

基于 SWAT 模型的黄土高原典型区月径流模拟分析

庞 佼¹, 白晓华², 张 富¹, 刘雪峰¹, 张佰林³

(1. 甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省科学院地质灾害防治研究所, 兰州 730000; 3. 定西市水土保持科学研究所, 甘肃 定西 743000)

摘 要:以黄土高原安家沟流域为研究区域,利用 GIS 和 RS 技术,建立了安家沟流域的气象数据、DEM 数据、土地利用数据,成功构建了基于 SWAT 模型的安家沟流域水文模型。以 1982—1999 年作为模型的率定期,2000—2010 年作为模型的验证期,对模型进行了参数敏感性分析和参数率定。其中率定期的 Nash-Sutcliffe 效率系数 E_n (0.71)、相关系数 R^2 (0.73) 和验证期的 Nash-Sutcliffe 效率系数 E_v (0.69)、相关系数 R^2 (0.68) 均达到模型模拟要求。结果表明:SWAT 模型基本上能反映安家沟的月径流水文过程,具有一定的实用性,以期为安家沟流域水资源高效配置提供依据。

关键词:月径流模拟; SWAT 模型; 参数率定; 安家沟流域

中图分类号: P334

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)03-0111-05

Analysis on Monthly Runoff Simulation in a Watershed of the Loess Plateau Based on SWAT Model

PANG Jiao¹, BAI Xiaohua², ZHANG Fu¹, LIU Xuefeng¹, ZHANG Bailin³

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Institute of Geological Hazards, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. Dingxi Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi, Gansu 743000, China)

Abstract: Anjiagou Watershed of the Loess Plateau was taken as the study area. By using GIS and RS technology, the meteorological data, DEM data, land use data of Anjiagou Watershed were established to construct the hydrological model of Anjiagou Watershed based on SWAT model. Data series from 1982 to 1999 were used to calibrate the SWAT model and period from 2000 to 2010 was employed to validate model. The values of Nash-Sutcliffe coefficient and the measured and simulation correlation in calibration period and the validation period were 0.71, 0.69 and 0.73, 0.68, respectively, meeting the requirements of model simulation. The results show that SWAT model can basically reflect monthly runoff hydrologic process in Anjiagou Watershed and has a certain practicality in terms of providing the basis for efficient allocation of water resources in Anjiagou Watershed.

Keywords: monthly runoff simulation; SWAT model; parameter calibration; Anjiagou Watershed

SWAT 模型是以 SWRRB 模型为基础,结合 CREAMS, GLEAMS, EPIC 和 ROTO 等模型的主要优势特征演变而来^[1]。随着 SWAT 模型的发展和功能的不断完善,模型在水文模拟方面的研究也日渐成熟。其中,降雨—径流过程水文循环是一个重要方面,也是研究农业非点源污染的主要途径^[2],因此基于 SWAT 模型的径流模拟是 SWAT 研究的焦点。

目前 SWAT 模拟应用大都在植被覆盖相对较好、实测资料相对丰富的河源和湿润地区,在干旱和半干旱地区的研究相对较少^[3]。谢媛媛^[4]利用 SWAT 模型对黄土丘陵区罗玉沟流域进行了径流模拟,并通过模型参数敏感度分析和率定,模型模拟精度达到了模拟要求,初步探索了 SWAT 模型在该地区的实用性,进一步在该地区推广应用奠定了基础。李星^[5]基于

SWAT 模型对黄土高原丘陵区燕沟流域径流模拟进行了适用性评价,提出了适合黄土丘陵区的 SWAT 模型敏感因子及具体参数值,结果发现 SWAT 模型在黄土丘陵区小流域模拟效果较好。然而,黄土高原地区下垫面条件复杂,气候变化异常,年降雨时空分布极不均匀,气象站分布密度低,因此,在该地区应用 SWAT 模型进行水文模拟依然是一个难点。本文以半干旱区安家沟流域为研究对象,建立了模型所需的流域数据库,通过参数敏感性分析、模型的率定与验证,评价 SWAT 模型在该流域径流模拟的适用性,为安家沟流域水资源管理及农业面源污染研究提供依据。

1 研究区概况

安家沟小流域位于甘肃省定西市东郊,属黄河流域祖厉河水系关川河支流的一小支沟,水土保持区划属黄土丘陵沟壑区第五副区。地理位置为 $104^{\circ}38'13''$ — $104^{\circ}40'25''E$, $35^{\circ}33'02''$ — $35^{\circ}35'29''N$,流域海拔 1 900~2 250 m,流域面积为 8.54 km²。气候属中温带半干旱区,年温差大,年平均气温 6.3℃,年平均降水 427 mm,年降水时空分布极不均匀,其中 60%以上集中在 7—9 月份,且多暴雨,蒸发量 1 510 mm。土壤以黄绵土为主,还有少部分沟道盐渍土,植被属于森林草原带干草原区。沟壑密度 3.14 km/km²。该区生态系统极其脆弱,土壤侵蚀强烈,水土流失十分严重。

2 数据来源与处理

2.1 空间数据库构建

2.1.1 数字高程模型 SWAT 模型首先要用到数

字高程模型 DEM。DEM 是采用 1 : 10 000 的地形图转化而来的,栅格 DEM 模型用于提取水系和流域特征。其制作过程为:(1) 将地形图扫描成电子版,利用 ArcGIS 9.3 软件进行等高线勾绘,形成等高线图层;(2) 将等高线图层进行投影变换;(3) 将矢量的等高线图层通过 ArcGIS 9.3 中的“3D Analyst”工具,进行 TIN 图层的构建;(4) 在“3D Analyst”模块中,把 TIN 转换成等高线栅格图,即建立了安家沟流域数字高程模型 DEM;(5) 在 ArcGIS 9.3 中勾绘出流域界线图层,通过拓扑将线图层转化成面图层,其生成的蒙板为 SWAT 模型的工作区。

2.1.2 土壤类型图 土壤类型图的准备主要是为后期 SWAT 模型进行水文响应单元的划分。从土壤类型图可知安家沟流域内的土壤类型主要是黄绵土和少部分沟道盐渍土。

2.1.3 土地利用现状图 土地利用现状图是在原有 1 : 10 000 的地形图上,结合流域的实地调查,在 ArcGIS 9.3 的支持下,得到安家沟土地利用现状图。

2.2 属性数据库构建

2.2.1 气象数据库 SWAT 模型所需的气象数据主要来源于安家沟流域气象园气象站。本研究安家沟气象数据采用气象站 1982—2010 年共 29 a 日降雨资料以及逐日降雨、温度、风速和相对湿度等观测数据。

2.2.2 土壤属性数据库 根据安家沟流域土壤类型图,以及甘肃省第二次土壤普查资料,确定研究区域的主要土壤基本属性。模型中土壤参数值主要参考文献[6],黄绵土和盐渍土 SWAT 土壤编码分别为 HMT,YZT。安家沟流域土壤基本属性见表 1。

表 1 安家沟流域土壤基本属性

土壤名称	土壤水文 性质分组	耕层 厚度/mm	机械组成/%			养分含量/%			
			黏粒	粉粒	沙粒	全氮	全磷	全钾	有机质
黄绵土	C	150	17.5	16.8	65.7	0.015	0.109	1.681	0.299
盐渍土	B	150	14.3	26.2	59.5	0.05	0.085	1.03	0.746

2.2.3 土地利用覆盖数据库 由图 2 可知,安家沟土地利用类型主要有:梯田、乔木林、灌木林、林地、草地、坡耕地、荒坡、荒沟、村庄、其他用地。根据 SWAT 模型土地利用数据库运行需要,将各土地利用类型进行相应的归类并对各类型重新编码(表 2)。

3 模型建立

3.1 子流域划分

模型运行首先将整个流域划分多个子流域。采用安家沟流域的 DEM 图,在 SWAT 模型中,通过设置不同的阈值多次提取模拟水系,最终阈值定为 16

hm²,确定流域的出口点并将整个流域划分 31 个子流域(图 1)。

表 2 安家沟流域土地利用类型编码及分类

编号	土地利 用类型	SWAT 编码	面积/ hm ²	占总 面积比/%
1	林地	FRSD	204	23.89
2	草地	RNGB	46	5.39
3	梯田	AGRR	374	43.79
4	坡耕地	AGRL	25	2.93
5	其他用地	URLD	106	12.41
6	未利用地	HAY	98	11.48

3.2 水文响应单元划分

SWAT 模型运行之前,在子流域根据土地利用现状图和土壤类型图划分模型的水文响应单元(HRU)。采用优势土地利用覆被/优势土壤法,一个子流域划分为多个水文响应单元,每一个水文响应单元拥有唯一的土地利用现状和土壤类型,根据流域实际情况,土地利用、土壤面积的阈值为 10%,流域坡度的阈值为 20%。31 个子流域经水文响应单元划分以后,形成 101 个水文响应单元(表 3)。

4 结果与分析

4.1 参数敏感性分析

分布式模型参数比较多,其影响程度各异^[7],本研究采用 LH-OAT 方法分析参数敏感性^[8]。LH-OAT 结合了 LH 抽样法和 OAT 敏感性分析两者的优点。利用 SWAT 2005 自动敏感性分析工具进行了 270 次比较判断,根据参数敏感度值(表 4),选取了径流参数敏感性中等以上的 8 个参数,分别为浅层

地下水径流系数(GWQMN)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)、径流曲线系数(CN2)、基流 α 系数(ALPHA-BF)、浅层地下水在蒸发系数(REVAPMN)、最大覆盖度(CANMX)、最大潜在叶面积指数(BLAI)和土壤可利用水量(SOL-AWC)对径流的影响显著。径流参数敏感性分析结果见表 5。

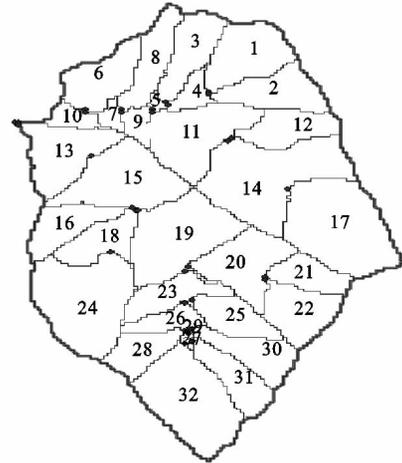


图 1 31 个子流域划分示意图

表 3 子流域水文响应单元划分

编号	流域面积/hm ²	面积比例/%	HRU 个数	编号	流域面积/hm ²	面积比例/%	HRU 个数
1	31.3	3.91	4	17	50.0	6.25	4
2	25.2	3.15	4	18	32.1	4.01	3
3	23.3	2.92	3	19	16.2	2.03	4
4	7.8	0.98	3	20	52.4	6.55	3
5	1.6	0.20	2	21	22.6	3.19	3
6	25.5	3.18	3	22	19.2	2.40	4
7	4.5	0.57	5	23	25.1	3.13	3
8	21.6	2.70	4	24	18.4	2.30	3
9	6.6	0.83	4	25	10.6	1.32	3
10	7.9	0.98	4	26	0.10	0.02	1
11	39.6	4.95	3	27	17.2	2.14	4
12	21.1	2.63	3	28	1.3	0.16	1
13	75.2	9.38	4	29	21.1	2.63	2
14	82.4	10.29	4	30	19.9	2.49	3
15	21.1	2.64	3	31	53.3	6.65	3
16	43.4	5.42	4	—	—	—	—

通过径流参数敏感性分析得知,浅层地下水径流系数、基流 α 系数和土壤蒸发补偿系数对径流的影响最大;径流曲线系数对径流影响显著;浅层地下水在蒸发系数、最大覆盖度、最大潜在叶面积指数和土壤可利用水量对径流也有一定影响。

浅层地下水径流系数为任意时段内的径流深度(或径流总量)与同时段内的降水深度(或降水总量)的比值。GWQMN 说明在降水量中有多少水变成了径流,它

综合反映了流域内自然地理要素对径流的影响^[9]。

表 4 敏感度赋值表

分类	因子值	敏感度
I	<0.05	低
II	0.05~0.2	中
III	0.2~1.0	高
IV	>1.0	很高

基流 α 系数对产流结果影响较小,在 SWAT 模型参数调整中,该值的大小与模拟径流影响不大。

表 5 径流参数敏感性分析及率定结果

排序	参数	敏感度	参数率定值
1	浅层地下水径流系数	0.347	676.60
2	基流 α 系数	0.336	0.00
3	土壤蒸发补偿系数	0.215	0.98
4	径流曲线系数	0.190	12.50
5	浅层地下水在蒸发系数	0.088	-76.20
6	最大潜在叶面积指数	0.080	0.65
7	最大覆盖度	0.053	9.80
8	土壤可利用水量	0.051	-24.40

土壤蒸发补偿系数与径流量呈正相关关系,若增加该系数,土壤深层的蒸发量减少,径流量增加,并且增加越大影响越明显。

径流曲线系数与径流量呈正相关关系,若径流曲线数增加,其地表径流量也增加。

4.2 参数率定

参数率定就是寻找参数的最佳值使模拟值与实测值之间具有一致性^[10]。本研究对 8 个径流敏感性参数进行调参,利用 1982—1999 年月径流实测数据进行参数的率定,2000—2010 年月径流实测数据进

行模型验证。参数率定结果见表 5。

4.3 模型评价方法

本文选取 Nash-Suttcliffe 系数 E_{ns} 、相关系数 R^2 来评价模型的模拟精度^[11]。Nash-Suttcliffe 系数 E_{ns} 为模型的总体效率。如果 $E_{ns} < 0$,说明模拟结果无效,通常取 $E_{ns} > 0.5$ 作为径流模拟效率的评价标准^[12]。 E_{ns} 的计算公式为:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_{avg})^2} \quad (1)$$

式中: Q_o ——实测值; Q_p ——模拟值; Q_{avg} ——实测平均值; n ——实测数据个数。

相关系数 R^2 用于评价实测值与模拟值之间的数据吻合程度, R^2 越接近于 1,说明模拟值越接近实测值,通常取 $R^2 > 0.6$ 作为径流模拟值与实测值相关程度评价标准^[13]。

4.4 模拟结果分析

4.4.1 率定期结果分析 通过对敏感性参数调参并进行模型重运行,得到最佳参数时的模拟值。模拟值与实测值相吻合(图 2)。经过统计分析得到 E_{ns} 为 0.71,相关系数 R^2 为 0.73,精度符合模型的要求,说明径流模拟值与实测值拟合度较好(图 3)。

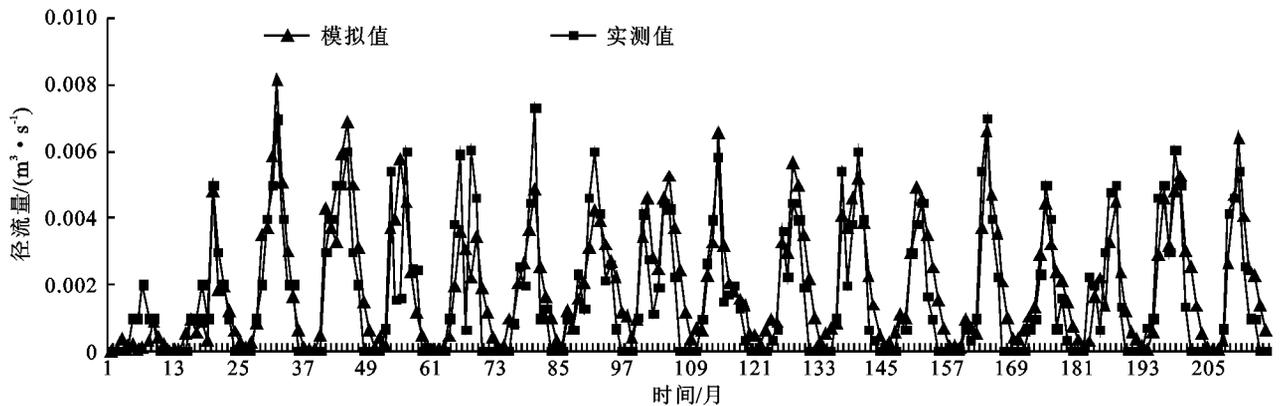


图 2 1982—1999 年率定期逐月径流量模拟值与实测值比较

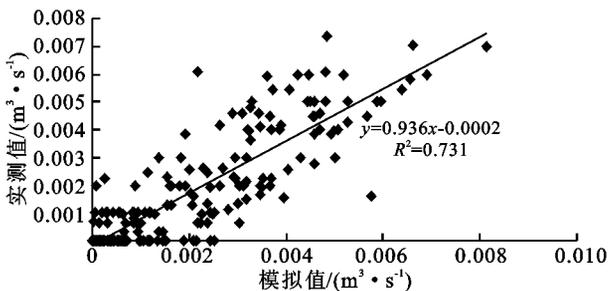


图 3 1982—1999 年率定期逐月径流量模拟值与实测值拟合图

合模型的要求,说明径流模拟值与实测值具有一定的拟合度(图 5)。

5 结论与讨论

本文基于 SWAT 模型对安家沟流域进行了 SWAT 模型构建,并对安家沟流域 1982—2010 年逐月径流过程进行了模拟,利用 Nash-Suttcliffe 效率系数 E_{ns} 、相关系数 R^2 对模拟和实测值进行计算,校准期和验证期的 E_{ns} 分别为 0.71,0.68,相关系数 R^2 分别为 0.73,0.69,均达到了模型评价的标准,结果具有一定的可信度。总体而言,模型对安家沟流域径流

4.4.2 验证期结果分析 利用最佳参数进行验证期模拟,得到模拟值与实测值非常接近(图 4),经过统计分析得到 E_{ns} 为 0.68,相关系数 R^2 为 0.69,精度符

模拟效果较好,说明 SWAT 模型对于安家沟流域的径流模拟具有一定的适用性。但是模型并未对暴雨

期径流量进行良好的模拟,由于本研究气象站点少,也在一定程度上影响了模型模拟精度。

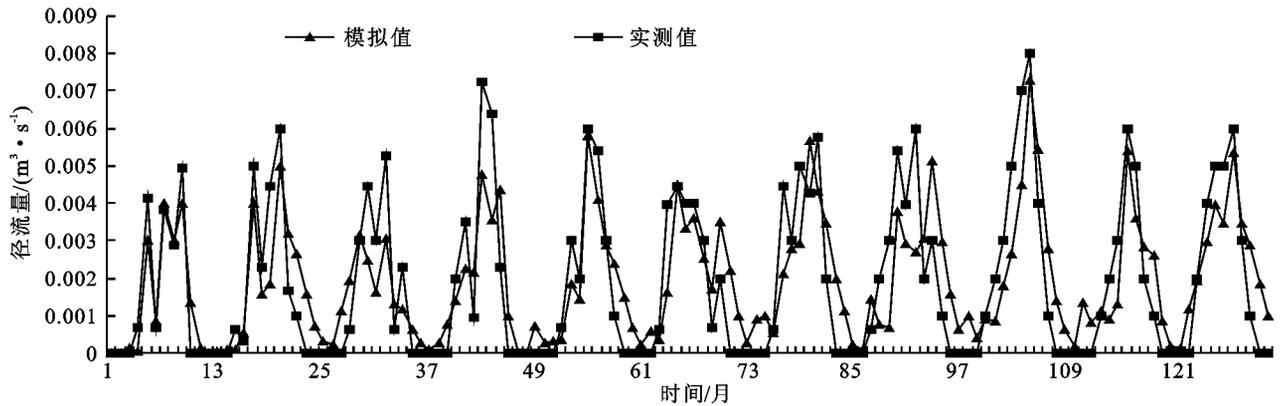


图 4 2000—2010 年验证期逐月径流量模拟值与实测值比较

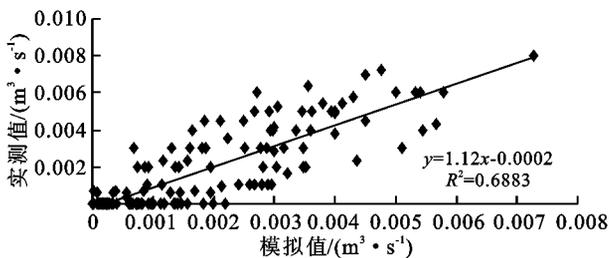


图 5 2000—2010 年验证期逐月径流量模拟值与实测值拟合图

参考文献:

- [1] 徐宗学. Hydrological Models 水文模型[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [2] 景元书,张斌,王明珠,等. 鹰潭小流域季节性降雨径流特征研究[J]. 水土保持学报,2003,17(5):45-47.
- [3] 白淑英,王莉,史建桥,等. 基于 SWAT 模型的开都河流域径流模拟[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(9):79-84.
- [4] 谢媛媛. SWAT 模型在黄土丘陵区参数敏感度分析及率正研究[J]. 水土保持研究,2012,19(4):204-206.
- [5] 李星. 基于 SWAT 模型的黄土丘陵区燕沟流域径流模拟研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.

- [6] 华荣祥. 祖厉河典型小流域的面源污染研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2012.
- [7] Muleta M K, Nicklow J W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model[J]. Journal of Hydrology,2005,306(1/4):127-145.
- [8] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics,1991,33(2):161-174.
- [9] 秦富仓,张丽娟,余新晓,等. SWAT 模型自动校准模块在云州水库流域参数率定研究[J]. 水土保持研究,2010,17(2):86-89.
- [10] 庞靖鹏. 非点源污染分布式模拟[D]. 北京:北京师范大学,2007.
- [11] 黄清华,张万昌. SWAT 模型参数敏感性分析及应用[J]. 干旱区地理,2010(1):8-15.
- [12] 郭晓军,崔鹏,朱兴华. 典型泥石流流域蒋家沟的降雨—径流模拟[J]. 水土保持通报,2011,31(1):175-179.
- [13] 慕星,王芳. 基于 SWAT 模型的宝库河流域日径流模拟[J]. 水利水电技术,2014,45(1):32-35.