

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221921

# DEM 分辨率及气象数据对寒区永翠河 小流域径流 SWAT 模拟的影响

张丽娜, 孙颖娜, 申智鹏, 胡金辉

(黑龙江大学水利电力学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 由于降雪、融雪及冻土层存在等因素, 寒区水文循环过程具有特殊性。为探讨寒区小流域水文规律, 模拟径流形成过程, 以永翠河流域为例, 选取流域 1994~2015 年总计 22 年的水文资料, 构建适用于寒区流域径流模拟的 SWAT 模型, 并分析不同分辨率 DEM 及实测气象数据、CMADS 数据集、CFSR 数据集三种气象数据在永翠河流域的适用性。结果表明, SWAT 模型能较好地模拟永翠河流域径流过程, DEM 分辨率对流域特征值提取影响较大但对径流模拟影响不明显; 不同气象数据适用性差别显著, 实测气象数据模拟效果最好, CMADS 数据集模拟效果较好, CFSR 数据集模拟效果差。结果为寒区小流域进一步研究提供了参考。

**关键词:** SWAT 模型; 寒区; 小流域; 径流模拟; DEM; 气象数据

**中图分类号:** TV121

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)10-0019-04

## 1 概况

永翠河位于黑龙江省伊春市带岭区, 在带岭镇东南部与西南岔河一同汇入汤旺河, 流域范围为  $128^{\circ}38' E \sim 129^{\circ}4' E, 47^{\circ} N \sim 47^{\circ}23' N$ , 流域集水面积  $703 \text{ km}^2$ , 总河长  $67 \text{ km}$ 。流域内春季多融雪径流, 夏季降雨丰富, 且流域汇流时间短, 因此春夏两季是洪水灾害多发期。永翠河的封冻时间约为每年 11 月中旬, 解冻时间约为次年 4 月中旬。为更好地研究寒区流域整体的径流动态变化及流域水文循环过程<sup>[1]</sup>, 本文以黑龙江省伊春市永翠河流域为例, 基于 SWAT 模型构建流域水文模型, 分析不同分辨率 DEM 及实测气象数据、CMADS 数据集、CFSR 数据集三种气象数据在

永翠河流域的适用性, 以期更好地模拟流域径流过程, 为寒区水文研究提供参考。

## 2 资料及研究方法

### 2.1 数据收集及处理

构建研究区域 SWAT 模型主要数据包括 DEM 数据、水文数据、气象数据、土地利用和土壤属性数据等, 数据来源见表 1。

DEM 数据经过裁剪及转换投影后, 获得永翠河流域 DEM。

IGBP-DIS 数据经过裁剪及转换投影后需进行重分类处理, 依据 SWAT 模型内置的土地利用类型字母代码重将土地利用类型命名, 获得适用于 SWAT 模型的土地利用数据。

表 1 模型数据及来源

Tab. 1 Model data and sources

模型数据	数据内容	分辨率/时间步长	来源
DEM		12.5, 30, 90, 250, 500 m	中国科学院资源环境科学与数据中心
土壤属性		1 km	国家青藏高原科学数据中心
土地利用		1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心
气象数据	伊春站实测数据	降水、太阳辐射、相对湿度、最高气温、最低气温、风速	1994~2015 年 伊春气象站
	CMADS 数据集		China Meteorological Assimilation Driving Datasets for the SWAT model (CMADS)
	CFSR 数据集		The National Centers for Environmental Prediction (NCEP)
水文数据	带岭(二)站降水、径流	1994~2015 年	黑龙江省水文年鉴

收稿日期: 2022-09-15, 修回日期: 2023-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202171)

作者简介: 张丽娜(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为产汇流理论, E-mail: 1539860972@qq.com

通讯作者: 孙颖娜(1976-), 女, 博士、副教授、硕导, 研究方向为产汇流理论, E-mail: 26787238@qq.com

HWSD 数据经过裁剪及转换投影后要进一步转换为适用于 SWAT 模型的土壤数据库。由于 HWSD 数据库与 SWAT 模型所需土壤数据库采取的土壤粒径级配标准相似度很高,因此处理数据时无需处理土壤粒径数据;相同参数可直接使用,而其余参数可由 SPAW 软件进行计算<sup>[2]</sup>,获得适用于 SWAT 模型的土壤数据库。

SWAT 模型可输入气象数据,也可根据气象生成器自动生成补充缺失的气象数据。在获得气象数据后,将数据进行处理,按 SWAT 模型能识别的格式构建气象数据库。

水文数据包括降水数据及流量数据,需进行数据处理以适用于 SWAT 模型。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 SWAT 模型

ArcSWAT 模型基于 DEM 计算坡度、流向生成水系图划分子流域,结合土地利用数据和土壤属性数据及坡度,设定阈值划分水文响应单元(HRU)。HRU 是将子流域划分为具有独特的土壤属性、土地利用类型及坡度组合的流域单元,能更准确地反映该区域的水文地理条件<sup>[3]</sup>。子流域和水文响应单元划分完毕后,将气象数据等其他数据库文件载入,运行 SWAT 模型。使用 SUFI-2 算法率定模型参数,并将率定的参数结果代回模型,实现流域径流过程的模拟。

降雪是寒区冬季降水的主要产生形式,径流模拟的重要部分就是对融雪的模拟,融雪量对径流模拟影响较大,SWAT 模型考虑到融雪影响,融雪量计算公式为:

$$S_{m_{lt}} = b_{m_{lt}} s_{cov} [(T_{snow} + T_{max})/2 - T_{m_{lt}}] \quad (1)$$

式中, $S_{m_{lt}}$  为模拟日的融雪量,mm; $b_{m_{lt}}$  为模拟日的融雪因子,mm/(d·°C); $s_{cov}$  为积雪覆盖在 HRU 内所占的百分数; $T_{snow}$  为模拟日的积雪温度,°C; $T_{max}$  为模拟日最高气温,°C; $T_{m_{lt}}$  为融雪温度阈值,°C。

表 3 率定参数范围及率定值

Tab. 3 Range of rate parameters and rate value

序号	参数	含义	参数取值范围	参数取值
1	CN2. mgt	SCS 径流曲线数	35~98	40.1
2	ALPHA_BF. gw	基流 alpha 因子/d	0~1	0.33
3	GW_DELAY. gw	地下水延迟时间/d	0~500	435.94
4	GWQMN. gw	产生回归流时的浅层含水层水深阈值/mm	0~5 000	2 007.2
5	GW_REVAP. gw	地下水再蒸发系数	0.02~0.2	0.08
6	ESCO. hru	土壤蒸发补偿因子	0~1	0.43
7	CH_N2. rte	主河道曼宁 n 值	0.01~0.3	0.268
8	CH_K2. rte	主河道冲击层有效水力传导度/(mm·a <sup>-1</sup> )	0.01~500	16.52
9	ALPHA_BNK. rte	河岸蓄量的基流 alpha 因子/d	0~1	0.468
10	SOL_AWC(1). sol	土壤层可用水量/(mm·mm <sup>-1</sup> )	0~1	0.471
11	SOL_K(1). sol	饱和水力传导度/(mm·a <sup>-1</sup> )	0~2 000	82.4
12	SOL_BD(1). sol	土壤密度/(g·m <sup>-3</sup> )	0.9~2.5	1.27
13	SFTMP. bsn	降雪气温/°C	-5~5	-4.8

### 2.2.2 适用性评价指标

选取决定系数  $R^2$  和 Nash-Sutcliffe 效率系数  $N_{SE}$  作为评价标准,来评价判断 SWAT 模型对永翠河流域径流在率定期和验证期的拟合效果。

决定系数可反映实测数据与模型模拟数据的变化趋势的接近程度,在 0~1 之间取值。Nash-Sutcliffe 效率系数可反映模型模拟数据的精确度,在 0~1 之间取值。 $R^2$  值越接近 1,说明模拟数据的变化趋势与实测数据的变化趋势越相近;当  $N_{SE}$  的值趋近于 1 时,表明模型模拟数据与实测数据更接近。依据《水文情报预报规范》(SL250-2000)<sup>[4]</sup>,模型模拟效果评价等级见表 2。

表 2 模型模拟效果评价等级

Tab. 2 Model simulation effect evaluation grade

评价等级	决定系数	Nash-Sutcliffe 效率系数
优秀	$R^2 \geq 0.5$	$N_{SE} \geq 0.9$
优良	$R^2 \geq 0.5$	$0.7 \leq N_{SE} < 0.9$
良好	$R^2 \geq 0.5$	$0.5 \leq N_{SE} < 0.7$
差	$R^2 < 0.5$	$N_{SE} < 0.5$

## 3 结果及讨论

### 3.1 模型适用性评价

#### 3.1.1 模型构建

基于 ArcGIS 的空间叠加功能,依据永翠河流域实际地形情况及基础数据,构建 SWAT 模型,将流域划分为 13 个子流域,各数据的阈值均设为 10%,进一步将流域划分为 84 个 HRU。

#### 3.1.2 参数敏感性分析及率定

基于构建好的 SWAT 模型,将模型率定期设定为 1994~2005 年,验证期设定为 2006~2015 年,分析参数敏感性并对敏感参数的取值进行率定。结合 SWAT-CUP 软件自动率定及手动调错,确定了 13 个敏感性参数,参数及参数率定取值见表 3。

### 3.1.3 模型适用性评价

SWAT 模型模拟结果见表 4。由表 4 可知,流域月径流模拟率定期模拟结果的  $R^2$ 、 $N_{SE}$  分别为 0.80、0.78,模拟效果达到了优良;验证期模拟结果的  $R^2$ 、 $N_{SE}$  分别为 0.76、0.65,模拟效果达到了良好。率定期和验证期均达到了模型评价的要求,说明模型的月径流模拟效果较好。

表 4 模型适用性评价指标

Tab. 4 Model applicability evaluation indicators

时期	$R^2$	$N_{SE}$
率定期	0.80	0.78
验证期	0.76	0.65

图 1 为率定期、验证期径流模拟结果。

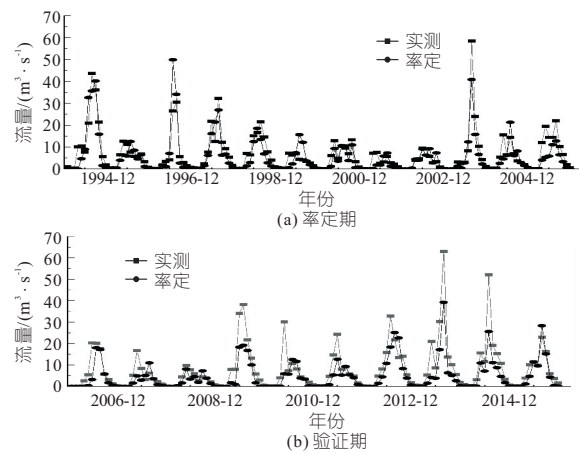


图 1 率定期、验证期径流模拟结果

Fig. 1 Runoff simulation results of rate period and verification period

由图 1 可看出,SWAT 模型月径流量模拟值、实际径流量过程的趋势基本一致,这说明构建的 SWAT 模型模拟永翠河径流过程的效果较好。但对径流峰值的模拟效果不佳,在春季融雪融冰及夏季多降水时期的径流模拟值与实测值相差较多。分析原因,可能由于流域内测站稀疏且冬季冻土、河流冰冻等因素导致实测数据不足,模型未能反映流域内夏季暴雨降水强度大且集中的特点,使春季及夏季径流峰值模拟效果不佳。

## 3.2 DEM 分辨率对径流模拟的影响

### 3.2.1 不同分辨率 DEM 流域特征提取

对比 12.5、30、90、250、500 m 共 5 种不同分辨率的 DEM 提取的流域地形特征,分析 DEM 分辨率变化对流域地形特征提取的影响。

表 5 为不同 DEM 分辨率流域水文特征值。由表 5 可看出,随着分辨率的不断降低,流域地形被概化,流域边界线发生变动,由 DEM 提取的流域面积由 697.65 km<sup>2</sup> 降至 596.4 km<sup>2</sup>,流域面积逐渐减小;最大高程也由 1 108 m 缩减为 1 060 m,

表 5 不同 DEM 分辨率流域水文特征值

Tab. 5 Hydrological characteristics of different DEM precision

分辨率 /m	高程/m		流域面 积/km <sup>2</sup>	坡度/(°)		
	最大值	最小值		最大值	最小值	平均值
12.5	1 108	228	697.65	50.4	0	10.50
30	1 095	182	693.00	47.4	0	11.60
90	1 088	211	679.87	31.4	0	8.76
250	1 013	212	645.60	24.3	0	6.87
500	1 060	212	596.40	16.3	0	4.91

但变化不大,仅降低 8%;地形概化导致流域内坡度趋于平缓,最大坡度从 50.4° 降至 16.3°,平均坡度从 10.5° 逐渐减缓至 4.91°,地形特征损失显著。总体而言,DEM 分辨率对坡度提取、流域边界划分及流域面积计算影响较大,对高程提取影响相对较小。

### 3.2.2 不同分辨率 DEM 径流模拟

分别选取 12.5、30、90、250、500 m 共 5 种不同分辨率的 DEM 对 2008~2015 年永翠河流域进行径流模拟,分析 DEM 分辨率对径流模拟的影响,对比分析了不同 DEM 分辨率下月径流模拟结果。

表 6 为评价指标结果。由表 6 可知,5 种不同分辨率 DEM 模拟的  $R^2$ 、 $N_{SE}$  均大于 0.75,模拟效果均达到了优良,其中 500 m 分辨率的 DEM 模拟效果相对较差,但总体上,不同 DEM 分辨率径流模拟效果差异不大。分析原因为 DEM 分辨率对流域内坡度的提取影响较大,可能因为 DEM 分辨率变化导致的坡度变化在一定范围内对产流模拟结果影响相对有限,对累加后的月径流变化影响不大<sup>[5]</sup>,因此 DEM 分辨率对流域径流模拟影响不明显。

表 6 不同 DEM 分辨率下径流模拟效果

Tab. 6 Simulation effect of runoff with different DEM precision

DEM 分 辨率/m	2008~2015 年		DEM 分 辨率/m	2008~2015 年	
	$R^2$	$N_{SE}$		$R^2$	$N_{SE}$
12.5	0.80	0.79	250	0.80	0.78
30	0.80	0.79	500	0.79	0.78
90	0.80	0.79			

## 3.3 不同气象数据在流域内适用性

选用实测数据、CMADS 数据集、CFSR 数据集三种气象数据驱动 SWAT 模型,DEM 选用 12.5 m 分辨率,对 2008~2015 年永翠河流域径流进行模拟,对比使用不同气象数据集进行流域径流模拟的效果,结果见表 7。

表 7 不同气象数据下径流模拟效果

Tab. 7 Simulation effect of runoff with different meteorological data

气象 数据	2008~2015 年		气象 数据	2008~2015 年	
	$R^2$	$N_{SE}$		$R^2$	$N_{SE}$
实测数据	0.80	0.79	CMADS	0.65	0.61
CFSR	0.42	0.42			

由表 7 可知,实测气象数据及 CMADS 数据集模拟结果  $R^2$ 、 $N_{SE}$  均大于 0.5,能用于模拟永翠河流域径流。其中实测气象数据模拟结果  $N_{SE}$  为 0.79,达到了优良,模拟效果最好;CMADS 数据集模拟结果  $N_{SE}$  为 0.61,达到了良好,模拟效果较好。而 CFSR 数据集模拟结果  $R^2$ 、 $N_{SE}$  均小于 0.5,模拟效果不佳。

图 2 为不同气象数据径流模拟结果。由图 2 可看出,实测气象数据的径流模拟结果、流量变化趋势及流量数值与实测数据的变化趋势及数值最为接近,CMADS 数据集及 CFSR 数据集的模拟结果相对较差。在 2008 年最为明显,2008 年实测径流在 5、9 月分别有一个峰值,CMADS 数据集模拟结果峰值在 4、8 月且最大值高估了 21.98 mm,CFSR 数据集的模拟结果仅在 7 月有一个峰值相,且最大值高估了 14.2 mm。分析原因为 CMADS 数据集及 CFSR 数据集使用流域周边气象站运算获得流域气象数据,难以准确反映流域内冬季降雪、融雪、融冰特征及夏季降水强度大且集中的流域特点,因此对峰值模拟效果不佳。

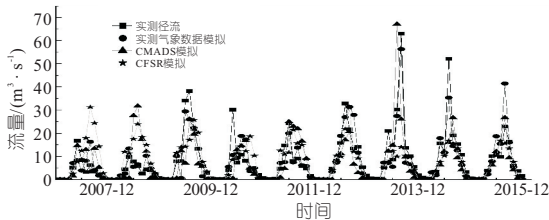


图 2 不同气象数据径流模拟结果

Fig. 2 Runoff simulation results from different meteorological data

总体而言,实测气象数据模拟效果最好,CMADS 数据集效果较好,但在实测资料缺乏的情况下也可成为一个有效的选择,而CFSR数据

集模拟效果不佳。

## 4 结论

a. SWAT 模型径流模拟值与实测值变化趋势基本一致,模拟效果较好,可用于永翠河流域的月尺度径流模拟,但对径流峰值的模拟效果较差。

b. DEM 分辨率的变化对永翠河流域水文特征值的提取影响较大,其中对坡度特征值提取的影响最显著,但对流域径流模拟的影响不明显,不同分辨率 DEM 数据构建模型的结果的决定系数及 Nash-Sutcliffe 效率系数相差不大。

c. 实测气象数据及 CMADS 数据集均能适用于永翠河流域径流模拟,使用实测气象数据的模拟效果最好,使用 CMADS 数据集的模拟结果也达到了良好水平,而使用 CFSR 数据集的模拟效果不佳,适用性差。

### 参考文献:

- [1] 周淑梅. 黄土高原丘陵沟壑区不同尺度小流域次降雨水文过程模型研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2013.
- [2] 宁吉才,刘高焕,刘庆生,等. 水文响应单元空间离散化及 SWAT 模型改进[J]. 水科学进展,2012,23(1):14-20.
- [3] 王磊,杜欢,谢建治. 基于 SWAT 模型的张家口清水河流域径流模拟[J]. 水生态学杂志,2020,41(4):34-40.
- [4] 中华人民共和国水利部. 水文情报预报规范: SL250-2000[S]. 北京:中国水利水电出版社,2000.
- [5] 叶许春,张奇. 网格大小选择对大尺度分布式水文模型水文过程模拟的影响[J]. 水土保持通报,2010,30(3):112-116.

## Effect of DEM Resolution and Meteorological Data on Runoff SWAT Simulation of Yongcui River Small Watershed in Cold Region

ZHANG Li-na, SUN Ying-na, SHEN Zhi-peng, HU Jin-hui

(School of Hydraulic and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Due to the existence of snow, melting snow and frozen soil, the hydrological cycle in cold regions has its particularity. In order to probe into the hydrological law of small watershed in cold region and simulate the process of runoff formation, the hydrological data of Yongcuihe River basin from 1994 to 2015 were selected as the research area. The SWAT model for runoff simulation in cold region was constructed, and the applicability of DEM with different resolution, as well as three kinds of meteorological data, CMADS data set and CFSR data set, in Yongcuihe River basin was analyzed. The results show that the SWAT model can simulate the runoff process of Yongcuihe River. DEM resolution has a great impact on the extraction of watershed features, but has no obvious effect on runoff simulation. The applicability of different meteorological data has significant difference, the simulation effect of measured meteorological data is the best, the simulation effect of CMADS data set is better, and the simulation effect of CFSR data set is worse, which provides a reference for further study of small watershed in cold region.

**Key words:** SWAT; cold regions; small watershed; runoff simulation; DEM; weather data