

CMADS 数据集在呼兰河流域的适用性评价

陈楷¹, 王立权^{1*}, 刘岩², 刘家溪¹

(1. 黑龙江大学 水利电力学院, 哈尔滨 150080; 2. 黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 150080)

摘要:【目的】探究中国大气同化数据集(CMADS)在呼兰河流域水文模拟的适用性。【方法】对CMADS与传统水文站降水、气温数据的精度及时空分布特征进行分析,构建CMADS与传统水文站2种气象数据驱动流域有、无水库控制水系情景下的SWAT模型,同时使用SUFI-2算法以月值实测断面径流数据为准进行模型参数的率定和验证,评价该数据集作为气象驱动数据的适用性及对传统水文站数据的可替代性。【结果】①2种气象数据具有较强的线性相关性和对应关系,且时空分布特征相似,年内变化趋势一致。②在无水库呼兰河干流水系,CMADS数据驱动模型率定期 $R^2=0.92$ 、 $NSE=0.91$ 、 $PBIAS=18.53\%$,验证期 $R^2=0.94$ 、 $NSE=0.96$ 、 $PBIAS=10.51\%$;在有水库通肯河水系,模型在率定期 $R^2=0.89$ 、 $NSE=0.82$ 、 $PBIAS=12.79\%$,验证期模型 $R^2=0.93$ 、 $NSE=0.86$ 、 $PBIAS=12.03\%$,模拟结果均达到径流模拟评价标准。【结论】CMADS+SWAT模型比传统水文站在呼兰河流域径流模拟整体效果更佳、模拟精度和适用性更好,与实测值更为接近,可为缺少气象数据的研究区建立SWAT模型提供数据支撑。

关键词: SWAT 分布式水文模型; CMADS 数据集; 水文模拟; 时空分布特征; 适用性评价

中图分类号: P333

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023215

OSID:



陈楷, 王立权, 刘岩, 等. CMADS 数据集在呼兰河流域的适用性评价[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(1): 60-68.

CHEN Kai, WANG Liquan, LIU Yan, et al. Applicability evaluation of CMADS dataset in Hulan River basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(1): 60-68.

0 引言

【研究意义】我国水资源具有时空分布不均衡和水量分配不平衡的显著特征,阻碍社会经济的发展。气候变化条件下水文模型在径流模拟和预测方面的应用对水资源的可持续发展意义十分重要^[1-2]。SWAT模型是具有物理机制的长时段分布式水文模型,能够综合考虑流域地表特征、土地表面要素的空间分布状态、土地开发利用及降水分布不均对流域水文过程的影响,模拟出基于多情景模式的流域水文循环过程,是未来水文模型发展的必然趋势^[3-5]。该模型自提出以来,已被国内外学者广泛应用于径流模拟方面的研究中。根据其他学者研究表明,模型模拟结果的精度取决于驱动数据的准确性,而气象数据的影响在几类驱动数据里最为显著,高精度、高质量的气象数据可以有效提高模型的准确性和可靠性^[6]。

【研究进展】伴随着水文模型更系统、完善的发展,应用于驱动模型构建的气象数据集也越来越多,CMADS就是其中之一,CMADS被广泛应用于我国不同地区的适用性评价,在我国西部地区,孟现勇等^[7]

将CMADS、CFSR和TWS应用于黑河流域,结果表明CMADS+SWAT模型径流模拟效果最优;在我国东北地区,张利敏等^[8]将CMADS应用于浑河流域,结果表明CMADS能够很好捕捉到地形地貌特征;在我国中部地区,骆月珍等^[9]将CMADS应用于富春江水库控制流域,结果表明对流域水量平衡的模拟分析效果较好。在我国高原地区,刘兆晨等^[10]将CMADS和CFSR应用于黄河源区,结果表明CMADS模拟效果最优。

【切入点】通过以上研究表明CMADS具有较好的研究潜力,但同一区域应用不同数据集驱动同一模型所得出的模拟结果也不尽相同,因此选择一个满足研究区适用性的气象数据集尤为重要。【拟解决的关键问题】呼兰河流域属于半干旱地区,尤其是西部较为干旱,流域内气象资料存在缺失、难于获取等问题,这样的数据会导致模型的不确定性高、模拟精度低。故本文尝试将CMADS数据集应用于呼兰河流域,并作为气象驱动数据以探究CMADS+SWAT模式在东北呼兰河流域适用性,对该区域的水文模拟研究具有重要意义。

1 研究区概况

1.1 流域概况

松花江位于我国东北地区的北部,介于北纬 $41^{\circ}42'$ — $51^{\circ}38'$ 、东经 $119^{\circ}52'$ — $132^{\circ}31'$,全长1927 km,流

收稿日期: 2023-05-16 修回日期: 2023-09-25

基金项目: 黑龙江省重点研发计划指导类项目(GZ20210061)

作者简介: 陈楷(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为水文及水资源。E-mail: 1727977919@qq.com

通信作者: 王立权(1968-),男,教授,主要研究方向为水资源、农业水土高效利用。E-mail: 15304640067@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

域面积 55.68 万 km², 约占黑龙江总流域面积的 30.2%; 呼兰河是松花江左岸一级支流, 位于黑龙江省中部, 地理位置东经 125°55′—128°43′, 北纬 45°52′—48°03′ 之间, 流域东北部以小兴安岭为界, 南至青山岭, 西邻明青坡地, 地势东北高, 西南低。全长 523 km, 总流域面积为 31 424 km², 约占松花江流域面积的 6.56%, 是松花江流域第三大支流, 呼兰河干流水系无水库情景; 通肯河是呼兰河一级支流, 位于呼兰河右岸, 发源于小兴安岭西南麓, 全长 378 km, 流域总面积 10 583 km², 通肯河干流水系内有 1 座大(II) 型水库和梯级中型水库, 如图 1 所示。

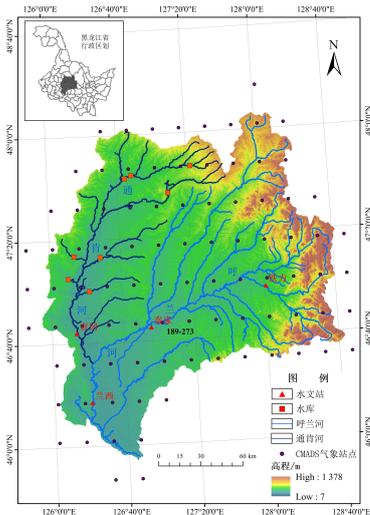


图 1 研究区地形及 CMADS 站点分布图

Fig.1 Topography and CMADS site distribution map of research area

1.2 水文气象特征

呼兰河流域属中温带大陆季风气候区, 冬季寒冷干燥, 夏季温湿多雨, 春秋季节短暂, 天气变化剧烈。降雨量受地形抬升和热力对流作用影响较大, 由东向西递减趋势。呼兰河流域属于半干旱地区, 尤其是西部较为干旱, 平均降水量东部为 600 mm 左右, 西部为 400 mm 左右, 最小为 322 mm^[11]。降水量年际变化大, 年内分配不均, 多集中在汛期 6—9 月, 占全年总降水量的 71.6%。

2 数据来源与研究内容

2.1 数据与处理

SWAT 建模所需的数据较多, 用以模拟多种水文循环的过程, 主要分为地理空间数据和气象驱动数据两大类。地理空间数据包括 DEM 数据、土地利用数据和土壤数据。气象驱动数据由呼兰河流域水文站提供的降水数据、最高、最低气温数据, 以及 CMADS 气象数据集。

2.1.1 地理空间数据

DEM 数据通过地理空间数据云平台下载 90 m 分

辨率的 SRTM 原始高程数据, 该数据是提取流域地貌特征和水文要素的基础, 基于高程推导出水系流向并生成流域河网、子流域划分和坡度数据。经过 ArcGIS 按照研究区矢量边界裁剪处理生成的流域边界如图 1 所示。

土地利用数据选用中国科学院地理科学与资源研究所资源环境数据云平台 1 km 分辨率的黑龙省 2015 年土地利用数据, 该数据反映出流域土地开发利用情况、地表特征及空间分布状态, 同时影响降水在陆面的成流过程。经数据处理后的土地利用类型如图 2 所示。

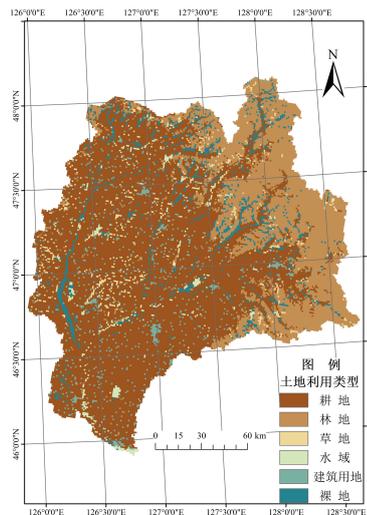


图 2 土地利用类型图

Fig.2 Land use type map

土壤数据选自联合国粮食及农业组织的 1 km 分辨率土壤数据库 (HWSD), 根据流域内土壤类型构建土壤物理属性数据库, 该数据库能反映出流域土壤类别、空间分布以及各种物理属性信息。一些基础物理属性信息直接从 HWSD 获取, 另一部分需通过 SPAW 软件和公式计算所得^[12-13]。经数据处理后的土壤类型, 如图 3 所示。

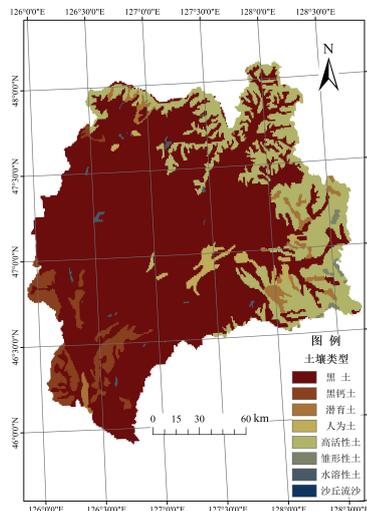


图 3 土壤类型

Fig.3 Soil type map

2.1.2 气象数据

气象数据作为 SWAT 模型的主要驱动数据,其影响降水、蒸发等主要水文循环过程,其精准性至关重要。研究区内水文站较少,主要集中在流域东南部,分布不均,无法代替整个流域的气候变化情况,导致模拟结果不确定性高。CMADS 数据集引入中国气象局大气同化系统为基础,数据循环嵌套、重采样及双线性插值等多种技术手段相结合,具有数据来源广、多时间尺度和多分辨率的特点^[14-15]。故本文采用 CMADSV1.0 作为 SWAT 模型的气象驱动数据,保证气象输入数据的可靠性,流域内 CMADS 站点分布如图 1 所示。

CMADSV1.0 数据集在寒区旱区科学数据中心下载,数据网格的空间分辨率为 1/3°。该数据集的时间范围是 2008—2016 年,SWAT 模型读取 CMADS 的 91 个站点降水、气温、湿度、辐射和风速数据 5 个气象要素^[16-18]。

2.2 研究模型

2.2.1 SWAT 模型构建

SWAT 模型作为典型的分布式水文模型,基于高程数据和数字化河网对子流域的生成进行引导,由下垫面土地利用和土壤数据进行水文响应单元的划分,每个子流域内相同属性的不同响应单元具有不同的水文特性。SWAT 模型要求各图层数据具有相同的坐标系,建模之前需要先将三类空间数据图层的经纬度坐标转化成 AlbersWGS1984 地理坐标系,并在 WGS_1984_UTM_Zone_51N 坐标系下统一进行投影变换。技术路线如图 4 所示。

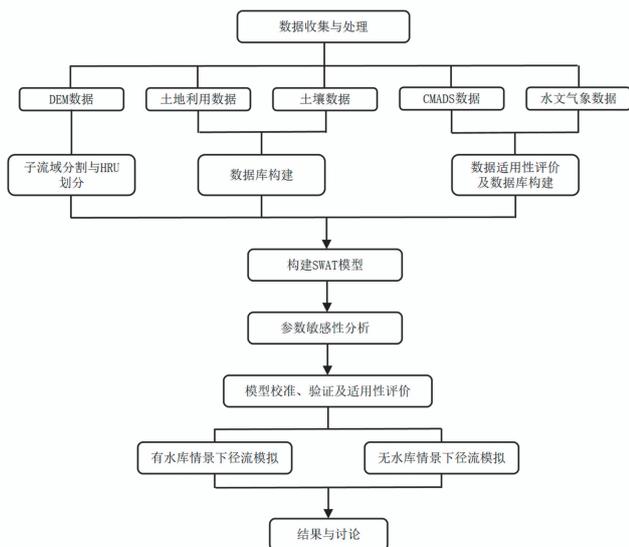


图 4 技术路线图

Fig.4 Framework of technical routes

1) 水系提取和子流域划分

添加数字化河网,根据 DEM 与河网数据的匹配将子流域面积阈值设为 16 000 hm²,添加流域出水口

并完成河网水系生成和子流域分割计算。共划分为 85 个子流域,平均子流域面积为 358.76 km²,如图 5 所示。

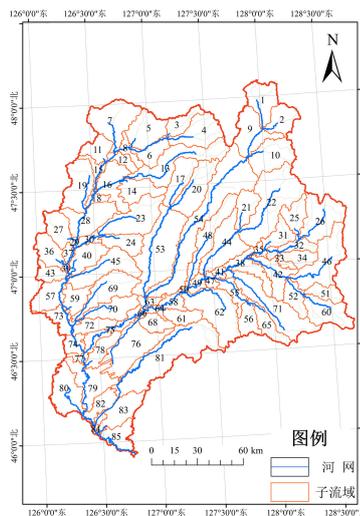


图 5 子流域分布图

Fig.5 Sub watershed distribution map

2) 水文响应单元划分

在产流计算中,水文响应单元反映出地表特征和土壤种类变化对产流和蒸发的影响。总径流量是单个 HRU 内的汇流量叠加到子流域,最后通过河网汇流推算整个流域得到。设置子流域内多目标 HRUS 土地利用、土壤类型和坡度因素优势面积临界值为 10%、10%、20%,则低于该值的影响因素将被并到优势类型中^[19]。流域共划分为 2 665 个 HRU。

3) 参数写入与运行

写入 2008—2016 年 CMADS 气象驱动数据,为避免误差将模型初始化,本文设置模型预热期为 1 a,率定期为 2009—2013 年,验证期为 2014—2016 年,完成流域水文模型的构建。

2.2.2 SUFI-2 算法

SWAT 模型参数较多,为选出对模拟结果影响较大的参数,在模型的初次运行结束后,需进行参数的敏感性分析^[20-21]。本文参数的率定和验证采用 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 算法,该算法是建立在综合优化与梯度搜索方法的基础上,实现了多种参数的同步率定,并考虑了模型参数与结构上的不确定性,具有运行简单、计算效率高和精度可靠等优点^[22-24]。故本文选用 SUFI-2 算法,并利用 t 检验法进行模型参数敏感性分析。参数的敏感性和显著性通过 t-Stat 和 P-Value 表示,t-Stat 值越大敏感性越强;P-Value 值越接近 0 显著程度越高^[25-26]。

2.3 水文模型模拟效果评价指标

选取秦家水文站以及最近的 CMADS 的 189~273 编号站点进行分析。对于降水和气温采用 C、RSR 和 PBIAS 指标(表 1)表征 CMADS 数据集在该地区的精度效果。

为评价 SWAT 模型输出的径流模拟精度效果, 采用 *PBIAS*、*NSE* 和 R^2 指标 (表 1) 进行评价, 比较传统气象站和 CMADS 模拟结果与实测断面径流的拟合精度。

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}}, \quad (1)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2]}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2]}}, \quad (2)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{obs,i} - Q_{sim,i})]}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \times 100, \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_{obs,i} - Q_{sim,i}]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs}]^2}, \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}, \quad (5)$$

式中: $Q_{obs,i}$ 为实测值 (m^3/s); $Q_{sim,i}$ 为模拟值 (m^3/s); \bar{Q}_{obs} 和 \bar{Q}_{sim} 分别为实测和模拟的平均值 (m^3/s); n 为数据个数。

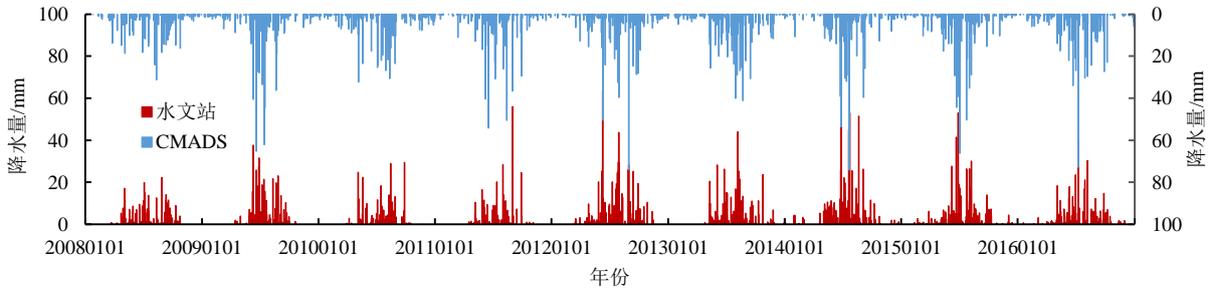


图 6 日尺度降水过程对比图

Fig.6 Comparison map of daily precipitation process

作散点图进行 CMADS 降水数据的线性拟合评估, 如图 7 所示。CMADS 降水与实测降水的 C 为 0.5, RSR 为 0.63, $PBIAS$ 为 20.73%, 如表 2 评价结果所示。表明二者之间具有较强的线性相关性且误差小、偏离程度较低; 总体而言, CMADS 降水数据在降水量的模拟上, 有着不错的表现, 凸显出 CMADS 降水数据在呼兰河流域具有适用性, 可替代研究区的实际降水情况。

相对于降水来说, CMADS 气温数据的拟合效果明显更好。从图 8 日尺度气温过程线中可以看出 CMADS 与实测最高最低气温变化趋势一致, 个别年

本文根据 Moriasi 评价指南: 当指标 $RSR \leq 0.7$, $-25\% \leq PBIAS \leq +25\%$, $0.5 < NSE$, 且 $R^2 > 0.7$ 时, 则认为模拟结果是满意的^[27]。

表 1 模拟效果评价指标

Tab.1 Simulation effect evaluation indicators

名称	定义	取值范围	最优值
相关系数 C	评价模拟值与实测值的线性相关程度	[-1, 1]	1
均方根误差与观测值标准差的比率 RSR	评价模拟值与实测值的偏差	[0, ∞]	0
百分比偏差 $PBIAS$	评价模拟值与实测值的百分比偏差大小	[- ∞ , ∞]	0
纳什效率系数 NSE	评价模拟径流过程与实测径流过程的拟合程度	[0, 1]	1
决定系数 R^2	评价模拟值与实测值的吻合程度	[0, 1]	1

3 结果与讨论

3.1 CMADS 精度与时空分布特征评价

3.1.1 日尺度精度评价

气象数据的不确定性决定了径流模拟的结果, 而降水数据是否精确, 直接影响着气象数据的精准度, 作日尺度降水变化趋势过程线可以直观分析出 CMADS 与秦家水文站的降水拟合度。由图 6 可以看出, 除 2008 年出现峰差导致模拟差异, 2010—2016 年 CMADS 降水呈现出的峰值及峰值期与水文站降水大都有较好对应关系, 且 CMADS 在汛期的降水突变情况模拟性能较好。

份出现偏大偏小现象, 总体差异较小, 吻合程度高。

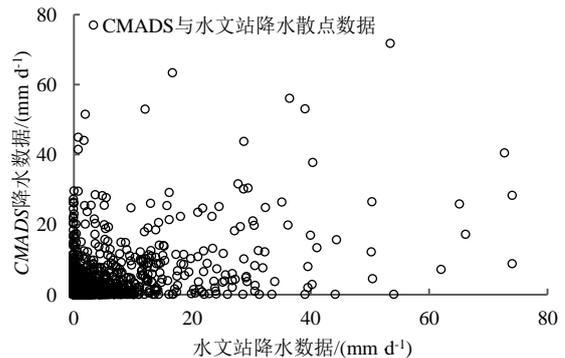


图 7 日降水散点图

Fig.7 Daily precipitation scatter plot

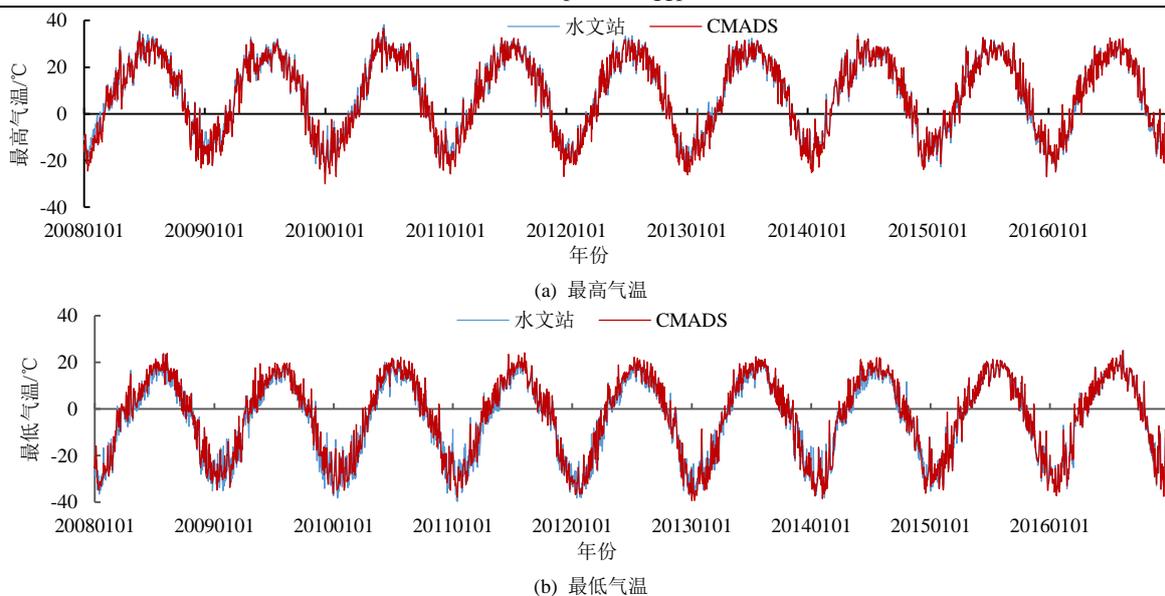


图 8 日尺度最高、最低气温过程对比图

Fig.8 Comparison of daily maximum and minimum temperature processes

由图 9 可知, CMADS 与实测的最高、最低气温之间的 C 分别达到了 0.98 与 0.97, RSR 分别为 0.03 与 0.07, $PBIAS$ 分别为 8.79% 与 18.02%。降水、气温

模拟评价结果如表 2 所示。故 CMADS 气温具有高精度和可靠性, 可替代研究区的实际气温情况。

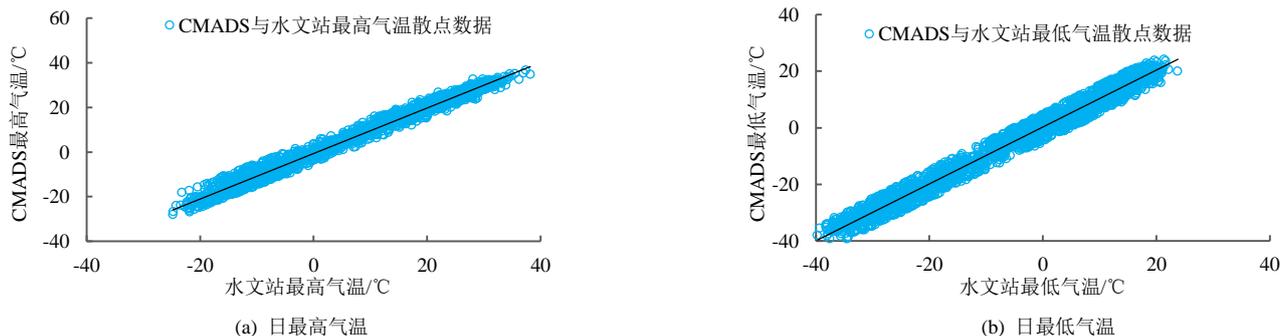


图 9 日最高温度和日最低温度散点图

Fig.9 Scatter plot of daily maximum temperature and daily minimum temperature

表 2 降水、气温模拟评价指标结果

Tab.2 Evaluation index results of precipitation and temperature simulation

		C	RSR	$PBIAS$
秦家水文站&CMADS189-273				
气温	降水	0.5	0.63	20.73
	最高	0.98	0.03	8.79
	最低	0.97	0.07	18.02

3.1.2 降水、气温时空分布特征评价

为充分考虑地形对气候因素的影响, 避免降水和气温在空间插值时出现偏差, 本文采用协同克里金插值法对 CMADS 的 91 个站点进行空间插值。协同克里金插值是克里金法在处理多变量问题时的改进, 采用交叉协方差和交叉半变异函数基于多个区域化变量之间的相关性和空间关系建立变异函数模型, 以得到区域化变量取值的无偏和最优估计^[28]。

时间分布上, 流域年内降水分配不均匀, 降水主要集中于汛期, 占全年总降水量的 71.6%, 其次是非汛期, 占全年的 21%; 空间分布上, 降水量随地形海

拔升高而逐渐增加, 东北部被小兴安岭及其余山脉所围绕, 由于山脉气流的抬升作用, 降水量由东向西逐渐递减, 如图 10 所示。

时间分布上, 日最高气温均值在汛期, 约 30 °C, 日最低气温均值在冰冻期, 约 -27 °C。自最高气温的冰冻期开始, 3~6 °C 气温带自西南逐渐转移, 于非汛期到达流域中部, 后于汛期到流域东北端, 此为年内的气温循环。空间分布上, 伴随着海拔的升高气温逐渐降低。通过以上对降水和气温的时空分布特征分析, 说明 CMADS 降水和气温数据能够较好的捕捉到研究区地形的变化特征^[29], 如图 11 所示。

3.2 模型参数率定

经过模型多次迭代计算, 选取敏感性最强的 6 个参数进行分析, 如图 11 和表 3 所示。并以流域实测断面月径流资料为准分别对 CMADS 和传统水文站 2 种输入数据下的模拟结果进行参数率定。

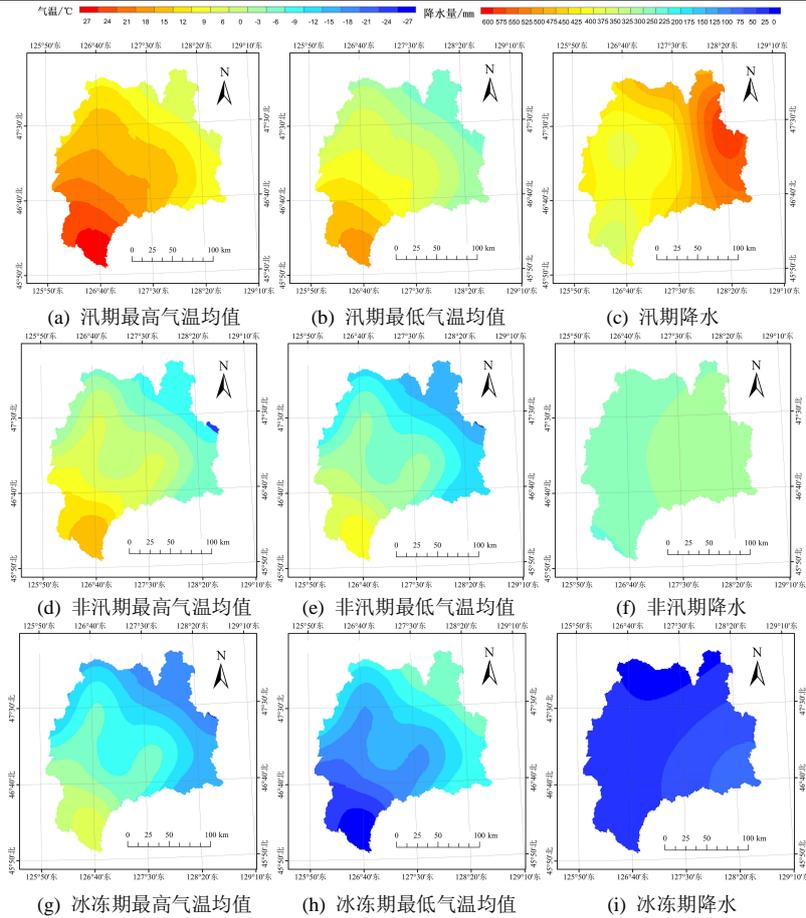


图 10 CMADS 时空分布特征图

Fig.10 CMADS spatiotemporal distribution feature map

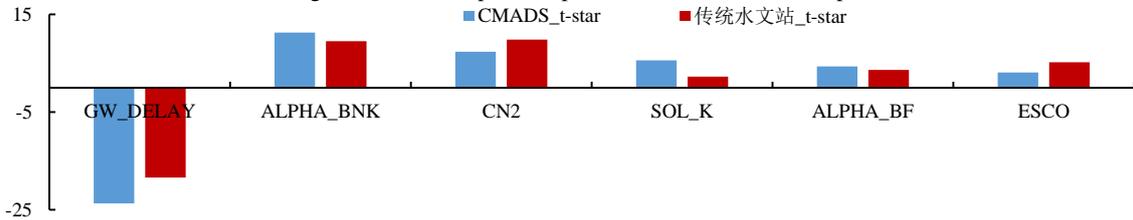


图 11 参数敏感性分析图

Fig.11 Parameter sensitivity analysis chart

表 3 径流敏感性参数分析

Tab.3 Analysis of runoff sensitivity parameters

参数	CMADS				传统水文站			
	t-Stat	P-Value	敏感性排序	参数最优值	t-Stat	P-Value	敏感性排序	参数最优值
GW_DELAY	-23.69	0.00	1	418.50	-18.41	0.00	1	360.00
ALPHA_BNK	11.26	0.00	2	0.83	9.53	0.00	3	0.76
CN2	7.34	0.00	3	-0.15	9.85	0.03	2	-0.22
SOL_K	5.63	0.00	4	0.20	2.26	0.00	6	0.14
ALPHA_BF	4.36	0.02	5	0.48	3.63	0.03	5	0.45
ESCO	3.12	0.01	6	0.94	5.22	0.02	4	0.78

3.3 径流量模拟结果及适用性评价

3.2.1 无水库情景下呼兰河干流水系径流量模拟结果分析

以秦家水文站实测断面月径流量为准, 分别将 CMADS 与传统水文站降水量作为模型驱动数据, 得到呼兰河干流水系径流量模拟结果, 使用 SUFI-2 算法对率定期模拟结果进行参数率定, 将率定好的参数回代入模型进行修正, 得到模拟结果如图 12 所示。

由月径流量模拟对比和评价指标结果可以看出,

在月尺度上, 模型在率定期和验证期径流量模拟效果较为理想, 降水量变化趋势与径流量变化趋势一致, 在整个模拟期内 R^2 和 NSE 均 >0.90 , $PBIAS$ 均 $<25\%$, 模拟效果非常好, 吻合程度高, 偏差小, 如图 12 和表 4 所示。说明 CMADS 降水数据在呼兰河干流无水库水系情景下具有适用性, 但是 CMADS 降水数据在率定期的模拟精度略低于传统水文站降水数据模拟结果。

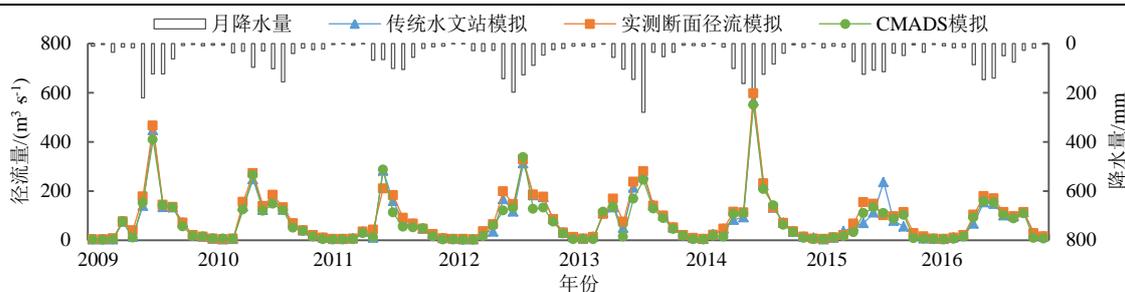


图 12 秦家水文站月径流量模拟对比

Fig.12 Comparison of monthly runoff simulation at Qinjia hydrological station

表 4 秦家水文站月径流量模拟评价指标结果

Tab.4 Results of evaluation indexes for monthly runoff simulation of Qinjia hydrological station

时间	CMADS			传统水文站		
	R^2	NSE	$PBIAS$	R^2	NSE	$PBIAS$
率定期	0.92	0.91	18.53	0.91	0.96	11.73
验证期	0.94	0.96	10.51	0.92	0.93	12.53

3.2.2 有水库情景下通肯河水系径流量模拟结果分析

由于水库的建设、蓄水、调控等人为干扰使水系径流发生了或多或少的突变,下游径流量补给受季节、降水的影响减少,从而导致模拟值与天然径流量存在差别^[30]。在模型水库模块添加水库的基础信息和水库流出,采用相同的建模方法和率定过程,以 2 种降水数据驱动模型,选择青冈水文站实测断面月径流量对模拟结果进行对比分析,如图 13 所示。

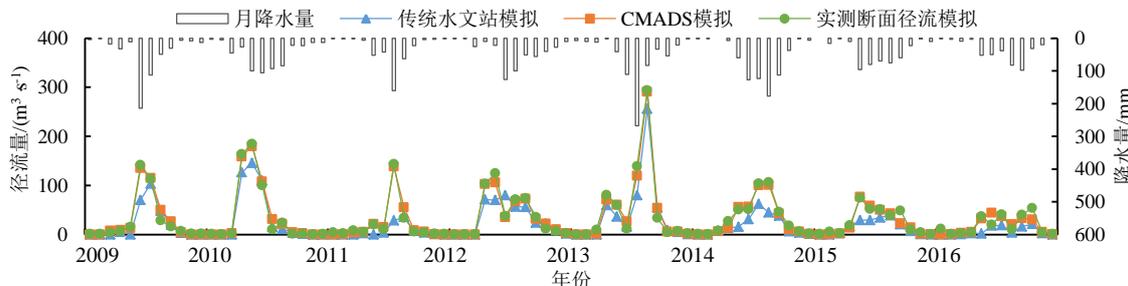


图 13 青冈水文站月径流量模拟对比

Fig.13 Comparison of monthly runoff simulation at Qinggang hydrological station

由月径流量模拟对比和评价指标结果可以看出:在月尺度上,整个模拟期内 2 种不同降水资料的径流模拟结果 R^2 、 NSE 和 $PBIAS$ 均十分理想。降水与径流变化趋势吻合,CMADS 驱动模型各评价指标均大于传统水文站模拟结果,在径流量出现突变的月份 CMADS 径流峰值更接近实测值,如图 13 和表 5 所示。但 SWAT 模型在冰冻期径流模拟相较汛期和非汛期效果较差,其主要原因是东北地区冰冻期降水稀少,土壤结冻,降水以降雪的形式出现,以及水库进行蓄水等导致汇入河流的水量减少,从而对径流产生一定的影响。

表 5 青冈水文站月径流量模拟评价指标结果

Tab.5 Results of evaluation indexes for monthly runoff simulation of Qinggang hydrological station

时间	CMADS			传统水文站		
	R^2	NSE	$PBIAS$	R^2	NSE	$PBIAS$
率定期	0.89	0.82	12.79	0.79	0.73	19.36
验证期	0.93	0.86	12.03	0.85	0.91	16.93

气象数据作为水文模型的主要输入数据,由于研究区水文站点较少,且集中在流域东南部,分布不均,

单站点的降水控制面积有限,无法代替整个流域的气候变化情况。传统水文站数据驱动模型会导致降水在空间插值时出现偏差,使得径流模拟效果不佳;而 CMADS 的运用正好弥补了这一偏差,其数据来源广、多时间尺度和多分辨率的特点使得空间插值精确度更高,偏差小,模拟结果更为精确。

从国内各研究学者成果来讲^[7-10],在不同流域运用 SWAT 模型并取得良好的效果,由于呼兰河流域气象数据缺测及站点分布不均导致不能满足精细化的需求,引入了 CMADS 数据集作为流域气象驱动数据。区别于以往研究,本文将 CMADS 数据应用于流域内的两个水系有、无水库情景下进行适用性模拟,结果表明 CMADS 数据具有精准性和优越性,且模拟的效果满足评价指标。但 CMADS 数据集仅提供 2008—2016 年气象数据,无法满足长序列水文气象研究,因此,在后续的研究中会进一步探究不同降水数据在资料缺乏地区的精度表现。

4 结论

1) 从精度评价和时空分布特征来说,CMADS

在降水和气温的模拟上整体效果良好,与传统水文站数据具有较强的线性相关性和对应关系,且时空分布特征相似,年内变化趋势一致。

2) 在有、无水库情景下模拟结果均达到径流模拟评价标准,说明 CMADS 在研究区具有很好的适用性,且比传统水文站径流模拟效果更好,可为缺少气象数据的研究区提供数据支撑。

3) 径流变化除了受自然因素的影响,还受许多人为因素的影响。本文研究基础性较强,未考虑基于多情景模式下 CMADS 数据输入模型模拟的适用性。因此,后续开展流域基于人类活动、土地利用变化或面源污染情况等多情景模式的流域径流模拟还有待进一步深入研究。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 张爽, 曾献奎, 吴吉春. 提孜那甫河流域融雪径流模拟及不确定性分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(5): 1 415-1 424.
ZHANG Shuang, ZENG Xiankui, WU Jichun. Snowmelt runoff simulation and uncertainty analysis in Tizinafu River basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(5): 1 415-1 424.
- [2] 邱淑伟, 吴亚敏, 柯昱琪, 等. 基于遍历搜索算法的水文地质参数优化求解[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(6): 1 854-1 861.
QIU Shuwei, WU Yamin, KE Yuqi, et al. Optimization of hydrogeological parameters based on ergodic search algorithm[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(6): 1 854-1 861.
- [3] 闫红飞, 王船海, 文鹏. 分布式水文模型研究综述[J]. 水电能源科学, 2008, 26(6): 1-4.
YAN Hongfei, WANG Chuanhai, WEN Peng. Overview of studies on distributed hydrological model[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(6): 1-4.
- [4] 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.
ZHANG Yinhui. Development of study on model-SWAT and its application[J]. Progress in Geography, 2005, 24(5): 121-130.
- [5] TAHMASEBI NASAB M, GRIMM K, BAZRKAR M H, et al. SWAT modeling of non-point source pollution in depression-dominated basins under varying hydroclimatic conditions[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(11): 2 492.
- [6] 廖亚一, 吕海深, 李占玲. 气象数据不确定性对 SWAT 模型径流模拟影响[J]. 人民长江, 2014, 45(9): 34-38.
LIAO Yayi, LYU Haishen, LI Zhanling. Influence of meteorological data uncertainty on runoff simulation by SWAT model[J]. Yangtze River, 2014, 45(9): 34-38.
- [7] 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.
MENG Xianyong, SHI Chunxiang, LIU Shiyin, et al. CMADS datasets and its application in watershed hydrological simulation: A case study of the Heihe River basin[J]. Pearl River, 2016, 37(7): 1-19.
- [8] 张利敏, 王浩, 孟现勇. 基于 CMADS 驱动的 SWAT 模型在辽宁浑河流域的应用研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 1-9.
ZHANG Limin, WANG Hao, MENG Xianyong. Application of SWAT model driven by CMADS in Hunhe River basin in Liaoning Province[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(5): 1-9.
- [9] 骆月珍, 顾婷婷, 潘娅英, 等. 基于 CMADS 驱动 SWAT 模型的富春江水库控制流域水量平衡模拟[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(4): 106-112.
LUO Yuezhen, GU Tingting, PAN Yaying, et al. Simulation of basin water balance controlled by Fuchunjiang Reservoir watershed based on SWAT model driven by CMADS[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, 35(4): 106-112.
- [10] 刘兆晨, 杨梅学, 万国宁, 等. 新型卫星降水产品在黄河源区的适用性分析: 以 SWAT 模型为例[J]. 高原气象, 2021, 40(2): 403-410.
LIU Zhaochen, YANG Meixue, WAN Guoning, et al. Applicability of new satellites precipitation products in source region of Yellow River: Using SWAT model as an example[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(2): 403-410.
- [11] 王宏伟, 王大伟. 呼兰河流域水资源供需平衡分析[J]. 黑龙江水专学报, 2010, 37(1): 115-119.
WANG Hongwei, WANG Dawei. Analysis on the supply and demand balance of water resources in Hulan River basin[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering, 2010, 37(1): 115-119.
- [12] 魏怀斌, 张占庞, 杨金鹏. SWAT 模型土壤数据库建立方法[J]. 水利水电技术, 2007, 38(6): 15-18.
WEI Huaibin, ZHANG Zhanpang, YANG Jinpeng. Establishing method for soil database of SWAT model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(6): 15-18.
- [13] 王蕾, 魏晓妹, 降亚楠, 等. 关中平原灌区 SWAT 模型基础数据库的构建[J]. 水电能源科学, 2017, 35(7): 13-17.
WANG Lei, WEI Xiaomei, JIANG Ya'nan, et al. Construction of basic database for SWAT model in Guanzhong plain irrigation district[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(7): 13-17.
- [14] 孟现勇, 王浩, 雷晓辉, 等. 基于 CMDAS 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, 37(21): 7 114-7 127.
MENG Xianyong, WANG Hao, LEI Xiaohui, et al. Simulation, validation, and analysis of the hydrological components of Jing and Bo River basin based on the SWAT model driven by CMADS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7 114-7 127.
- [15] 张春辉, 王炳亮. CMADS 与传统气象站数据驱动下的 SWAT 模型模拟效果评价: 以苦水河流域为例[J]. 中国农村水利水电, 2018(6): 52-57.
ZHANG Chunhui, WANG Bingliang. Evaluation of runoff simulation effects of the SWAT model driven by CMADS and traditional meteorological station data: Taking the case study in Kushui River basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(6): 52-57.
- [16] 王一然, 丁文峰, 张冠华. 基于 SWAT 模型的丹江流域土地利用变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 62-67, 74.
WANG Yiran, DING Wenfeng, ZHANG Guanhua. Study on the impact of land use change on runoff in Danjiang watershed based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 62-67, 74.
- [17] 田扬, 肖桂荣. 基于 CMADS 驱动下 SWAT 模型的敖江流域径流模拟[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 27-32.
TIAN Yang, XIAO Guirong. Runoff simulation for Aojiang River basin using SWAT model driven by China meteorological assimilation driving datasets[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(11): 27-32.
- [18] 孟现勇, 王浩. SWAT 模型中国大气同化驱动数据集 (CMADSV1.0)(2008-2016)[DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, 2018.
MENG Xianyong, WANG Hao. China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model Version 1.0 (2008-2016)[DB/OL]. National Qinghai Tibet Plateau Science Data Center, 2018.

- [19] WINCHELL M. ArcSWAT 2009 用户指南[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2012.
- [20] YU J, NOH J, CHO Y. SWAT model calibration/validation using SWAT—CUP II: Analysis for uncertainties of simulation run/iteration number[J]. Journal of Korea Water Resources Association, 2020, 53(5): 347-356.
- [21] MICHAEL MAMO K H, JAIN M K. Runoff and sediment modeling using SWAT in gumera catchment, Ethiopia[J]. Open Journal of Modern Hydrology, 2013, 3(4): 196-205.
- [22] KHALID K, ALI M F, RAHMAN N F A, et al. Sensitivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm[J]. Procedia Engineering, 2016, 162: 441-447.
- [23] BO H J, DONG X H, LI Z H, et al. Analysis of water balance components and parameter uncertainties based on SWAT model with CMADS data and SUFI-2 algorithm in Huangbaihe River catchment, China[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2020, 19(2): 637-650.
- [24] ABBASPOUR K C, YANG J, MAXIMOV I, et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT[J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2/3/4): 413-430.
- [25] 祁敏, 张超. 基于 SWAT 模型的阿克苏河流域径流模拟[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 283-287.
- QI Min, ZHANG Chao. Runoff simulation in Aksu River basin based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 283-287.
- [26] 王尹萍, 姜仁贵, 解建仓, 等. 基于 SWAT 模型的泾河流域月径流分布式模拟[J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(2): 135-144, 158.
- WANG Yinping, JIANG Rengui, XIE Jiancang, et al. Research on the monthly runoff distributed simulation and its application in Jinghe River basin based on SWAT model[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020, 36(2): 135-144, 158.
- [27] 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.
- [28] 阳宽达, 谢红霞, 隋兵, 等. 基于 GIS 的降雨空间插值研究: 以湖南省为例[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 134-138, 145.
- YANG Kuanda, XIE Hongxia, SUI Bing, et al. Research on spatial interpolation of rainfall based on GIS: A case study of Hunan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 134-138, 145.
- [29] 骆成彦, 陈伏龙, 何朝飞, 等. CMADS 在玉龙喀什河径流模拟中的适用性研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1 090-1 101.
- LUO Chengyan, CHEN Fulong, HE Chaofei, et al. Applicability of CMADS in runoff simulation of Yulong Kashi River[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1 090-1 101.
- [30] 洪梅, 林豪栋. CMADS 降水数据在温带东亚季风气候区水库控制流域适用性——以潮白河、东洋河流域为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(3): 833-842.
- HONG Mei, LIN Haodong. Applicability of CMADS precipitation data in reservoir control basin of temperate East Asian monsoon climate region: A case study of Chaobai River and Dongyang River basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(3): 833-842.

Applicability evaluation of CMADS dataset in Hulan River basin

CHEN Kai¹, WANG Liquan^{1*}, LIU Yan², LIU Jiayi¹

(1. Institute of Water Conservancy and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;

2. Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin 150080, China)

Abstract: 【Objective】 The purpose of this paper is to explore the applicability of China Meteorological Assimilation Datasets(CMADS) in hydrological simulation of Hulan River basin. 【Method】 The accuracy and spatiotemporal distribution characteristics of precipitation and temperature data from CMADS and traditional hydrological stations was analyzed, SWAT models driven by two types of meteorological data: CMADS and traditional hydrological stations was constructed, and SUFI-2 algorithm was used to calibrate and validate model parameters based on monthly measured cross-sectional runoff data. The applicability of this dataset as meteorological driven data and its substitutability for traditional hydrological station data were evaluated. 【Result】① The two types of meteorological data had strong linear correlation and corresponding relationships, and their spatiotemporal distribution characteristics were similar, with consistent trends within the year. ② In the main stream of Hulan River without reservoir, the evaluation index under the CMADS data-driven model were the rate regularly period $R^2=0.96$, $NSE=0.93$, $PBIAS=20.63\%$, and the validation period $R^2=0.98$, $NSE=0.97$, $PBIAS=7.51\%$; In the Tongken River system with a reservoir, the model had a regular flow rate of $R^2=0.88$, $NSE=0.80$, and $PBIAS=12.86\%$. During the validation period, the models had $R^2=0.97$, $NSE=0.96$, and $PBIAS=12.05\%$, and the simulation results all meet the evaluation criteria for runoff simulation. 【Conclusion】 CMADS+SWAT model had better overall effect, simulation accuracy and applicability than traditional hydrological stations in runoff simulation of Hulan River basin, and was closer to the measured value, which can provide data support for establishing SWAT model in the study area lacking meteorological data.

Key words: SWAT distributed hydrological model; CMADS data set; hydrological simulation; spatial and temporal distribution characteristics; applicability evaluation

责任编辑: 赵宇龙