

# SWAT 模型自动校准模块在云州水库流域参数率定研究

秦富仓<sup>1</sup>, 张丽娟<sup>1</sup>, 余新晓<sup>2</sup>, 岳永杰<sup>1</sup>, 叶俊道<sup>1</sup>, 王国强<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 呼和浩特 010019; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 是一个具有很强物理机制的长时段的流域分布式水文模型。该文以华北土石山区云州水库流域为例, 运用了 SWAT 模型自动校准模块来进行参数率定和检验, 研究了 SWAT 模型自动校准模块的应用。通过模型自动校准、调整参数, 使模型能够比较准确地模拟该流域的径流量。同时, 经过模型有效性检验, 计算得到, 确定性系数为 0.78, 径流模拟值与实测值拟合度较好。从模拟结果可以看出, SWAT 模型自动校准模块在云州水库流域的应用是较为成功的。

**关键词:** SWAT 模型; 自动校准; 参数率定; 云州水库

**中图分类号:** TV121; TV62

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2010)02-0086-04

## Research of Automatic Calibration Module of SWAT Model in Yunzhou Reservoir Basin

QIN Fu-cang<sup>1</sup>, ZHANG Li-juan<sup>1</sup>, YU Xin-xiao<sup>2</sup>, YUE Yong-jie<sup>1</sup>, YE Jun-dao<sup>1</sup>, WANG Guo-qiang<sup>1</sup>

(1. College of Ecological and Environmental, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** SWAT (Soil and Water Assessment Tool) is a distributed hydrological model of basin for long periods which has very strong physical mechanics. This paper has taken the Yunzhou reservoir basin in north Beijing mountain area as the example, the application of the automatic calibration module of SWAT model was studied by using the automatic calibration module of SWAT model to do parameter rating and test. By automatic adjusting and parameters adjusting, the runoff was simulated accurately. At the same time, by the model effectiveness testing, the value of Ens is 0.78, the fitting degree of the simulation value and the measured value is high. From the simulation results, it's clear that the applicaiton of the automatic calibration module of SWAT model in the Yunzhou reservoir basin is successful.

**Key words:** SWAT model; the automatic calibration; parameter rating; Yunzhou reservoir

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 是美国农业部(USDA)农业研究局(ARS)研制开发的一个具有很强物理机制的、长时段的流域分布式水文模型<sup>[1]</sup>, 该模型能够利用遥感和地理信息系统提供的空间信息, 模拟和预测长期连续时段内土地管理措施对不同土壤类型、土地利用方式和管理条件的大面积复杂流域的径流、泥沙负荷和营养物质流失的影响<sup>[2]</sup>。有关文献已将 SWAT 模型的原理、结构进行了介绍<sup>[3-10]</sup>, 对于 SWAT 模型的自动校准模块的介绍较少, SWAT 模型自动校准模块提高了模型的模拟精度, 因此对其自动校准模块的应用进行研究。

SWAT 模型研制于 20 世纪 90 年代初期, 自开

发以来, 针对面源污染、水土流失、土地利用和农业管理等研究领域在美国、亚洲、欧洲等地区得到广泛应用, 并在应用中得到了不断的发展和完善<sup>[11-12]</sup>。SWAT2005 最新提供的自动校准模块采用残差平方和和分级残差平方和作为目标函数, 通过多目标优选, 采用 SCE-UA 算法进行参数全局优化。自动校准过程中参数可以通过子流域和水文响应单元改变。本文应用 AVSWAT2005 模型的自动校准模块, 在云州水库流域, 对模型参数进行率定。在灵敏性分析的基础上, 调整影响云州水库流域产流模拟结果精度的主导参数因子, 以增强 SWAT 模型自动校准模块的可用性, 提高模拟产流结果与实际径流

\* 收稿日期: 2009-09-21

基金项目: 国家“十一五”科技计划课题(2006BAD03A0201)

作者简介: 秦富仓(1966-), 男, 内蒙古呼和浩特市人, 博士, 教授, 主要研究方向为水土保持与土地资源利用。E-mail: qinfu@126.com

的拟合精度。

1 研究区概况

云州水库地处密云水库上游集水区,该流域隶属河北省张家口市,地跨 3 个县,即赤城县、崇礼县和沽源县,其中赤城县部分占流域面积的 62 %。研究区地处山区,地貌类型复杂,具有明显的山地特征,山地面积约占总面积的 80 %,山区不仅岩层破碎、土质松散、沟壑纵横,而且水土流失严重,水土流失面积达 85 %。流域面积约 1 254. 94 km<sup>2</sup>,属大陆性半干旱季风气候<sup>[13]</sup>,多年平均降水量 370 mm,降水多集中于 7 - 8 月, 10 有效积温 1 600 ~ 3 200 ,无霜期 90 ~ 135 d。土壤类型丰富,以棕壤及褐土分布为主,并有石质土及栗钙土等土壤类型。植被组成以中生、旱中生或中旱生、旱生的多年生灌木和草本植物为主,流域内森林覆盖率 13 %。

2 研究方法

2.1 流域基本数据获取

采用云州水库流域 1 : 10 万地形图,经过数字化处理得到研究区 DEM 图( Grid 格式),投影为 Albers 等面积圆锥投影,椭球参数为 Krasovskii。利用云州水库流域的 1 : 10 万土地利用图和土壤类型图( Grid 格式),在 GIS 支持下,建立该流域土地利用属性和土壤属性的空间数据库。降水数据利用流域内 4 个降雨测站 1998 - 2007 年的逐日降水数据( dBase 表)。气象资料采用云州水库气象站 1998 - 2007 年的气象数据( dBase 表)。水文数据采用该流域 1998 - 2007 年逐月径流数据( dBase 表)。该流域 SWAT 模型试验研究基础数据见附图 1 - 3。



图 1 云州水库流域雨量站分布图

2.2 SCE - UA 自动校准分析方法

SWAT 输入参数大多具有物理意义,一些没有基于物理过程定义的参数,如 SCS 径流曲线系数和

通用水土流失方程中的土地覆被和管理因子可以用来调整参数值,以得到较好的模拟结果。本研究采用 AVSWAT2005 提供的自动校准模块,在云州水库流域,对模型参数进行率定。

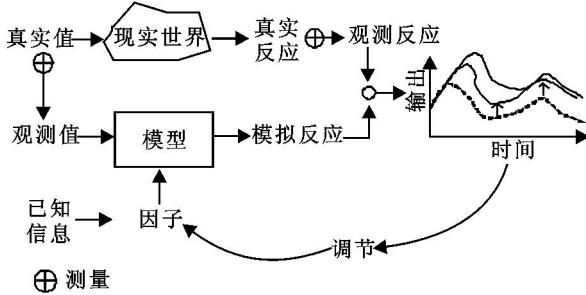


图 2 参数校准关系图

AVSWAT2005 中的参数自动校准是基于美国亚利桑那州大学研发的一种 Shuffled Complex Evolution 数学算法( SCE - UA )<sup>[14]</sup>。SCE - UA 被广泛的运用在水文模型的参数校准和其他一些方面,如土壤侵蚀、地下水、遥感和地表模型中。这种方法通常被认为是最有效的。Thian 等认为, SCE - UA 方法可以有效克服水文模型参数优选中常常表现出的高维、多峰值、非线性、不连续和非凸性问题<sup>[15]</sup>。SCE - UA 已经被成功的运用在 SWAT 模型中的水文因子以及水质因子等的校准<sup>[16-17]</sup>。自动校准的结果的准确性取决于目标函数的选择。SWAT2005 中提供了两种方法,第一种方法是求差值的平方和,表达式如式(1)。

SSQ = \sum\_{i=1}^n (X\_{i,m} - x\_{i,s})^2 \tag{1}

式中:  $n$ ——指观测值和模拟值的数目;  $X_{i,m}$ ——观测值;  $x_{i,s}$ ——模拟值。SSQ 是一种最原始的优化法,它主要是让目标函数与最大值相匹配而忽略了与最小值的匹配。SWAT2005 提供的第二种方法是求给定变化范围后的观测值和模拟值的平方和。

SSQR = \sum\_{j=1}^n (X\_{j,m} - x\_{j,s})^2 \tag{2}

式中:  $n$ ——观测值和模拟值的数目;  $X_{j,m}$ ——观测值;  $x_{j,s}$ ——模拟值。SSQR 方法的目标就是使观测值和模拟值在时间序列上的频率分布相匹配。与 SSQ 方法相比较,该方法更适合校准水质方面的参数。

3 模型自动校准分析

3.1 自动校准

通过运行 SWAT 模型,选择要输入的参数并对其进行灵敏性分析,经过 AVSWAT2005 模拟计算,得到影响云州水库流域产流模拟结果精度的 16 个重要参数见表 1。

表 1 重要参数灵敏性重要性

参数代码	参数含义	重要性	参数代码	参数含义	重要性
SMFMX	6 月 21 日雪融系数	13	SMTMP	雪融最低气温	12
SMFMN	12 月 21 日雪融系数	14	TIMP	结冰气温滞后系数	10
ALPHA_BF	基流 系数	11	CANMX	最大冠层蓄水量	6
ESCO	土壤蒸发补偿系数	7	SOL_K	土壤饱和导水率	3
CH_K2	河道有效水导电率	16	SOL_Z	土壤深度	9
CN2	SCS 径流曲线系数	1	RCHRG_DP	深蓄土层渗透系数	8
SOL_AWC	土壤可利用水量	2	GWQMN	浅层地下水径流系数	5
SURLAG	地表径流滞后时间	15	SLOPE	平均坡度	4

通过灵敏性分析,得知灵敏性因子的重要性,SCS 径流曲线系数(CN2)对径流的影响是最显著的,是最敏感的因子;土壤可利用水量(SOL\_AWC)对径流影响显著;土壤饱和导水率(SOL\_K)、平均坡度(SLOPE)及浅层地下水径流系数(GWQMN)对径流的也有一定影响。其余参数对流域产流几乎没有影响。

在灵敏性分析的基础上,选择对流域产流有影响的参数,包括:CN2、SOL\_AWC、SOL\_K、SLOPE、GWQMN,运行SWAT模型,选择自动校准模块,根据云州水库流域实际的水文资料进行参数自动校准,从而改变参数数值,得出一整套具体参数值,使产流量模拟值与实际值吻合较好。其中列出对流域产流影响显著、一般及影响不大的部分参

数的调整结果,见表 2。

由表 2 可知:径流曲线系数 CN2 值是影响径流量的重要参数,它是流域内土地利用方式、水文土壤类型、耕作管理措施、水文条件、前期水分状况等因素的综合反映。CN2 值与径流量呈正相关,CN2 值越大,河流径流量也越大。在 SWAT 模型的参数调整中,CN2 值越大,模拟值越大,将该值调整为 63,使流域模拟值与实际值吻合较好。

土壤可利用水量 SOL\_AWC,是指土壤中从田间持水量减去植物永久凋萎点的水分,反映了土壤的有效持水量,该参数与产流量呈反比例关系。对流域产流特性影响显著,该系数越大,表明土壤蓄水能力越强,流域径流量降低。在 SWAT 模型的参数调整中,SOL\_AWC 值越大,模拟值越小,将该值调整为 0.02。

表 2 模型参数率定值

参数代码	参数含义	模拟过程	SWAT 中原始值	值域/变化范围	参数调整值
CN2	SCS 径流曲线系数	径流	69	35 ~ 98	63
SOL_AWC	土壤可利用水量	径流	0.21	0 ~ 1	0.02
SOL_K	土壤饱和导水率	径流	32.74	0 ~ 200	2.74
ESCO	土壤蒸发补偿系数	径流	0	0 ~ 1	0.45
REVAPMN	浅层地下水再蒸发系数	径流	0	0 ~ 500	120
CH_K2	河道有效水导电率	径流	0	- 0.01 ~ 150	96
SLOPE	平均坡度	径流	0.166	0 ~ 0.6	0.54
GWQMN	浅层地下水径流系数	径流	0	0 ~ 5000	3159

土壤饱和导水率 SOL\_K 反映了土壤的饱和渗透性能,又叫土壤渗透系数,任何影响土壤孔隙大小和形状的因素都会影响土壤饱和导水率,因为在土壤孔隙中总的流量与孔隙半径的四次方成正比。对流域产流有一定的影响,SOL\_K 越大,表明土壤渗透性越好,流域径流量降低。在 SWAT 模型的参数调整中,SOL\_K 越大,模拟值越小,将该值调整为 2.74。

浅层地下水径流系数 GWQMN 是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。径流系数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。在 SWAT 模型的参数调整中,GWQMN 值越大,模拟值越大,将该值调整为 3 159。

土壤蒸发补偿系数 ESCO 是模型调整不同土壤层间水分补偿运动的参数,该系数与产流量呈反比例关系。在 SWAT 模型的参数调整中,ESCO 值越大,模拟值越小,将该值调整为 0.45。

浅层地下水再蒸发系数 REVAPMN 主要决定含水层中的水相对非饱和地区水流的强度,其值越大表明浅层水流向根系的可能性越大,为 0 时为浅层地下水几乎不向根系输移,当为 1 时,其输移速率

相当于潜在蒸散发量。该系数对以上输出结果的影响较小。所以在 SWAT 模型参数调整中,该值的大小与模拟径流影响不大。

3.2 模型有效性检验

通过模型的自动校准,调整参数,通过计算来进行模型有效性验证,模型有效性的评定或检验采用确定性系数(Ens)来进行。确定性系数是一个整体综合指标,可以定量表征对整个径流过程拟合好坏的程度,这是描述计算值对目标值的拟合精度的无量纲统计参数,一般取值范围在 0 - 1 之间。确定性系数(Ens)<sup>[18]</sup>的计算式如式(3)。

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avg})^2}$$

(3)

式中:Q<sub>m</sub>——观测值;Q<sub>p</sub>——模拟值;Q<sub>avg</sub>——观测的平均值;n——观测的次数。当 Q<sub>m</sub> = Q<sub>p</sub> 时,Ens = 1;如果 Ens 为负值,说明模型模拟值比直接使用测量值的算术平均值更不具有代表性。确定性系数的评定标准见表 3,一般认为确定性系数达到 0.7 以上为比较准确。

表 3 确定性系数的评定标准

等级	甲等	乙等	丙等
标准	> 0.9	0.7 ~ 0.9	0.5 ~ 0.69

本文采用 1998 - 2007 年的月平均流量进行模型有效性检验。通过计算,Ens 为 0.78,达到了乙等(Ens 值为 0.7 ~ 0.9)方案的要求,说明径流模拟值与实测值拟合度较好(图 3),得了较好的模拟计算成果。

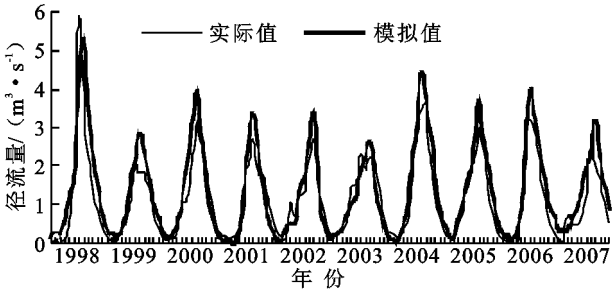


图 3 1998 - 2007 年月流量模拟值与实测值对比

4 结 论

通过对 1998 - 2007 年云州水库流域分布式水文过程的模拟,验证了模型的可靠性。SWAT 模型所需参数较多,为了提高模拟精度,运用了 SWAT 模型自动校准模块来进行参数率定和检验。其它相关文献如孙庆艳<sup>[11]</sup>、郝芳华<sup>[4]</sup>用了相同的方法做参数率定和检验,均得到较好的模拟结果。同时,根据云州水库流域实际水文资料,通过自动校准,调整参

数,得到一整套参数值,经过模型有效性检验,经计算 Ens 值为 0.78,达到了乙等方案的要求,使径流模拟值与实测值拟合度较好。其他相关文献如林文娇<sup>[19]</sup>、李晓<sup>[20]</sup>模型的有效性检验 Ens 值分别为 0.77 和 0.75,与本文的研究结果一致。所以本文研究对于 SWAT 模型在华北土石山区的应用和推广,具有很好的示范性,Ens 值在乙等方案要求范围内,从模拟结果可以看出,SWAT 模型自动校准模块在云州水库流域的应用是较为成功的。

参考文献:

[1] Arnold J G,Williams J R,Maidment D R. Continuous - time water and sediment - routing model for large basins[J].Journal of Hydraulic Engineering,1995,121 (2):171-183.

[2] 朱新军,王中根,李建新,等. SWAT 模型在漳卫河流域应用研究[J].地理科学进展,2006,25(5):106-110.

[3] 郭生练,李兰,李订芳. 分布式物理流域水文模型研究进展[M]//刘昌明. 黄河流域水资源环境调控和恢复机制研究进展. 郑州:黄河水利出版社,2001:51-57.

[4] 郝芳华. 流域非点源污染分布式模拟研究[D]. 北京:北京林业大学,2003.

[5] 吴险峰,刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展[J]. 地理科学进展,2002,7(4):341-348.

[6] 梁犁丽,汪党猷,王芳. SWAT 模型及其应用进展研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2007,5(2):125-131.

[7] 王中根,刘昌明,黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展,2003,22(1):79-85.

[8] 丁晋利,郑粉莉. SWAT 模型及其应用[J]. 水土保持研究,2004,11(4):128-156.

[9] 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.

[10] 李峰,胡铁松,黄华金. SWAT 模型的原理、结构及其应用研究[J]. 中国农村水利水电,2008,3(24):24-28.

[11] 孙庆艳. 华北土石山区典型流域森林植被水生态过程响应研究[D]. 北京:北京林业大学,2008.

[12] 张明旭. SWAT 模型初步研究[J]. 吉林师范大学学报,2006,(2):13-15.

[13] 张蕾娜,李秀彬. 一种可用于表征土地利用变化水文效应的水文模型探讨[J]. 水文,2004,24(3):4-7.

[14] Romanowicz A A ,anclooster M V ,Rounsevell M ,et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment , Belgium [J]. Ecological Modeling , 2005 , 187:27-39.

(《气象卫星遥感监测公报》2005 年第 24 期)中显示的结果基本一致。综上所述,本研究中的方法可以对湖南省的旱情进行近实时监测。

## 4 结 论

(1) 在利用 MODIS 数据优良特性的前提下,用 EVI 代替 NDVI 构建 EVI- $T_s$  特征空间,用 VTCI 值作为判定标准,对湖南省 2005 年 7 月下旬旱情进行了监测,结果表明:运用此种方法进行大面积干旱监测是可行的。

(2) 缺少用 EVI 代替 NDVI 后对监测旱情分布的精度对比。

(3) 由于缺少当时的土壤湿度资料,无法直观的展示出 VTCI 与土壤湿度间的相关关系。

(4) 利用遥感影像进行旱情监测是可行的,如何提高精度、实现小面积监测是各界科研工作者以后努力的方向。

### 参考文献:

- [1] 张红梅,沙晋明. 遥感监测土壤湿度的方法综述[J]. 中国农学通报, 2005, 21(2): 307-311.
- [2] 卢远,华瑾,韦燕飞. 利用 MODIS 数据进行旱情动态监测研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(3): 64-65, 75, 85.
- [3] 林辉,熊育久,万玲凤,等. 湖南省 MODIS 遥感植被指数的时空变化[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 581-585.
- [4] 潘卫华,陈家金,陈惠,等. 基于 MODIS 数据的福建省干旱遥感动态监测分析[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 1015-1019.
- [5] Qin Z, Dall 'Olmo G, Karnieli A, et al. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis retrieving land surface temperature from NOAA - AVHRR data[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(19): 22655-22670.
- [6] 梁芸,张峰,韩涛. 利用 EOS/MODIS 植被供水指数监测庆阳地区的土壤湿度[J]. 干旱气象, 2007, 25(1): 44-47.
- [7] 杨鹤松,王鹏新,孙威. 条件植被温度指数在华北平原干旱监测中的应用[J]. 北京师范大学学报, 2007, 43(3): 314-318.
- [8] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A Simple Interpretation of the Surface Temperature Vegetation Index Space for Assessment of Surface Moisture Status[J]. Remote Sensing Environment, 2002, 79(2): 213-224.
- [9] 王鹏新,龚健雅,李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. 武汉大学学报, 2001, 26(5): 412-417.
- [10] 王正兴,刘闯, Huetea. 植被指数研究进展: 从 AVHRR - NDVI 到 MODIS - EVI[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
- [11] Mao Kebiao. A Study of Methods for Land Surface Temperature Retrieval from MODIS Data[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2004: 26-31.
- [12] Liu W, Kogan F N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17: 2761-2782.
- [13] Gillies R R, Carlson T N, Kustas W P. A Verification of the "Tri - angle" Method for Obtaining Surface Soil Water Content and Energy Fluxes from Remote Measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Surface Radiant Temperature [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15): 3145-3166.
- [14] 黄泽林,覃志豪. 利用 MODIS 数据监测大面积土壤水分与农作物旱情的研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(11): 4784-4787.
- [15] Duan Q, Gupta H V, Sorooshian S, et al. Calibration of Watershed Models[M]// Water Science and Application Series, 6. Washington DC: AGU Press, 2002.
- [16] Eckhardt K, and Arnold J G. Automatic calibration of a distributed catchment model[J]. Journal of Hydrology, 2001, 251: 103-109.
- [17] van Griensven A, Francos A, Bauwens W. Sensitivity analysis and auto-calibration of an integral dynamic model for river water quality[J]. Water Science and Technology, 2002, 45(5): 321-328.
- [18] 黄河水利委员会天水水土保持科学实验站. 黄土丘陵沟壑第三副区水土流失原形观测及规律研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004.
- [19] 林文娇,王林,陈兴伟. 晋江东溪流域土壤侵蚀分布式模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(3): 38-40.
- [20] 李晓,李致家,董佳瑞. SWAT 模型在伊河上游径流模拟中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 23-26.

(上接第 89 页)