

# 湟水流域 SWAT 模型构建及参数不确定性分析

杨军军<sup>1</sup>, 高小红<sup>1</sup>, 李其江<sup>2</sup>, 陈强<sup>2</sup>, 冯仕超<sup>1</sup>

(1. 青海师范大学 生命与地理科学学院,

青藏高原环境与资源教育部重点实验室, 西宁 810008; 2. 青海省水文水资源勘测局, 西宁 810008)

**摘 要:**敏感性分析和不确定性分析是分布式水文模型参数校准和模型构建的先决条件。以位于青藏高原与黄土高原过渡地带的青海湟水流域为例, 基于 SWAT 模型的拉丁超立方和单次单因子(LH-OAT)采样方法和 SWAT-CUP 程序的拉丁超立方采样方法进行模型参数敏感性分析, 同时以 SWAT-CUP 的 P 因子和 R 因子进行模型不确定性分析, 最终结合手动调参和自动率定算法, 构建湟水流域分布式水文模型。结果表明: 湟水流域日尺度模拟中, 率定期模型平均确定系数为 0.7, 平均效率系数为 0.68; 验证期平均确定系数为 0.65, 平均效率系数为 0.53, 可以满足应用要求; PSO 算法在水文模型率定中总体表现良好; 基于 SWAT 模型和 SWAT-CUP 程序的单次率定时分别为 3.5 min 和 2.2 min, SWAT-CUP 程序明显快于 SWAT; 分析结果还表明: 模型不确定性和模型率定结果精度并不一致, 但模型不确定性决定着模型验证期的结果精度, 为确保验证期精度, 必须降低模型不确定性; 模型自动率定中, 相同迭代次数下, SWAT 模型对于流量较大的子流域率定效果较好。

**关键词:**敏感性分析; 不确定性分析; PSO 算法; SWAT-CUP; SWAT 模型

**中图分类号:**TV121

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2013)01-0082-07

## SWAT Model Construction and Uncertainty Analysis on Its Parameters for the Huangshui River Basin

YANG Jun-jun<sup>1</sup>, GAO Xiao-hong<sup>1</sup>, LI Qi-jiang<sup>2</sup>, CHEN Qiang<sup>2</sup>, FENG Shi-chao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Environments and Resources in

Qinghai-Tibetan Plateau, School of Life and Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xi'ning

810008, China; 2. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Qinghai Province, Xi'ning 810008, China)

**Abstract:** Sensitivity analysis(SA) and uncertainty analysis(UA) are prerequisites for parameter calibration and distributed hydrologic model development. Taking the Huangshui River basin located in Qinghai—Tibetan Plateau and Loess Plateau as a case, firstly, based on SWAT model and SWAT-CUP program, sensitivity analysis was carried out by combing Latin-Hypercube(LH) and One-Factor-At-a-Time(OAT) sampling with Latin hypercube sampling; secondly, uncertainty analysis was conducted by using P-factor and R-factor of SWAT-CUP program; finally, parameter calibration and distributed hydrologic model building for the Huangshui River basin were performed by the coupled method of manual and auto-calibration. The results showed that the average determination coefficient was 0.7 and the average Nash-Sutcliff was 0.68 for the calibration. The average determination coefficient was 0.65 and the average Nash-Sutcliff was 0.53 for the validation, the result could meet the application requirements. PSO algorithm had a good performance in the model calibration. The time for per calibration was 3.5 min and 2.2 min for SWAT model and SWAT-CUP, respectively, obviously the SWAT-CUP's calibration time was shorter than that of SWAT model. Uncertainty analysis results were not always accordance with the calibration result precision, but it determined the validation precision of the model. So for the validation of the model, the uncertainty of the model should be cut down. Under the same times of the model calibration, SWAT model had a better runoff simulation value for the larger subbasin than the smaller one.

**Key words:** sensitivity analysis; uncertainty analysis; PSO algorithm; SWAT-CUP; SWAT model

收稿日期: 2012-01-12

修回日期: 2012-07-11

资助项目: 国家自然科学基金项目(40861022); 中国科学院“西部之光”项目(科发人教字[2006]378号)

作者简介: 杨军军(1984—), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: junjun\_yang@126.com

通信作者: 高小红(1963—), 女, 陕西人, 教授, 硕士生导师, 主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: xiaohonggao226@gmail.com

水文模型的非线性和参数相关性导致模型解空间可能会存在多个局部最优解<sup>[1]</sup>,模型率定结果往往存在很大的不确定性。水文模型的不确定性主要包括模型输入的不确定性、系统结构的不确定性和系统输出的不确定性<sup>[2]</sup>。由于模型不确定性较为复杂,同时对于模型不确定性的分析并不能直接提高模拟结果的精度,所以已有研究一般是通过目标函数来检验模型在流域的适用性<sup>[3-4]</sup>,并未对模型不确定性进行分析。

近年来模型不确定性的研究逐渐增多,就 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型的不确定性而言,国外 Mansour 等<sup>[5]</sup>基于 ANN(Artificial Neural Network)和 SWAT 模型对 Kasilian 流域泥沙含量进行了不确定性对比研究,结果表明,ANN 的置信区间比 SWAT 模型的窄;Yang 等<sup>[6]</sup>对 5 种不确定性分析算法(GLUE, ParaSol, SUFI-2, MCMC 和 IS)进行对比研究,在计算条件允许的情况下,作者推荐基于贝叶斯算法进行模型不确定性分析;Abbaspour 等<sup>[1]</sup>利用 SUFI-2 程序对 2 个炉底灰填埋场径流和污染成功地进行了率定和不确定性分析,证明水文模型是对该类污染的一种有效监测和模拟手段。国内姚云龙等<sup>[7]</sup>针对已有研究分析了 SWAT 模型的输入数据不确定性;陈德胜等<sup>[8]</sup>借助 GLUE 算法重点分析了 SWAT 模型径流模拟的不确定性,结果表明模型可以较好地模拟沔河流域径流过程,但是模拟的置信区间不能完全覆盖实测径流过程;薛晨<sup>[9]</sup>利用 SUFI-2 和 GLUE 算法对霍林河流域产流产沙过程进行了参数不确定性分析,结果表明,两种方法各有特点和适用性,相比较而言,对于运算要求不高的模型来说,GLUE 方法优于 SUFI-2 方法;而 SUFI-2 方法则更适合复杂的、运算要求较高的模型。但是,国内鲜有基于 PSO(Particle Swarm Optimization,粒子群)算法对 SWAT 模型径流过程进行模型率定和不确定性的分析,而且根据陈强等<sup>[10]</sup>对于 SWAT 模型在 Windows 和 Linux 系统上运行时间的比较发现,SWAT 模型的自动率定及模型不确定性分析耗时较长,给多水文站点的大、中型流域自动率定过程带来一定的困难。

基于以上原因,本文以青海省湟水流域为研究区域,首先,通过 SWAT 模型和 SWAT-CUP 程序进行模型参数敏感性对比分析,确定模型的敏感性参数;其次,利用敏感性分析结果,借助 SWAT-CUP(SWAT-Calibration and Uncertainty Programs)程序的 PSO 算法进行径流率定和不确定性分析,探索 SWAT 模型在湟水流域的适用性和模型参数不确定性。

## 1 研究区概况与数据来源

湟水流域位于青海省东部,介于  $36^{\circ}02'N$ — $37^{\circ}28'N$ ,

$100^{\circ}41'E$ — $103^{\circ}04'E$ 。流域地形以中、高山地、黄土丘陵和河谷为主,海拔  $1\,650\sim 4\,898\text{ m}$ ,青海省境内流域面积为  $16\,120\text{ km}^2$ ,年平均径流量为  $21.5\text{ 亿 m}^3$ 。属高原干旱、半干旱大陆性气候,年平均气温  $2.5\sim 7.5^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量为  $460.5\text{ mm}$ ,年蒸发量为  $800\sim 1\,100\text{ mm}$ 。

本研究所用数据包括:1:25 万 DEM,1:100 万土壤类型图以及土壤属性数据,1987 年土地利用类型图,研究区 33 个雨量站数据、8 个气象站点日降水、日最高最低气温、日相对湿度、日平均风速和日照时数数据以及 6 个水文站点的日径流数据。其中,水文站点中乐都站径流数据时间段为 1988 年 6 月—2000 年 12 月,民和站仅有 1986 年和 1987 年 2 a 数据,其余各站点数据时间段均为 1986 年 1 月—2000 年 12 月。根据流域已有数据,模型模拟时以 1986 年为模型预热期,1987—1995 年为模型率定期,1996—2000 年为模型验证期。流域子流域划分、水文站点分布详见图 1。

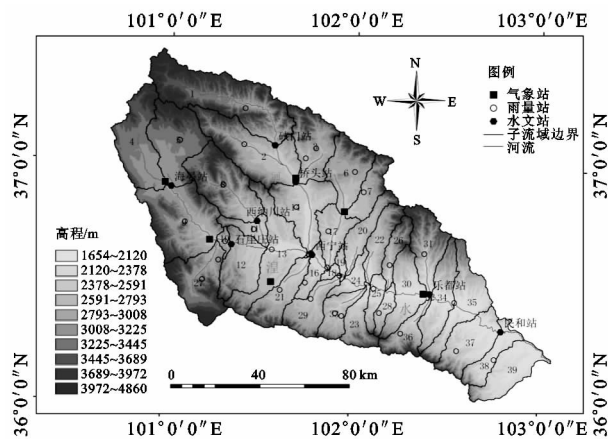


图 1 湟水流域气象站、雨量站、水文站与子流域分布

## 2 模型高程分带与参数敏感性分析

SWAT-CUP 是为 SWAT 模型参数率定而开发的一个公开的计算机程序,可以被免费复制和使用。该程序将 GLUE, ParaSol, SUFI2, MCMC 和 PSO 程序与 SWAT 模型联系起来,主要用于模型敏感性、参数不确定性分析及参数率定和验证<sup>[11]</sup>。

### 2.1 模型高程分带设置

SWAT 模型主要用于农业区水文研究,应用于地形复杂、有积雪的大型山区时必须对模型进行气温、降水随海拔变化的高程带设置<sup>[1]</sup>。Fontaine<sup>[12]</sup>在对落基山(Rocky)温德河(Wind River)流域的研究中,通过对模型气温、降水随流域高程分带的细化及对应递减梯度值的设置,使模型效率系数 NS(Nash-Sutcliffe coefficient)值从初始的  $-0.7$  提高到了

0.86,很大程度地提高了模型模拟山区流域的精度。湟水流域属于典型的河谷、山区地形,因此对于流域气温和降水随海拔高程的梯度设置非常必要。

通过对湟水流域 1961—2010 年近 50 a 来 8 个气象站点气温、降水与海拔的相关性分析,发现流域气温与海拔的相关度为−0.96,降水与海拔的相关度为 0.28。气温与海拔的相关性较高,且为负相关。经计算气温每 1 km 变化梯度为−6.1℃,即海拔每升高 1 km 气温降低 6.1℃;降水每 1 km 变化梯度为 70.2 mm,即海拔每升高 1 km 降水增加 70.2 mm。根据余建英等<sup>[13]</sup>对相关性的界定,当变量间相关度绝对值 $|R|<0.28$ 时,说明变量间的相关程度极弱,视为不相关。故在模拟中,界定研究区降水与流域海拔无关。因此,模型高程分带中只需对气温随海拔的变化进行细化。本文中模型计算结果恰好与 SWAT 模型输入输出文档<sup>[14]</sup>中气温与海拔变化梯度的默认值(海拔每升高 1 km 气温降低 6℃)几乎相等,故在湟水流域模拟中对气温、降水随海拔的变化梯度值不

做特别设定。

### 2.2 参数敏感性分析

SWAT 分布式水文模型参数众多,其中仅关于径流的参数就有 26 个之多,通过模型敏感性分析(Sensitivity Analysis,SA)可以去掉对模拟结果影响较小的参数,提高模型率定效率、减小模型的不确定性<sup>[15]</sup>。本文模型参数敏感性分析中,首先分别基于 SWAT 软件和 SWAT-CUP 程序进行敏感性探讨和比较,然后完成流域参数的敏感性分析,得到对该流域最为敏感的参数。

SWAT 模型采用 LH-OAT(Latin-Hypercube-One Factor-At-a-Time)敏感性分析方法,该方法在参数取值中成功地结合了拉丁超立方采样(LH)的参数取值的全局性和单次单因子(OAT)的参数取值的确定性的优点,使得该方法既具有拉丁超立方采样的强壮性,同时又通过单次单因子变化方法将目标函数的改变明晰在某个参数的变化上。通过该算法可以有效地获取影响模型的主要参数(表 1)。

表 1 敏感性分析参数

SWAT-CUP 参数	最小取值	最大取值	类型	单位	变量名称	影响对象及过程
r_CN2. mg	−0.5	0.5	1	—	径流曲线数	地表径流
v_ALPHA_BF. gw	0	1	1	—	基流 $\alpha$ 系数	地下水
v_GW_DELAY. gw	0	500	1	d	地下水滞后系数	地下水过程
v_CH_K2. rte	0	150	1	mm/h	主河道水力传导率	河道汇流
v_ALPHA_BNK. rte	0	1	1	—	河岸基流 $\alpha$ 因子	河岸产流
r_SOL_AWC(1). sol	−0.5	0.5	1	—	土壤有效含水量	土壤水分
r_SOL_K(1). sol	−0.5	0.5	1	—	土壤饱和导水率	土壤水分
r_SOL_BD(1). sol	−0.5	0.5	1	—	土壤容重	土壤水分
v_GWQMN. gw	0	5000	1	mm	浅层地下水径流系数	土壤水分
v_GW_REVAP. gw	0.02	0.2	1	—	地下水再蒸发系数	地下水过程
v_REVAPMN. gw	0	500	1	mm	浅层地下水再蒸发系数	地下水过程
v_ESCO. hru	0.01	1	1	—	土壤蒸发补偿系数	土壤蒸发
r_SLSUBBSN. hru	−0.5	0.5	1	—	平均坡长	地貌特征
r_TLAPS. sub	−0.5	0.5	1	—	气温递减率	海拔对温度的影响
r_SOL_Z(1). sol	−0.5	0.5	1	—	第一层土壤深度	土壤水分
r_EPCO. hru	−0.5	0.5	1	—	植被蒸腾补偿系数	蒸发
v_CH_N2. rte	0	0.3	1	—	主河道曼宁系数	河道汇流
r_SOL_ALB(1). sol	−0.5	0.5	1	—	潮湿土壤反照率	土壤蒸发
v_RCHRG_DP. gw	0	1	1	—	深蓄水层渗透系数	地下水过程
v_OV_N. hru	0	0.8	1	—	坡面流曼宁系数	地表汇流
r_HRU_SLP. hru	−0.5	0.5	1	—	平均坡度	地貌特征
v_CANMX. hru	0	100	1	mm	最大冠层蓄水量	植被蒸散发
v_SFTMP. bsn	−5	5	2	℃	降雪气温	降雪和融雪
v_SMFMX. bsn	0	10	2	mm/(d·℃)	6 月 21 日最大雪融度日因子	降雪和融雪
v_SMFMN. bsn	0	10	2	mm/(d·℃)	12 月 21 日最小雪融度日因子	降雪和融雪
v_SMTMP. bsn	−5	5	2	℃	雪融最低气温	降雪和融雪
v_TIMP. bsn	0.01	1	2	—	结冰气温滞后系数	降雪和融雪
v_SURLAG. bsn	1	24	2	—	地表径流滞后系数	地表径流

注:SWAT-CUP 参数名称中首字母 v 代表分析中对该参数做替换处理,r 代表分析中对该参数做乘处理;参数类型中 1 代表该参数为分布式模型参数,2 代表参数为全局性参数;单位中“—”表示无量纲。

SWAT-CUP 程序采用基于拉丁超立方采样的目标函数多元回归值评价模型参数的敏感度<sup>[16]</sup>。软件操作界面友好,参数控制灵活,比 SWAT 软件运行速度快。本研究中,所有参与模型敏感性分析的参数如表 1 所示。程序对表 1 中参数的处理基于以下方法进行:做乘处理的分布式参数的取值范围在处理时,首先对最小、最大值加 1,然后再与模型参数取值相乘作为该参数的取值范围;做替换处理的参数取值范围(参考 SWAT 数据库定义文件.rng 获取)直接作为该参数的取值范围。

利用 SWAT 模型和 SWAT-CUP 程序分别对 6 个子流域(1 号、2 号、8 号、15 号、30 号和 37 号子流域)出口站径流进行敏感性分析,敏感性分析部分结果见表 2。

表 2 SWAT 和 SWAT-CUP 的敏感性分析结果

1 号子流域				15 号子流域			
SWAT 参数	均方值	SWAT-CUP 参数	敏感性	SWAT 参数	均方值	SWAT-CUP 参数	敏感性
基流 $\alpha$ 系数	1.13	主河道水力传导率	3.72	径流曲线数	2.04	浅层地下水再蒸发系数	-2.37
主河道水力传导率	0.50	第一层土壤深度	-3.65	基流 $\alpha$ 系数	1.18	深蓄水层渗透系数	2.30
径流曲线数	0.25	土壤有效含水量	-1.86	主河道曼宁系数	0.67	平均坡长	2.19
主河道曼宁系数	0.25	平均坡度	1.85	主河道水力传导率	0.64	河岸基流 $\alpha$ 因子	-2.11
土壤蒸发补偿系数	0.18	浅层地下水再蒸发系数	1.49	土壤蒸发补偿系数	0.32	土壤蒸发补偿系数	-1.91
第一层土壤深度	0.17	基流 $\alpha$ 系数	-1.44	土壤饱和导水率	0.22	地下水再蒸发系数	-1.85
土壤饱和导水率	0.16	地下水再蒸发系数	-1.43	浅层地下水径流系数	0.22	径流曲线数	1.77
平均坡度	0.09	径流曲线数	1.30	地表径流滞后系数	0.21	主河道水力传导率	-1.39
浅层地下水径流系数	0.09	最大冠层蓄水量	1.28	平均坡度	0.17	第一层土壤深度	-1.19
地表径流滞后系数	0.07	气温递减率	0.96	第一层土壤深度	0.14	植被蒸腾补偿系数	-0.91
最大冠层蓄水量	0.07	潮湿土壤反照率	-0.91	最大冠层蓄水量	0.13	浅层地下水径流系数	0.82
土壤有效含水量	0.05	浅层地下水径流系数	-0.73	土壤有效含水量	0.11	平均坡度	0.71
潜在最大叶面积指数	0.01	土壤蒸发补偿系数	0.69	潜在最大叶面积指数	0.06	基流 $\alpha$ 系数	-0.62
结冰气温滞后系数	0.01	平均坡长	-0.65	植被蒸腾补偿系数	0.03	土壤容重	0.56
地下水再蒸发系数	0.01	坡面流曼宁系数	0.63	结冰气温滞后系数	0.03	潮湿土壤反照率	-0.53

从敏感度值排序来看,两种敏感性分析结果存在较大的不一致性,这主要是因为 SWAT 和 SWAT-CUP 的敏感度评价指标不同。SWAT 模型的敏感度用“均方值”(mean)评价,属于“完全敏感性分析”<sup>[17]</sup>;而 SWAT-CUP 的敏感度用“ $t$  检验”(t-test)评价。相比 SWAT 的“均方值”,SWAT-CUP 的“ $t$  检验”反映的是在其它率定参数变化的情况下,模型某一参数的变化所产生的目标函数的平均变化量,属于基于线性假设的相对敏感度,SWAT-CUP 的“ $t$  检验”仅提供了某一参数关于目标函数的部分敏感度。

总体来讲,二者敏感性分析结果中前 15 位参数差异不大,但 SWAT-CUP 程序运行效率更高,故本研究中选择基于 SWAT-CUP 程序进行模型敏感性

由于篇幅有限,表中仅列出 1 号和 15 号子流域敏感性排序在前 15 位的参数。对比同一站点两种软件的敏感性分析结果发现,二者敏感性分析结果中前 15 位参数基本一致,SWAT 结果中除去两站中的全局性敏感参数外,其余参数中有 2~3 个与 SWAT-CUP 程序结果不同。该现象可能源于以下原因:首先,两者敏感性评价指标不同,这是最主要的原因;其次,敏感性分析中,SWAT 做替换处理的参数取值范围借鉴的是模型敏感性分析的默认取值,而 SWAT-CUP 程序中做替换处理的参数取值参考 SWAT 模型参数定义文件(.rng),两者取值大小稍有不同;最后,SWAT 中做乘处理的参数取值范围为 $\pm 0.25$ ,而 SWAT-CUP 程序中做乘处理的参数取值范围为 $\pm 0.5$ 。

分析。根据以往的调参经验,选择了 6 个子流域出口基于 SWAT-CUP 程序进行参数敏感性分析,分析结果见表 3。表中给出了敏感度排序前 13 位的参数,其中 37 号子流域距离流域出口最近,故将其作为整个流域出口站点。对该子流域出口水文站点进行包含全局性参数的敏感性分析,其余各站点只对分布式参数进行敏感性分析。对比各子流域敏感性分析结果中较敏感参数发现:影响湟水流域径流的主要因子包括:流域地形、土壤蓄水能力和河道水力传导率等,这与流域位于青藏高原与黄土高原过渡地带,属于高原干旱、半干旱型气候,地形多丘陵、中高山地,土壤类型以灰褐土、黑钙土和栗钙土为主,淋溶作用弱、蓄水能力差等因素密切相关。

表 3 子流域敏感性分析结果

敏感度排序	子流域 1	子流域 2	子流域 8
1	主河道水力传导率	潮湿土壤反照率	土壤饱和导水率
2	第一层土壤深度	土壤饱和导水率	主河道曼宁系数
3	土壤有效含水量	地下水滞后系数	植被蒸腾补偿系数
4	平均坡度	深蓄土层渗透系数	潮湿土壤反照率
5	浅层地下水再蒸发系数	河岸基流 $\alpha$ 因子	浅层地下水再蒸发系数
6	基流 $\alpha$ 系数	地下水再蒸发系数	径流曲线数
7	地下水再蒸发系数	土壤容重	土壤蒸发补偿系数
8	径流曲线数	基流 $\alpha$ 系数	第一层土壤深度
9	最大冠层蓄水量	气温递减率	主河道水力传导率
10	气温递减率	主河道曼宁系数	深蓄土层渗透系数
11	潮湿土壤反照率	平均坡度	最大冠层蓄水量
12	浅层地下水径流系数	最大冠层蓄水量	基流 $\alpha$ 系数
13	土壤蒸发补偿系数	浅层地下水再蒸发系数	河岸基流 $\alpha$ 因子

敏感度排序	子流域 15	子流域 30	子流域 37
1	浅层地下水再蒸发系数	深蓄土层渗透系数	平均坡长
2	深蓄土层渗透系数	土壤饱和导水率	雪融最低气温
3	平均坡长	气温递减率	12 月 21 日最小雪融度日因子
4	河岸基流 $\alpha$ 因子	潮湿土壤反照率	第一层土壤深度
5	土壤蒸发补偿系数	主河道水力传导率	6 月 21 日最大雪融度日因子
6	地下水再蒸发系数	植被蒸腾补偿系数	土壤有效含水量
7	径流曲线数	土壤蒸发补偿系数	主河道曼宁系数
8	主河道水力传导率	坡面流曼宁系数	基流 $\alpha$ 系数
9	第一层土壤深度	平均坡长	潮湿土壤反照率
10	植被蒸腾补偿系数	最大冠层蓄水量	浅层地下水再蒸发系数
11	浅层地下水径流系数	地下水滞后系数	浅层地下水径流系数
12	平均坡度	土壤容重	最大冠层蓄水量
13	基流 $\alpha$ 系数	基流 $\alpha$ 系数	平均坡度

3 模型不确定性分析

SWAT-CUP 程序中用于表示模型不确定性的指标包括以下两个： $P$  因子( $P$ -factor)和  $R$  因子( $R$ -factor)。其中  $P$  因子指:95%置信区间(95% Prediction Uncertainty,95PPU)模拟数据占实测数据的百分比。95PPU 通过计算某输出变量基于拉丁超立方采样(LH),分别在 2.5%和 97.5%置信水平下的累积分布,即去掉小于 2.5%的部分和大于 97.5%的部分;另一指标  $R$  因子表示 95PPU 条带平均厚度与观测数据标准差的比值。理论上, $P$  因子取值在 0~1 之间, $R$  因子取值在 0~ $\infty$ 之间,当  $P$  因子取 1、 $R$  因子取 0 时表示模型模拟值与实测值完全一致。模型率定中  $P$  因子取值越大, $R$  因子取值也会越大,所以可以通过以较大的  $P$  因子为代价获得较大的  $R$  因子取值,但最终为了取得预期的参数最优取值范围,模型率定中需要平衡两个不确定性因子的取值大小<sup>[16]</sup>。各子流域不确定性指标  $P$  因子和  $R$  因子的计算结果见表 4。不确定性指标  $P$  因子为 0.41、 $R$  因子为 0.45,两

者均较小,说明该子流域出口站点率定结果存在一定的不确定性。但从模型率定结果(表 5)可知,2 号子流域模型率定期确定系数  $R^2$  和效率系数 NS 分别为 0.69 和 0.62,结果比较满意,这表明模型的不确定性结果并不完全和模型率定结果精度相一致。

根据模型不确定性产生的原因及传递特点,2 号子流域的不确定性包含了来自上游 1 号子流域的不确定性,子流域间模型不确定性的累积效应,使得该子流域率定结果不确定性偏大;但在径流模拟中,1 号、2 号子流域均处于流域上游,通过各子流域出口的径流量很小,各子流域间径流量影响较小,故在模型不确定性较大的情况下仍然有较好的模拟结果。

表 4 子流域出口站点不确定性分析结果

子流域编号	1	2	8	15	30	37
$P$ 因子	0.83	0.41	0.8	0.81	0.65	0.92
$R$ 因子	1.88	0.45	1.56	1.19	0.87	1.49

比较其余各站点率定结果可知,37 号子流域的率定效果最好,这与该站点仅有 1 a 径流观测数据参与模型率定有一定关系。模型率定中率定期时间越

长,率定时间段内水文过程的不一致性就会越大,一定程度上会增加模型率定的难度,降低模型率定结果精度。15 号子流域不确定性分析结果也较好。30 号子流域由于出口水文站点率定期径流观测数据时间段为 1988 年 6 月—1995 年 12 月,相比其余水文站点,缺少了 1986 年 1 月—1988 年 5 月观测数据,这可能是导致该子流域模拟不确定性  $P$  因子相对较低的原因。1 号、8 号子流域虽然模拟不确定性  $P$  因子较大,分别为 0.83 和 0.8,但对应的  $R$  因子也相对较大,这可能与两站点均为流域上游子流域出口站点,经过子流域出口的径流量较小有一定关系。子流域出口径流量较小,人类活动对于流域径流的干扰程度相对增强,增大了模型径流率定过程的不确定性。

模型率定、验证中我们选择模型效率系数 NS 作为目标函数(Objective function),从各子流域出口站

点率定迭代的目标函数走势(图 2)可知,相比其它子流域,2 号、30 号子流域目标函数走势不稳定。其中 2 号子流域表现较为明显,目标函数曲线在迭代中间段出现较大的起伏,最后段一直保持较低状态,说明该站点的率定存在一定的不确定性,PSO 算法在非线性问题优化中有时会陷入局部最优。但其余各站目标函数走势并未出现此现象,说明 PSO 算法在率定中总体表现良好,值得推广。37 号子流域目标函数走势图中,模型在第 5 次迭代以后取值完全稳定,表明该子流域出口站点的不确定性相对较小, $P$  因子、 $R$  因子分别为 0.92 和 1.49,也说明这一问题,这与该站点是距离流域出口最近的水文站点有关,同时在该站点率定前,影响其出口径流量的中、上游大部分子流域都已完成率定,占其较大比例的径流量已固定,不再随该出口站的率定而发生波动有一定关系。

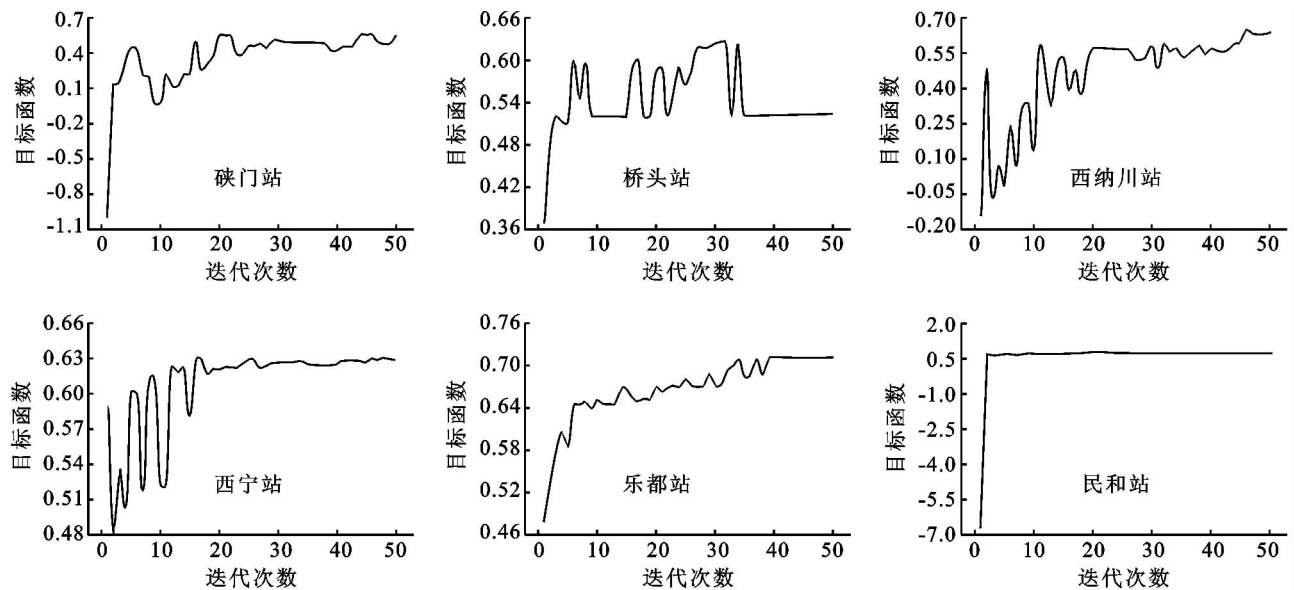


图 2 各子流域出口站点目标函数走势

#### 4 模型率定、验证结果与分析

模型率定中选择 SWAT-CUP 敏感性分析排序中前 13 位参数进行模型率定。各子流域水文站点基流  $\alpha$  因子的取值,根据模型的 bflow.exe 模块分析各子流域出口水文站点 15 a 日径流数据计算所得。气温递减率(Tlaps)和降水递减率(Plaps)根据上文分析结果,不参与模型率定;其余率定参数设置根据:替换处理参数取值范围为 SWAT 定义取值范围,乘处理参数取值范围参考 Griensven 等<sup>[17]</sup>的研究取  $\pm 0.5$ 。采用 SWAT-CUP 程序的 PSO(粒子群优化算法)进行全局随机寻优率定。经统计在主频 2.53 GHz,内存 2 GB 配置的 XP 系统上,设置算法迭代次数为 50,粒子群大小为  $10^{[18-19]}$  时,平均单站点率定用时 18.5 h,即平均单次模拟用时 2.2 min,SWAT 软

件单次模拟用时 3.5 min,约为 SWAT-CUP 程序用时的 1.5 倍。

模型率定、验证结果的精度评价,采用确定系数  $R^2$  和效率系数 NS(Nash-Sutcliffe)。一般来说,模型日时间尺度效率系数 NS 在 0.36 以上说明模型可以满足流域模拟要求<sup>[20]</sup>。6 个子流域出口水文站点日率定、验证结果如表 5 所示。据表 5,首先,所有站点日率定结果的确定系数均在 0.6 以上,效率系数也均在 0.6 以上,率定结果较好。模型参数敏感性分析为模型率定奠定了良好的基础,提高了模型率定效率,降低了模型的不确定性,节省了模型率定时间;其次,流域上游各站点的率定效果总体较下游各站点稍差,表明在相同迭代次数下,模型对于径流量较大的子流域率定效果较好,而对于流量较小的子流域率定效果稍差;第三,对比不同站点模型不确定性和率定结果

发现,1 号、2 号和 8 号与其它站点相比,模型不确定性较大,模拟结果有待进一步提高。后续研究可以通过适当增加模型率定迭代次数和对敏感参数的调整来降低模型的不确定性,进一步优化流域上游各站点的率定结果。

表 5 子流域出口站点率定结果和验证结果

	变量名	1	2	8	15	30	37
率定期	确定系数 $R^2$	0.61	0.69	0.66	0.65	0.78	0.79
	效率系数 NS	0.60	0.62	0.65	0.65	0.76	0.79
验证期	确定系数 $R^2$	0.60	0.62	0.65	0.68	0.71	
	效率系数 NS	0.42	0.48	0.46	0.65	0.62	

表 5 还说明,模型验证期结果较率定期稍差,但各站确定系数均达到 0.6 以上,效率系数在 0.4 以上,15 号、30 号均达到 0.6 以上,日模拟结果可以进一步用于流域水文模拟相关研究,如泥沙模拟和非点源污染模拟等。对于验证期结果较差的 1 号、2 号和 8 号子流域,分析各子流域率定期目标函数走势图发现,这 3 个子流域的目标函数在率定期预设迭代次数中最终并未完全稳定。流域下游各水文站点的验证结果较上游站点好。分析模型不确定性结果发现:1 号、2 号和 8 号站点率定结果存在较大不确定性,是导致各站点验证结果较差的主要原因,说明模型率定结果的不确定性对模型验证结果精度有较大的影响。37 号子流域出口站点水文观测数据只有 1986 年和 1987 年 2 a,故未参与模型验证。

综上,湟水流域模型的不确定性对模型验证期的精度影响较大,为确保模型在验证期能够取得较好结果,必须尽量降低各水文站点率定期的不确定性。

5 结论与讨论

本文通过对湟水流域模型敏感性分析、不确定性分析、参数率定与模型验证,证明 SWAT 模型可以对湟水流域日尺度径流过程进行建模。经计算,模型率定期平均效率系数和平均确定系数均在 0.6 以上;验证期平均效率系数在 0.4 以上,干流下游主要水文站在 0.6 以上,确定系数各站均保持在 0.6 以上。说明 SWAT 模型的湟水流域日尺度模拟可以满足应用要求,为湟水流域今后日尺度的相关水文研究(如泥沙模拟,非点源污染模拟等)奠定了基础。基于 SWAT-CUP 程序的模型率定中,程序单次模拟用时 2.2 min,SWAT 软件单次用时 3.5 min,后者约为前者的 1.5 倍。敏感性分析是降低水文模型不确定性、实现模型高效率率定的有效手段。SWAT 与 SWAT-CUP 的模型敏感性评价指标并不相同,相比 SWAT 的“均方值”,SWAT-CUP 的“ $t$  检验”属于部分敏感度,模

型率定中我们可以借鉴 SWAT 的敏感性分析结果,对 SWAT-CUP 的敏感性分析结果进行必要的调整。

模型不确定性作为分布式水文模型的客观存在,在模型率定中可以作为一个重要的率定结果评价指标,良好的模型不确定性是模型分析和模型验证期结果精度的重要保障;模型率定中,相同迭代次数下,流域上游水文站点率定结果较下游稍差。在今后的模型率定中,可通过适当增大流域上游站点的迭代次数,来降低模型不确定性,提高模型率定和验证结果的精度。湟水流域有季节性冻土分布,而 SWAT 模型的水文过程不能对冻土进行处理,但由于流域内冻土面积较小,不会对流域的水文过程产生大的影响,故本文采用 SWAT 模型进行流域建模。

**致谢:**真诚感谢中国科学院地理科学与资源研究所“陆地水循环及地表过程重点实验室”王中根副研究员对本论文提出的宝贵修改意见!

参考文献:

[1] Abbaspour K C, Johnson A, van Genuchten M T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure[J]. Vadose Zone Journal,2004,4(3):1340-1352.

[2] 左其亨,王中根. 现代水文学[M]. 郑州:2 版. 黄河水利出版社,2006.

[3] 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,2010,33(1):8-15.

[4] 王中根,朱新军,夏军,等. 海河流域分布式 SWAT 模型的构建[J]. 地理科学进展,2008,27(4):1-6.

[5] Mansour T, Saeid M, Seyyed A A, et al. Uncertainty analysis in sediment load modeling using ANN and SWAT model[J]. Water Resour Manage,2010,24(9):1747-1761.

[6] Yang J, Abbaspour K C, Reichert P, et al. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to Chaohe Basin in China In review[J]. Journal of Hydrology,2008,358(1/2):1-23.

[7] 姚允龙,吕宪国,王蕾. 流域分布式水文模型 SWAT 空间输入数据的不确定性研究[J]. 农业系统科学与综合研究,2009,25(4):470-475.

[8] 陈德胜,丁爱中,潘成忠,等. 基于 SWAT 模型的泮河流域径流模拟不确定性分析[EB/OL]. 中国科技论文在线. (2011-03-14)[2011-6-19]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/201103-581>.

[9] 薛晨. 基于 SWAT 模型的产流产沙模拟与模型参数不确定性分析[D]. 北京:华北电力大学(北京),2011.

[10] 陈强,苟思,秦大庸,等. 一种高效的 SWAT 模型参数自动率定方法[J]. 水利学报,2010,41(1):113-119.

状况,二者是统一的。但从根系对水分、养分的吸收面积和效率来看,无疑以中根、小根和细根的作用更大,特别是细根生长和周转速度,对林木碳分配和养分循环具有重要作用,但由于这部分根系占有的比例很小(仅占根系总量的 10%),用总根量来表达林木地上部分与地下根系的关系很容易掩盖它们之间的差异,应深入研究细根周转、根际营养动态变化、土壤酶活性与根系生物量之间的关系,可能会对揭示不同优势等级油松单木的生产力和稳定性及健康程度有帮助。

参考文献:

[1] Bilbrough C J, Caldwell M M. Exploitation of spring-time ephemeral N pulses by six great basin plant species [J]. *Ecoology*,1997,78(1):231-243.

[2] 张小全,吴可红,Dieter Murach. 树木细根生产与周转研究方法评述[J]. *生态学报*,2000,20(5):875-883.

[3] 刘建军. 林木根系生态研究综述[J]. *西北林学院学报*,1998,13(3):74-78.

[4] 单建平,陶大立,王淼,等. 长白山阔叶红松林细根周转的研究[J]. *应用生态学报*,1993,4(3):241-245.

[5] 司建华,冯起,李建林,等. 荒漠河岸林胡杨吸水根系空间分布特征[J]. *生态学杂志*,2007,26(1):1-4.

[6] Waring R H, Schlesinger W H. *Forest Ecosystems*;

*Concepts and Management*[M]. Academic Press, USA, 1985.

[7] Mackenzie A, Ball A S, Virdee S R. 生态学[M]. 孙儒泳,李庆芬,牛翠娟,等,译. 北京:科学出版社,2000.

[8] Brenda B C, Robert B J. Plant competition underground [J]. *Annual Reviews of Ecology and Systematics*,1997,28(1):545-570.

[9] 李勇,吴钦孝,朱显谟,等. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究. I :油松人工林根系对土壤抗冲性的增强效应[J]. *水土保持学报*,1990,4(1):1-5.

[10] 刘春江. 北京西山地区人工油松、栓皮栎混交林生物量和营养元素循环的研究[J]. *北京林业大学学报*,1987,9(1):1-9.

[11] 陈灵芝. 北京西山油松林群落学特性及生物量的研究 [J]. *植物生态学与地植物学丛刊*,1984,8(3):193-181.

[12] 田连恕. 贺兰山东坡植被[M]. 呼和浩特:内蒙古大学出版社,1996.

[13] 吴以德. 宁夏山地林区的土壤类型[J]. *宁夏农业科技*,1982(5):11-17.

[14] Upchurch D R, Taylor H M. Tools for Studying Rhizosphere Dynamics [C] // *Rhizosphere Dynamics*. Box J E, Hammond L C. Boulder: West view Press,1990.

[15] Kodrik M. Distribution of root biomass and length in *Picea abies* ecosystem under different immission regimes[J]. *Plant&Soil*,1994,167(1):173-179.



(上接第 88 页)

[11] Web Page Eawag Aquatic Research. <http://www.eawag.ch/forschung/siam/software/swat/index>.

[12] Fontaine T A, Gruickshank T S, Arnold J G, et al. Development of a snowfall—snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT)[J]. *Journal of Hydrology*,2002,262(1/4):209-223.

[13] 余建英,何旭宏. 数据统计分析与 SPSS 应用[M]. 1 版. 北京:人民邮电出版社,2004.

[14] Arnold J G, Kiniry J R, Srinivasan R, et al. Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation Version 2009[EB/OL]. Texas A&M University System College station, Texas 77843-2118,2011,365.

[15] Schmalz B, Fohrer N. Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model[J]. *Advances in Geosciences*,2009,21:91-98.

[16] Abbaspour K C. SWAT-CUP2 SWAT Calibration and Uncertainty Programs Version 2[R]. Eawag: Swiss

Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2011.

[17] Griensven A V, Meixner T, Grunwald S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models[J]. *Journal of Hydrology*,2006,324(1/4):10-23.

[18] Abbaspour K C, Yang J, Maximova I, et al. Modeling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT[J]. *Journal of Hydrology*,2007,333(2/4):413-430.

[19] Zhang X, Srinivasan R, Zhao K, et al. Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model [J]. *Hydrological Processes*,2008,23(3):430-441.

[20] Motovilov Y G, Gottschalk L, Engeland K, et al. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*,1999,98/99:257-277.