

渭河流域水文模拟中SWAT模型最优结构的识别

吴 优

云南省水利水电勘测设计院 云南昆明

摘 要: 本研究旨在评估不同的SWAT模型结构(空间分辨率)对渭河流域径流模拟的影响。此外,还对比了四种不同降雨数据(CFSR、TRMM、PERSIANN-CDR和实测数据)对径流模拟的影响。最后,建立了24个不同分辨率的模型(1、3、5、9、19、29个子流域和每个子流域1、3、5、7个水文响应单元HRU)。观测降雨数据的结果表明,子流域数量和HRU对模型性能的影响很小。结果表明,将渭河流域划分为9个子流域、每个子流域5个HRU进行SWAT模型径流模拟的效果最好,验证结果为 $NS=0.87$ 、 $R2=0.87$ 和 $PBIAS=-0.5$ 。

关键词: SWAT模型; 分布式水文模型; 渭河流域

Identification of Optimal Structure of SWAT Model in Hydrological Simulation of Weihe River Basin

You Wu

Yunnan province water conservancy and hydropower survey and design institute YunNan, KunMing

Abstract: This study aims to assess the influence of the SWAT model structure (in terms of spatial resolution) on the model performance for runoff simulation in the Weihe River Basin of China. In addition, the effects of four different rainfall products (CFSR, TRMM, PERSIANN-CDR and observed rain gauge data) on runoff simulation were compared. Finally, 24 models with different resolutions (1, 3, 5, 9, 19, 29 sub-basins and 1, 3, 5, 7 Hydrological Response Units per sub-basin) were built. The results with the observed rainfall data show that both the number of sub-basins and HRUs have a marginal impact on the model performance. The optimal resolution of the model in the Wei River Basin is 9 sub-basins with 5 HRUs per sub-basin in average. The simulated performance with this resolution is good with $NS=0.87$, $R2=0.87$ and $PBIAS=-0.5$.

Keywords: SWAT model, hydrological modeling, Wei River basin

一、概要

SWAT模型是一个分布式水文模型,用于预测人类活动对水量和水质、沉积物和农业的长期影响(肖春和彭,2003)。从模型结构来看,SWAT模型将流域划分为多个子流域,每个子流域由不同的水文响应单元(HRU)组成。根据不同数量的子流域和HRU,可以形成多种分辨率集合。与子流域和HRU相关的模型分辨率是我研究的重点。

在本研究中,我将以咸阳水文站为流域出口断面的渭河流域作为研究对象,研究模拟效果最好的SWAT模型结构。渭河是黄河最大的支流。

二、方法学

2.1 模型结构

本次研究首先建立几个具有不同数量子流域的模型,以观察模型分辨率如何影响模拟效果。SWAT模型的输入数据要求是DEM、土地利用图、土壤类型图和天气数据。然后通过设置不同的阈值来划分子流域。接下来,根据每个子流域的不同土地利用、土壤和坡度阈值范围进行HRU划分。之后,做好降雨、温度、相对湿度、太阳辐射和风速等气象数据的前期准备工作,以创建天气发生器。最后,分别运行模型并率定验证。

2.2 数据准备

SWAT模型需要大量的数据来描述研究流域和建立模型,这些数据分为初始空间数据、天气数据和校正周期数据。初始空间数据包括DEM、土地利用图和土壤类型图。

作者简介: 吴优,女,1994年4月28日,汉族,湖北武汉,硕士研究生兼助理工程师,研究方向分布式水文模型,云南省水利水电勘测设计院。

这些数据需要描绘流域、划分子流域和创建HRU。其次是天气数据, 包括降雨量数据和其他四个气象数据, 即温度、相对湿度、太阳辐射和风速。这些数据也用于构建天气发生器文件。SWAT模型使用这些数据模拟径流区的水文情况。最后一类包含率定参数和径流数据, 我将其命名为率定及验证数据。总体数据分类表如表1所示。

表1 数据分类表

初始空间数据	气象资料	率定及验证数据
DEM 地图 土地利用图 地图的土壤类型	降雨 温度 相对湿度 太阳辐射 风速	率定参数 径流数据

2.3 渭河流域SWAT模型建立

根据子流域和HRU的不同组合建立了多种模型。确定六个不同子流域数量的细分级别为1、3、5、9、19、29。在创建子流域之后, 将每个子流域划分为1、3、5、7个水文响应单元。

因此, 我们总共需要建立24个SWAT模型。子流域和HRU数量具体的选择过程如下: 首先分别建立子流域约为30、20、10的三个流域, 每个子流域的HRU数量先设置为5个左右。分析模型性能趋势, 然后确定是增加还是减少子流域的数量。本研究发现, 三个模型的最终优化结果都很好且非常相似, 要酌情减少子流域的数量, 从而降低建模和参数优化的复杂度, 同时也节省了建模和率定的时间。使用相同的方法来确定HRU的数量。下面列出了不同分辨率的组合:

表2 模型分辨率组合

子流域的数量 \ HRU的数量	HRU的数量			
	1	3	5	7
1	S1H1	S1H3	S1H5	S1H7
3	S3H1	S3H3	S3H5	S3H7
5	S5H1	S5H3	S5H5	S5H7
9	S9H1	S9H3	S9H5	S9H7
19	S19H1	S19H3	S19H5	S19H7
29	S29H1	S29H3	S29H5	S29H7

模型建立完成后, 就可以利用咸阳站1991-2006年的实测径流资料进行运行。我将前三年作为预热期, 以确保初始条件的可靠性。

2.4 模型率定

在模型包含的参数中, 一些参数的微小变化对模型模拟结果有重大影响。SWAT-CUP是一个用于SWAT的率定、不确定性或灵敏度分析的工具, 这也是一个公用的、开源的程序。该程序将SUF2、PSO、GLUE、ParaSol和MCMC进程串联起来对SWAT模型进行率定。

在本研究中, 选择SUF2程序对所有模型进行率定。SWAT模型进行自动率定时可以选择所有26个水文模拟参数进行率定, 然而这种率定方式速度较慢, 效率较低。本次研究选择对模型运行结果影响较大的13个参数作为初始参数参与率定。参数初始范围见表3:

表3 参数初始范围

ID	Par Name	File Ext.	Min	Max
1	CN2	.mgt	-0.2	0.2
2	ALPHA_BF	.gw	0	1
3	GW_DELAY	.gw	30	450
4	GW_REVAP	.gw	0.02	0.2
5	REVAPMN	.gw	0	500
6	RCHRG_DP	.gw	0	1
7	SURLAG	.bsn	0.05	24
8	CH_K2	.rte	-0.01	500
9	ESCO	.bsn	0	1
10	SOL_AWC	.sol	-0.2	0.4
11	SOL_Z	.sol	-0.8	0.8
12	CANMX	.hru	0	100
13	GWQMN	.gw	0	5000

本研究选择三个常用的统计指标来评价模型参数率定及验证效果, 包括相关系数 (Correlation Coefficient- R^2), Nash系数 (Nash Sutcliffe- E_{ns}) 和百分比偏差 (PBIAS) 三种方法。

三、结果

3.1 不同降雨数据的模拟效果

这项研究的目的之一是分析不同类型的降雨数据对模型性能的影响。我尝试了四种类型的降雨数据: CFSR、TRMM、PERSIANN-CDR和实测数据。使用了包含29个子流域和5个HRU的SWAT模型来比较使用这四种不同降雨数据的模拟效果。选择Nash系数 (NS) 作为目标函数优化参数, 最后用三个指标评价模型验证结果。它们是相关系数 (Correlation Coefficient- R^2), Nash系数 (Nash Sutcliffe- E_{ns}) 和百分比偏差 (PBIAS)。三个指标的对比结果如下, 四种不同类型的降雨数据模拟过程线分别如图1、图2、图3、图4所示。

表4 四种降雨数据的模拟效果

	CFSR	TRMM	PERSIANN-CDR	Observed rainfall
NS	0.67	0.88	0.73	0.87
R^2	0.67	0.89	0.73	0.87
PBIAS	24	1.2	5.6	-1

从表4可以看出, 使用CFSR产品作为降雨输入数据的模拟性能不是很好: NS和 R^2 只有0.67, 这表明模拟的径流趋势与实测径流没有很好的相关性。从图4-1可以明显看出。PBIAS为24%, 这意味着模拟径流比实测

径流高24%。对于PERSIANN-CDR降雨数据来说,模拟结果优于CFSR,但不是最好的。相比之下,TRMM数据的结果要好于前两者。然而,TRMM数据的时间序列从1998年才开始。模型的模拟时间只有9年,不包括预热期的率定期只有6年,对于可靠性长期模拟来说,这段时间相对较短。因此,最终我选择了模拟结果第二好、输入数据周期充足的实测数据用于模型。

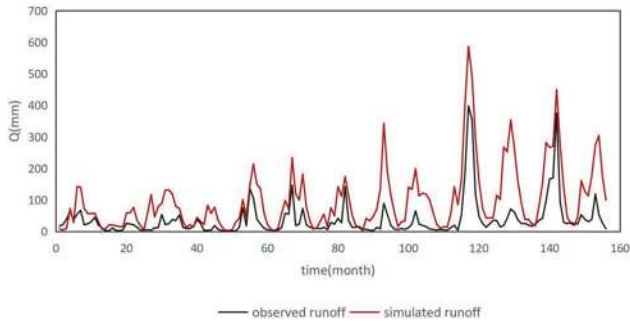


图1 CFSR降雨量的过程线

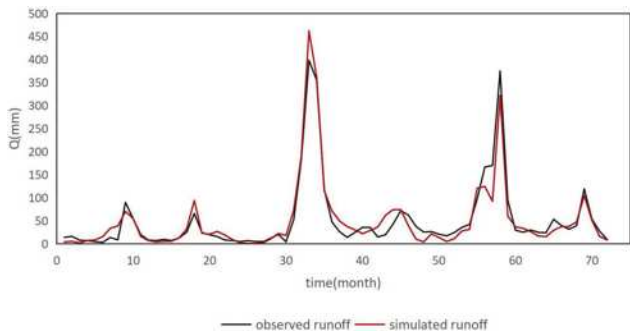


图2 TRMM降雨量的过程线

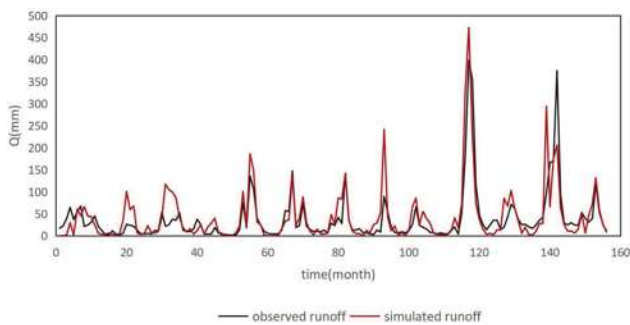


图3 Persiann-CDR降雨量的过程线

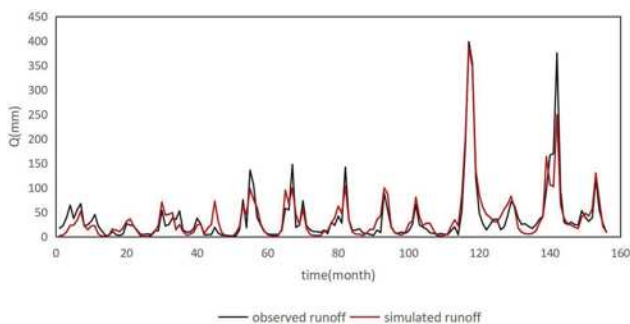


图4 实测降雨量的过程线

3.2 不同分辨率组合的模拟效果比较

在这项研究中,我总结了评估模型模拟效果的标准。如表5所示:

表5 模拟效果的评价标准

标准	良	优	极优
NS	>0.9	0.7-0.9	0.5-0.69
R ²	>0.85	0.75-0.85	0.5-0.74
PBIAS	<5%	5%-15%	15%-25%

参数优化后,每个分辨率模型的指标NS值如表6所示,R²值如表7所示,PBIAS如表8所示。

表6 不同分辨率组合的模型率定结果的NS值

子流域的数量 HRU的数量	子流域的数量			
	1	3	5	7
1	0.88	0.89	0.89	0.89
3	0.89	0.9	0.89	0.88
5	0.88	0.88	0.87	0.86
9	0.88	0.87	0.87	0.86
19	0.87	0.86	0.86	0.86
29	0.87	0.87	0.87	0.86

表7 不同分辨率组合的模型率定结果的R²值

子流域的数量 HRU的数量	子流域的数量			
	1	3	5	7
1	0.89	0.89	0.89	0.9
3	0.89	0.91	0.9	0.89
5	0.88	0.88	0.87	0.86
9	0.88	0.87	0.87	0.86
19	0.88	0.87	0.87	0.86
29	0.87	0.87	0.87	0.86

表8 不同分辨率组合的模型率定结果的PBIAS值

子流域的数量 HRU的数量	子流域的数量			
	1	3	5	7
1	-4.4	-4.6	-2.4	-3.8
3	8.7	10.2	10.5	12.3
5	-0.5	-1	-1.9	-2.4
9	-0.1	1.1	-0.5	-1.1
19	-5.5	-2.1	-5.1	-5
29	-3.1	-1.8	-1	-1.6

从上表上可知,NS ≥ 0.86 (好),R² ≥ 0.86 (非常好),|PBIAS| < 13 (好)。总体而言,模型模拟效果良好。大多数分辨率的NS值与R²值相同。即使有些不同,差别也不超过0.01。从模拟结果中,我们可以发现NS值在0.86到0.90之间变化,R²在0.86到0.91之间变化。整体来看子流域和HRU的数量越大,NS和R²越小。NS值和R²的最大值出现在具有3个子流域和3个HRU的模型中。

PBIAS值的变化没有明显的模式。大多数PBIAS值

小于0, 表明模拟结果被低估。然而, 具有3个子流域的PBIAS为正, 表明这些组合的模拟结果被高估了。一些最接近0的PBIAS值大多具有5或9个子流域, 而少于5个子流域和多于9个子流域的PBIAS值更高。从HRU的角度来看, PBIAS和HRU之间的相关性很小。

图5显示了子流域数量和指标 ns 之间的关系。如图所示, NS 值通常随着子流域的数量增加而降低。但当HRU数量较少时, 例如1个HRU和3个HRU的情况, NS 则随着子流域的增加而增加, 但仅增加了0.01。并且当子流域的数量增加到9或更多时, ns 值逐渐保持恒定。

图6显示了HRU数量和 NS 之间的关系。当子流域数量相同时, HRU的变化对 ns 值的影响不大, NS 值的变化不超过0.02。这表明, 对于指标 NS 来说, HRU是一个不敏感的变量。

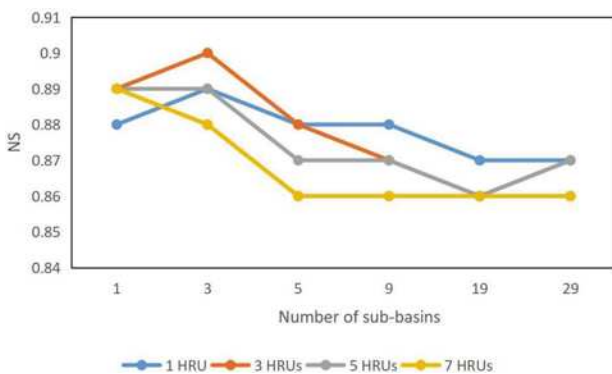


图5 NS值和子流域数量之间的关系

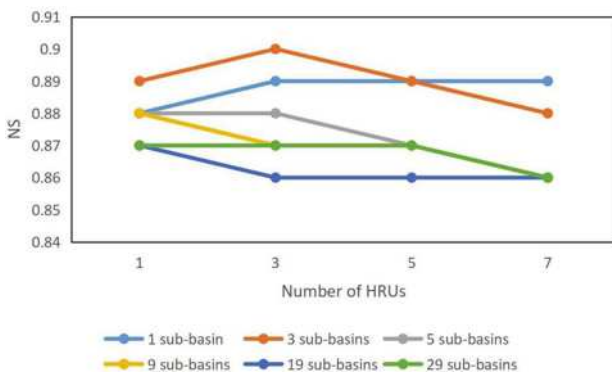


图6 NS值和HRU数量之间的关系

子流域数量与 $IPBIAS$ 之间的关系如图7所示。当子流域的数量从1增加到3时, $IPBIAS$ 也增加。然而, 随着子流域数量的进一步增加, $IPBIAS$ 则会下降。当子流域的数量为9时, $IPBIAS$ 最接近于零。虽然子流域变化和 $IPBIAS$ 变化之间的模式不明显, 但可以看出, 当子流域的数量约为5-9时, $PBIAS$ 的绝对值最小。

与 NS 值类似, $PBIAS$ 对HRU的数量也不敏感(如图8所示)。当HRU的数量增加时, $PBIAS$ 的绝对值没有显著变化, 大致保持恒定值。

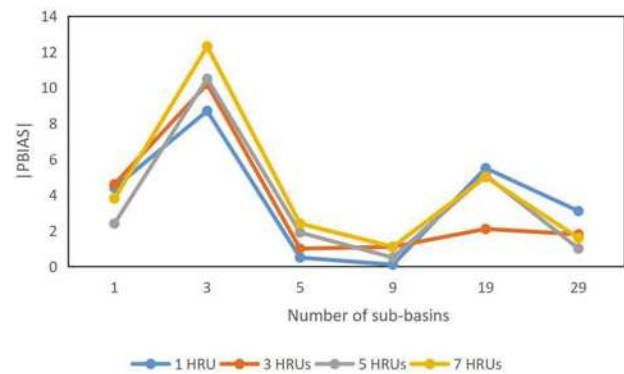


图7 $IPBIAS$ 和子流域数量之间的关系

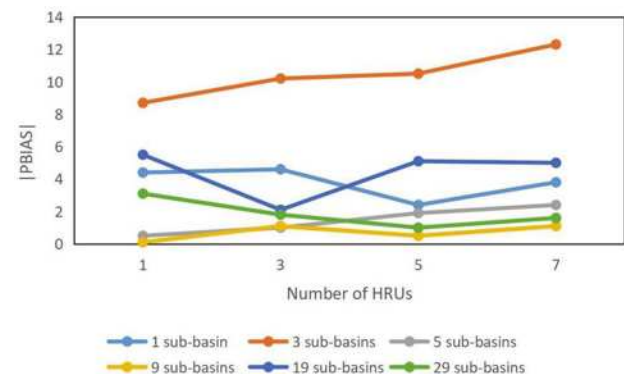


图8 $IPBIAS$ 和HRU数量之间的关系

四、讨论

4.1 径流模拟中不同类型降雨数据的比较

结果表明, 用实测数据模拟效果最好 ($NS > 0.8$)。其他四种降雨数据在渭河流域的适应性不理想。在我的研究中, 虽然TRMM降雨数据的模拟结果是最好的 ($NS = 0.88$)。但考虑到模拟周期的长度 (TRMM的时间序列较短), 选择模拟结果相似的实测数据 ($NS = 0.87$) 更为合适。

4.2 模型分辨率对模拟效果的影响

结果表明, 子流域数量变化的影响略大于HRU数量的变化。对于指标 ns , 不同子流域数量情况下, NS 的变化从0.86到0.9不等, 而不同HRU数量情况下, NS 的变化不超过0.02。从这些结果中, 我得出结论, 子流域的数量和HRU的数量对渭河流域的模拟效果影响不大。

4.3 子流域和HRU数量之间的平衡

由于子流域和HRU数量的变化对模型的模拟性能几乎没有影响, 因此对于该流域, 不需要大量的子流域和HRU。我认为如何选择最优的模型结构分辨率需要考虑以下几点:

第一, 模型性能是最重要的一点。如果模拟结果相差很大, 那么优先考虑性能更好的模型是最合理的。

第二, 如果模型性能差别不是很大, 结果也不错, 就像这个研究的结果。考虑到模拟和优化参数的时间,

更少数量的子流域和HRU的组合是优选的,因为它们花费更少的时间用于模型运行和率定。以本次研究为例,用同一台计算机对13个参数的不同模型的结果进行迭代优化,每次迭代模拟2000次,29个子流域模型需要4小时,9个子流域模型只需要2小时。

第三,模型结构的分辨率并不总是越小,结果就越好。径流数据所在的位置也需要考虑。如图9所示,如果我们只需要模拟流域出口断面A处的径流,那么一个子流域就满足了。但如果需要模拟A、B、C共3处的径流,就需要划分更多的子流域。



图9 渭河流域地图

第四,本文划分HRU的方法是确定每个子流域的平均HRU数量。还有一种方法是设置子流域土地利用类型和土壤类型的百分比阈值。这样划分水文响应单元将更为合理。但是,本次研究发现HRU数量的变化对模型模拟效果的影响是微不足道的。

五、结论和建议

24个不同分辨率的SWAT模型模拟结果对比表明,分辨率越小(子流域和HRU数越少),流域径流模拟结果越好,但模型模拟结果变化不大。可以说明模型结构分辨率对模型的性能不敏感,影响不大。最佳分辨率组合出现在5~9个子流域和3~5个HRU的范围内。

总之,SWAT模型在渭河流域的径流模拟表现良好,NS和 R^2 均大于0.85,PBIAS在可接受的范围内。并且结果表明,9个子流域和5个HRU的组合作为渭河流域SWAT模型径流模拟的最佳模型结构分辨率。验证的最佳结果是NS=0.87, $R^2=0.87$,PBIAS=-0.5。

本次研究具有一定局限性。首先,径流数据的时间序列不够长。本次研究中径流序列为1991年至2006年,率定期仅为16年。缺乏更长时间的径流数据和全球降水数据集。另外,本次研究只建立了24种分辨率的SWAT模型。还可以多建立几个不同分辨率组合的模型进行对比。例如,子流域和HRU的数量可以划分得更细。同样本次模型只选择了13个参数进行优化。由于建立SWAT模型所需的参数众多,包括各种具有或不具有实际物理意义的参数,因此不可能校准所有参数。因此,为了保证参数标定的准确性和效率,必须对模型中涉及的参数进行筛选,并对模型中敏感度较高的参数进行标定。比较合理的方法是先选取所有参数进行灵敏度分析,去掉不敏感参数,优化敏感参数。

参考文献:

- [1]Abbaspour, K. C.等人(2015年)。“欧洲大陆尺度水文和水质模式:高分辨率大尺度SWAT模式的校准和不确定性”524:733-752.
- [2]阿诺德, J. G.等人(1995年)。“大流域连续时间水沙演进模型。”121(2):171-183.
- [3]宾纳等人(1997年)。“流域细分对模拟径流和细泥沙产量的影响。”40(5):1329-1335.
- [4]Borah, D. K.和M. J. T. o. t. A. Bera(2004年)。“流域尺度水文和非点源污染模型:应用综述”47(3):789.
- [5]Butts, M. B.等人(2004年)。“模型结构对径流模拟水文模型不确定性影响的评估。”298(1-4):242-266.
- [6]Chaubey, I.等人(2005年)。“DEM数据分辨率对SWAT输出不确定性的影响。”19(3):621-628.
- [7]Cho, j.等人(2010年)。“流域细分和滤波器宽度对沿海平原流域SWAT模拟的影响1”46(3):586-602.
- [8]道迪和博格曼(1969年)。“降雨变率对河川径流模拟的影响。”5(5):958-966.
- [9]Derseh, W. A.(2018).评估swat模型的空间分辨率对模拟不同时间尺度河流流量的影响,联合国教科文组织-IHE.