气象数据在流域水文模拟中的适用性评价:以灞河流域为例[J].*地理学报*, 2016,71(9):1571-1586.

[13] Yu Z, Wu J, Chen X, et al. An approach to revising the climate forecast system reanalysis rainfall data in a sparsely-gauged mountain basin[J]. *Atmospheric Research*, 2019,220:194-205.

[14] Liu J, Shanguan D, Liu S, et al. Evaluation and hydrological simulation of CMADS and CFSR reanalysis datasets in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Water*, 2018,10(4):513.

[15] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. SWAT : Model use, calibration, and validation[J]. *Transactions of the Asabe*, 2012,55(4):1491-1508.

[16] 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.

- 空间格局研究:以湖北省竹溪县为例[J].农业现代化研究,2014,35(6):780-785.
- [11] 李姗姗,曹广超,赵鹏飞.秦巴山区农村居民点空间分布及其影响因素分析:以陕西省宁强县为例[J].水土保持研究,2014,21(3):186-191.
- [12] 陶卫宁.陕南汉江走廊新石器时代考古聚落研究[J].经济地理,2003,23(4):486-490.
- [13] 李瑛,陈宗兴.陕南乡村聚落体系的空间分析[J].人文地理,1994,9(3):13-21.
- [14] 周璐.陕南地区乡村聚落空间形态特征及影响因素研究[D].西安:长安大学,2018.
- [15] 徐洪光,李钰,李真.新时期下陕南地区乡村聚落的在地更新策略研究[J].建筑与文化,2017,(8):230-231.
- [16] 汉中统计局.汉中统计年鉴:2018 年[M].北京:中国统计出版社,2019.
- [17] 汉中市统计局.汉中市第三次全国农业普查主要数据公报[EB/OL]. <http://www.hanzhong.gov.cn>, 2019-05-21.
- [18] Lefever D W. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse[J]. American Journal of Sociology, 1926,32(1):88-94.
- [19] 张红,王新生,余瑞林.基于 Voronoi 图的测度点状目标空间分布特征的方法[J].华中师范大学学报:自然科学版,2005,39(3):422-426.
- [20] Duyckaerts C, Godefroy G. Voronoi tessellation to study the numerical density and the spatial distribution of neurones[J]. Journal of Chemical Neuroanatomy, 2000,20(1):83-92.
- [21] 闫庆武,谭学玲.基于 GIS 的半干旱农牧交错区农村居民点分布特征研究:以内蒙古伊金霍洛旗为例[J].干旱区资源与环境,2017,31(5):107-112.
- [22] 刘平,刘纪平,赵荣,等.近邻点指数法测度澜沧江流域居民地空间分布类型[J].测绘通报,2007(10):32-34.
- [23] 朱彬,张小林,马晓冬.苏北地区乡村聚落的空间格局及其影响因子分析[J].农业现代化研究,2014,35(4):453-459.
- [24] 金其铭.农村聚落地理[M].北京:科学出版社,1988.
- [25] 范少言.乡村聚落空间结构的演变机制[J].西北大学学报:自然科学版,1994,24(4):295-298.
- [26] 汉中市地方志编纂委员会.汉中地区志[M].西安:三秦出版社,2005.
- [27] 中华人民共和国国土资源部.第二次全国土地调查技术规程[S]. TD/T 1014-2007,2007.
- [28] 李君,李小建.综合区域环境影响下的农村居民点空间分布变化及影响因素分析:以河南巩义市为例[J].资源科学,2009,31(7):1195-1204.
- [29] 张荣天,张小林,李传武.镇江市丘陵区乡村聚落空间格局特征及其影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2013,22(3):272-278.
- [30] 角媛梅,肖笃宁,马明国.绿洲景观中居民地空间分布特征及其影响因子分析[J].生态学报,2003,23(10):2092-2100.

(上接第 306 页)

- [17] Abbaspour K C. SWAT-CUP 2012[R]. Swat Calibration and Uncertainty Program: A User Manual, 2013.
- [18] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the Asabe, 2007,50(3):885-900.
- [19] Zhu H, Li Y, Huang Y, et al. Evaluation and hydrological application of satellite-based precipitation datasets in driving hydrological models over the Huifa river basin in Northeast China[J]. Atmospheric Research, 2018,207:28-41.
- [20] Ritchie J T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover[J]. Water Resources Research, 1972,8(5):1204-1213.
- [21] 刘小莽,郑红星,刘昌明,等.海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J].资源科学,2009,31(9):1470-1476.
- [22] 杨林山,李常斌,王帅兵,等.洮河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J].农业工程学报,2014,30(11):102-109.
- [23] 董晴晴,占车生,王会肖,等.2000 年以来的渭河流域实际蒸散发时空格局分析[J].干旱区地理,2016,39(2):327-335.
- [24] 邵薇薇,徐翔宇,杨大文.基于土壤植被不同参数化方法的流域蒸散发模拟[J].水文,2011,31(5):6-14.
- [25] 高瑞,穆振侠,彭亮,等. CFSR, ERA-Interim 再分析降水数据在高寒山区径流模拟中的适用性[J].水电能源科学,2017,35(9):8-12.
- [26] 田霖,刘铁,包安明,等. CFSR 降水数据在干旱山区水文模型中的应用:以新疆开都河流域为例[J].干旱区研究,2017,34(4):755-761.