

# SWAT 模型在密赛流域的应用与比较研究

刘 晋<sup>1</sup>, 魏新平<sup>1</sup>, 王 军<sup>2</sup>

(1.水利部水文局, 北京 100053; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘 要:**为对比分布式水文模型 SWAT 与典型集总式水文模型新安江模型的径流模拟能力,以钱塘江支流密赛流域为实验流域,以 CRU 气象数据集为气象输入资料,分别进行 SWAT 日、月径流模拟与验证,并与新安江模型模拟成果进行对比。结果显示 SWAT 模型在实验流域的月尺度径流模拟中更具优势,也表明 SWAT 模型在我国径流模拟中具有良好的适用性。

**关键词:** SWAT 模型; 新安江模型; CRU 数据集

中图分类号: P334.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2014)06-0049-06

## 1 引言

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是一种具有很强物理机制的半分布式流域水文模型,最早由美国农业部门开发,当时主要用于农业规划<sup>[1]</sup>。经过多年发展,它已集成了多个功能模块,并在世界范围内得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。目前,SWAT 模型的应用主要集中在径流模拟、产水/产沙模拟、非点源污染和气候变化与土地利用情景下的水文响应等诸多方面<sup>[3-6]</sup>,出现了一大批成果。SWAT 模型之所以得到如此成功的运用,主要得益于其以 HRU(水文响应单元)为基本单元,较好地考虑了水文气象和下垫面要素的时空不均匀性。然而,若没有能够充分反映空间变异性的资料作为支撑,则 SWAT 模型应用必然受到限制。在 SWAT 所用的基础资料中,地形、土地利用和土壤均可从公用平台上免费下载,而高精度的实测气象数据多为保密数据,获取相对较难。针对这种现象,本文避开气象数据传统获取途径,以大尺度 CRU 气象数据集为基本气象数据,开展 SWAT 模型建模及验证研究,检验该资料条件下 SWAT 模型的径流模拟能力,并与新安江模型进行对比,最后以钱塘江支流密赛流域为实验流域,开展实例研究。

## 2 模型简介

### 2.1 SWAT 模型

SWAT 模型作为一个具有很强物理机制的半分布式水文模型,其最具特色的是地表径流计算方法——SCS 曲线法。该方法考虑了土壤及土地利用空间分布对降雨产流的影响,具有明确的物理意义,其基本原理简述如下<sup>[7]</sup>。

SCS 曲线法的计算公式为:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (1)$$

式中:  $Q_{surf}$  为径流量(mm);  $R_{day}$  为降雨量(mm);  $I_a$  为初损量(mm),即产生径流之前的降雨损失量;  $S$  为持水量(mm),它是后损的上限,定义为:

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2)$$

式中:  $CN$  为当日的曲线数。初损值  $I_a$  通常近似等于  $0.2S$ , 将其代入公式(1)可得:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (3)$$

只有当  $R_{day} > I_a$  时,才会产生地面径流。图 1 为不同曲线数下的降雨径流关系示意图。

收稿日期: 2014-04-07

基金项目: 基于贝叶斯理论的洪水实时预报调度关键技术研究(51109054)

作者简介: 刘晋 (1982-), 男, 山西晋城人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事水文水资源方面管理、研究。 E-mail: liujin@mwr.gov.cn

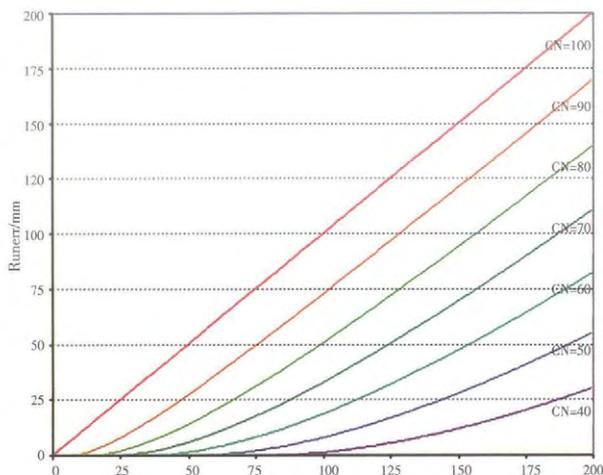


图1 不同曲线数下的降雨径流关系  
Fig.1 The P-R relationship under different curve numbers

### 2.2 新安江模型

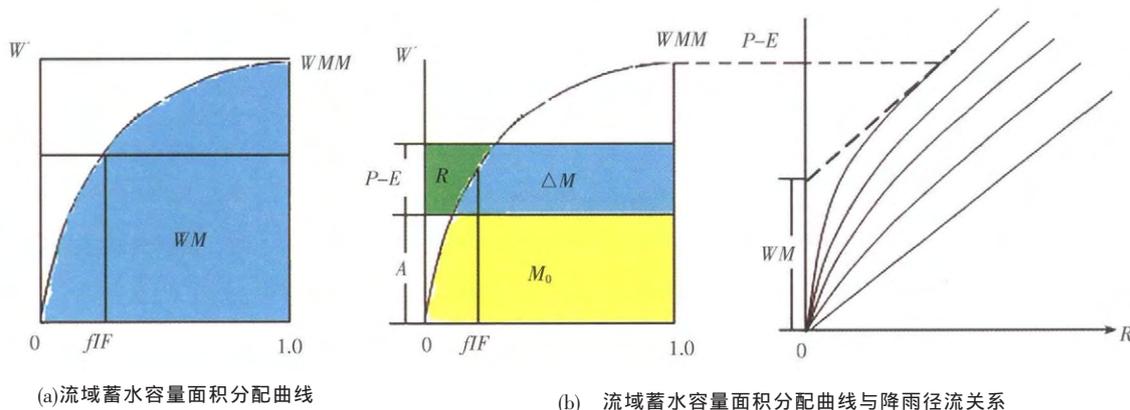
新安江模型是一个建立在蓄满产流机制上的概念性模型,物理机制不如 SWAT 模型明确,其最具代表性的特色是采用蓄水容量曲线考虑产流在空间上的分布不均匀性。其基本原理如下<sup>[8]</sup>:

流域蓄水容量面积分配曲线采用抛物线型,假定不透水面积  $IM=0$ ,其线型为:

$$\frac{f}{F} = 1 - \left(-\frac{W'}{WMM}\right)^B \quad (4)$$

式中: $f$  为产流面积 ( $\text{km}^2$ ); $F$  为全流域面积 ( $\text{km}^2$ ); $W'$  为流域单点的蓄水量 ( $\text{mm}$ ); $WMM$  为流域单点最大蓄水量( $\text{mm}$ ); $B$  为蓄水容量面积曲线的指数。

流域蓄水容量面积分配曲线及其与降雨径流相互转换关系如图 2 所示。



(a)流域蓄水容量面积分配曲线

(b) 流域蓄水容量面积分配曲线与降雨径流关系

图 2 流域蓄水容量面积分配曲线与降雨径流间关系图  
Fig.2 The area distribution of the watershed storage capacity and P-R relationship

总径流量的计算公式为:

$$R = \int_A^{P-E+A} \frac{f}{F} dW = \int_A^{P-E+A} \left[1 - \left(1 - \frac{W'}{WMM}\right)^B\right] dW \quad (5)$$

若  $P-E+A < WMM$ , 即局部产流时:

$$R = P-E - (WM - W_0) + WM \times \left(1 - \frac{P-E+A}{WMM}\right)^{(1+B)} \quad (6)$$

若  $P-E+A \geq WMM$ , 即全流域产流时:

$$R = P-E - (WM - W_0) \quad (7)$$

式中: $W_0$  为流域初始土壤蓄水( $\text{mm}$ )量; $WM$  为流域平均最大蓄水容量( $\text{mm}$ ); $R$  为总径流量( $\text{mm}$ );其余符号与上同。

### 2.3 两模型对比

对比 SWAT 模型与新安江该模型,其主要异同点包括: ①从反映水流运动能力的角度,SWAT 为分布式,而新安江为集总式; ②从基本计算单元的角度,SWAT 是采用同时考虑地形、土壤和土地利用的

HRU,而新安江采用集总式或是基于地形划分的自然子流域; ③从模拟时间尺度角度,SWAT 为日、月尺度,而新安江为小时、日尺度; ④从模型参数角度,SWAT 模型参数远远多于新安江模型参数; ⑤从资料需求角度,SWAT 所需要的资料类型和数量均较大。

### 3 实例

以密赛流域为研究区,分别构建 SWAT 和新安江模型,开展径流模拟对比研究。

#### 3.1 研究区域

密赛流域位于浙江省衢州市开化县境内(东经  $118.0^\circ \sim 119.0^\circ$ , 北纬  $29.10^\circ \sim 30.0^\circ$ ),流域面积为  $797\text{km}^2$ 。其主干流马金溪全长  $100.3\text{km}$ ,河道比降  $5.92\%$ ,河道弯曲,坡陡流急滩多,流域地势总是自西北向东南降低。流域多年平均雨量约  $1800\text{mm}$ 左右,年径流系数  $0.75$ 左右,属于典型的湿润地区。

流域内有水文站点 1 个、雨量站点 6 个, 平均 130km<sup>2</sup> 就有一个雨量站, 站点密度较高, 能较好的反映降雨空间分布。研究区区域水系及水文测站分布如图 3 所示。研究区山高林茂, 素有中国“亚马逊雨林”和“浙西林海”之称, 森林覆盖率达 80.4%, 土地利用如图 4 所示。

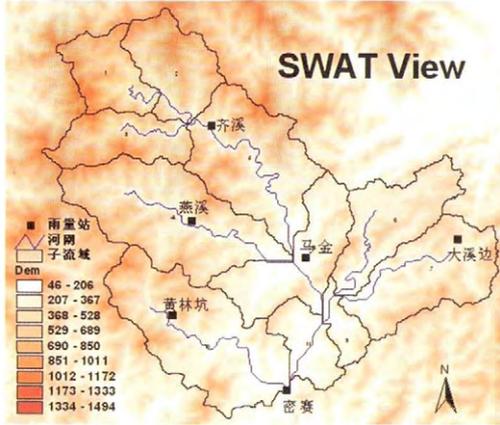


图 3 密赛流域 DEM、子流域及雨量站点  
Fig.3 DEM map, subbasins and rainfall of the the Misai basin

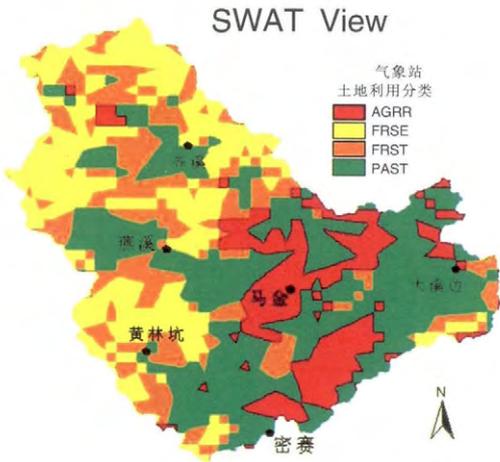


图 4 土地利用图及气象站点分布  
Fig.4 Land use description and location of the meteorological stations in the Misai basin

### 3.2 资料处理

#### 3.2.1 资料来源

SWAT 模型构建主要需要三大类资料, 即地形资料、水文气象资料、土壤类型与土地利用资料。本文采用由 NASA SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) 提供的 3"×3"的 DEM 数据为地形资料; 采用英国 East Anglia 大学的 Climatic Research Unit (CRU) 提供的 10"×10"的栅格气象资料和测站实测水文资料; 采用美国马里兰大学(UMD)网站平台提供的 30"×30"(相当于 1km<sup>2</sup> 尺度) 植被栅格资料<sup>[9]</sup>, 采用美国国家航空和宇宙

航行局(NASA) 哥世得航天中心(GSFC)全球土地资料同化系统(GLDAS)提供 5'×5'(相当于 1km<sup>2</sup> 尺度)的全球土壤栅格资料<sup>[10]</sup>。

#### 3.2.2 水文气象

水文资料主要包括研究区内 1 个水文站 (密赛)和 6 个雨量站(齐溪、马金、燕溪、大溪边、黄林坑和密赛)的历年逐日降雨、蒸发和流量资料, 资料年限 1976~1989 年。其中 1979 年齐溪站 1~8 月份的降雨资料缺测, 本研究通过其余站点实测资料对其进行插补延长。

气象资料是指英国 East Anglia 大学的 Climatic Research Unit(CRU)提供的 10"×10"的栅格气象资料, 通过整合已有的若干个知名数据库, 重建了一套覆盖完整、高分辨率、且无缺测的月平均地表气候要素数据集, 其序列长度为 1961~1990 年。其中包括: 平均温度、降水、相对湿度、风速、月平均温差等 8 个数据库。闻新宇等人认为<sup>[11]</sup>: CRU 高分辨率格点资料有较高的可信度, 比较完整地描述了中国 20 世纪气候变化的基本特征。因此, 笔者选择此套数据集, 截取相应的研究区域的气象资料, 与水文站点的空间位置做叠加处理, 得到各水文站点的气象要素值, 输入到模型数据库, 建立密赛流域的气象数据库。

#### 3.2.3 土地利用及土壤

(1)土地利用。土地利用图(见图 4)使用的分类编码与 SWAT 的编码系统不一致, 对于一些无法对应的土地利用分类, 需要对其进行归类整合, 笔者将部分相近或相似的土地利用分类归类为模型中所能识别的代码(见表 1), 并输入到模型数据库中。其中, 落叶阔叶林在 SWAT 中有其对应的编码(FRSD)但因其面积较小, 只占总面积的 1%, 因此将其归类为 FRST。

表1 土地利用重分类表  
Table1 The results of land use type reclassification

UMD 编码	土地利 用类型	模型中 的代码	UMD 编码	土地利 用类型	模型中 的代码
1	常绿针状叶林	FRSE	7	林草混和地	PAST
4	落叶阔叶林	FRST	10	草地	PAST
5	混合林	FRST	11	农田	ARGG
6	林地	FRST			

(2)土壤。根据各栅格内砂性土、粘性土和粉粒土的比例, 制作出土壤图, 同时赋予相同栅格同一个编码, 并将数据和编码输入到模型的数据库当中 (见表 2)。土壤类型的土壤物理属性包括: 土壤密度、有效田间持水量、饱和水利传导度等, 则通过美国华盛顿州立大学开发的土壤水特性软件 SPAW6.1 (Soil-Plant-

Air-Water) 中的 SWCT (soil water characteristics for texture) 模块计算而来,该软件只需要输入土壤的粒径组成,便可计算得到其他的土壤物理属性数据。

表2 土壤类型重分类表  
Table2 The results of soil type reclassification

代码	土壤类型	模型中的代码
4270	水稻土	KaiHua

### 3.2.4 计算单元划分

为方便进行实测与模拟径流的对比分析和模型验证,在模型中将密赛水文站设为流域出口。在此基础上,基于地形、土地利用和土壤数据将整个流域划分为 11 个子流域和 30 个水文响应单元,子流域面积范围为 10.9~62.9km<sup>2</sup>。

### 3.3 模型构建及率定

SWAT 模型参数较多,经参数率定最终确定模型主要参数见表 3。

### 3.4 结果分析

#### 3.4.1 评价指标

模拟结果引用 Nash Sutcliffe 模型效率系数( $E_{ns}$ )<sup>[12]</sup>和线性回归系数( $R^2$ )来评估模型在校准和验证过程中的模拟效果。

以  $E_{ns}$  衡量模拟值与实测值的拟合度,其公式为:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avg})^2} \quad (8)$$

式中: $Q_m$  为观测值; $Q_p$  为模拟值; $Q_{avg}$  为观测值平均值; $n$  为观测的次数。

#### 3.4.2 模型率定与检验

本文参数率定期为 1976~1984 年,模型验证期为 1985~1989 年。率定期模拟结果  $E=0.78, R^2=0.91$ ,验证期模拟结果  $E=0.73, R^2=0.91$ 。具体成果见表 4。

由表 4 可以看出,①日径流过程模拟结果表明新安江模型模拟精度较高,但从 SWAT 日平均径流模拟的线性回归系数较高表明 SWAT 模型模拟的水文过

表3 主要参数成果表  
Table3 The major parameters

名称	含义	数值	名称	含义	数值
CN <sub>2</sub>	径流曲线数	8	GW_REVAP	地下水蒸发系数	0.195
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.001	GWQMN	回归流产生所需地下水深阈值	1000mm
LAT_TIME	侧向流移动时间	2.7D	SURLAG	地表径流延迟系数	1D
ALPHA_BF	基流 $\alpha$ 因子	0.01	REVAPMN	浅层含水层中再蒸发或下渗的地下水深度阈值	2mm
SOL_AWC	土壤有效含水率	0.05			

表4 模型模拟结果特征值统计对比表  
Table5 The results from XAJ Model and SWAT Model

起始时间	实测径流深/mm	日模拟径流深相对误差/%		月模拟径流深相对误差/%		日模拟径流深相对误差/%			相关系数		确定性系数	
		SWAT	SWAT	SWAT	SWAT	日	月	日	日	月	日	月
1976	1303	12.4	2.3	4.78	0.93	0.98	0.82					0.92
1977	1359.2	9.5	1.3	5.44	0.93	0.98	0.81	0.86				0.93
1978	658.1	15.9	5.8	-6.24	0.89	0.99	0.72	0.94				0.91
1979	741.1	24.5	19.4	9.37	0.81	0.94	0.61					0.60
1980	1222.9	10.8	4.4	6.56	0.90	0.98	0.76	0.88				0.88
1981	1039.8	14.9	9.1	5.41	0.88	0.90	0.68	0.85				0.66
1982	1052.6	7.2	1.6	-2.3	0.87	0.96	0.73	0.92				0.86
1983	1886	6.0	-2.7	9.22	0.93	0.98	0.85	0.91				0.94
1984	1082.2	12.5	5.3	-2.4	0.88	0.96	0.71	0.91				0.85
1985	936.1	18.3	8.6	-0.49	0.91	0.94	0.51	0.91				0.72
1986	799.1	20.7	11.3	2.49	0.88	0.97	0.66	0.92				0.82
1987	1353.8	12.7	6.0	2.72	0.92	0.98	0.79	0.88				0.89
1988	1110.9	1.9	-0.2	8.32	0.88	0.94	0.69	0.90				0.80
1989	1523.5	14.7	9.8	6.23	0.92	0.95	0.76	0.89				0.75
均值	1147.7	13.0	6.3	3.5	0.90	0.96	0.72					0.82

注:SWAT 为 SWAT 模型;X 为新安江模型;径流深相对误差的均值指其绝对值的均值;新安江模型 76a 蒸发资料、79a 降雨资料缺失未模拟。

程与实际拟合较好,如图 5 所示;②日、月径流过程模拟结果表明 SWAT 模型在月径流过程模拟中精度较高,如图 6 所示;③月径流过程模拟结果表明 SWAT 模型与新安江模型精度相当且均较高,其平均相对误差为 3.5%,如图 7 所示。需要说明的是,本次研究采用的新安江模型是以日为时间尺度,并未建立月尺度新安江模型,文中月径流模拟成果为相应月份的日径流模拟成果累加而得。

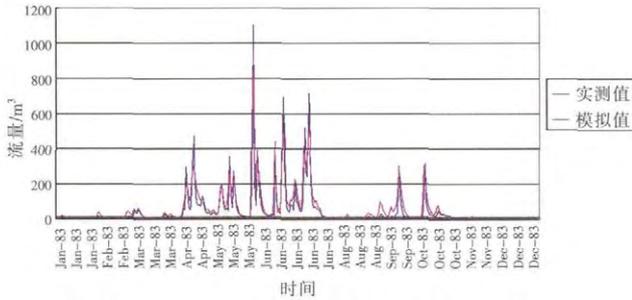


图 5 1983 年日平均流量模拟结果曲线图  
Fig.5 The observed and simulated daily flow for the Misai basin in 1983.

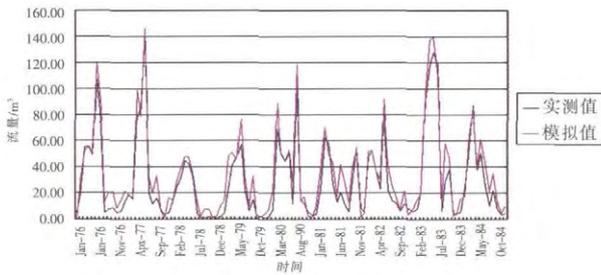


图 6 1976~1984 年月平均流量模拟结果曲线图  
Fig.6 The observed and simulated monthly flow for the Misai basin from 1976 to 1984.

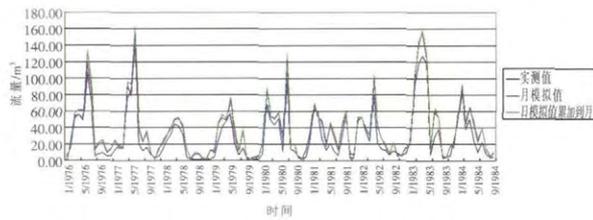


图 7 实测流量,日平均流量累加及月平均流量模拟结果对比图  
Fig.7 Comparison between the observed runoff, simulated monthly runoff and cumulated daily runoff for the Misai basin from 1976 to 1984

### 3.4.3 分析

造成 SWAT 模型模拟日平均径流结果较差的原因如下:

(1)基础资料精度不高。主要包括:①土壤数据和气象数据均从网上下载,其空间分辨率较低,无法充分反映土壤及气象空间分布不均匀性;②近年来人类活动加剧,土地利用和下垫面条件逐年发生变化,而模型使用土地利用数据无法反映实际情况。

(2)枯水期流量模拟值偏低。分析其原因可能包括:①基流  $\alpha$  系数的影响;②河道汇流模拟偏差较大,高估了水量损失;③流域取水水量不明,未能获取流域内两座水库取水资料。

## 4 结论与展望

SWAT 模型重要特色之一是采用 SCS 曲线法进行产流计算,其产流过程类似于蓄满产流<sup>[13]</sup>。本次将其与同采用蓄满产流的经典水文模型新安江模型进行对比研究,以 CRU 气象数据集为气象输入资料,以密赛流域为研究区域,构建、率定和检验了月、日时间尺度的 SWAT 模型。研究表明,SWAT 模型表现出了较好的月径流模拟能力,但由于受到气象、土地利用等资料精度的影响,其日径流模拟能力受到制约。

本文主要特色是采用时空分辨率较低的 CRU 气象数据集构建 SWAT 模型。针对研究成果,从基础资料的角度提出 3 点展望:①提高基础资料精度。在资料收集方面,优先选择能够充分反映测量要素时空变异性的数据,如站点稠密气象站点历年实测资料、当地国土部门实测的土地利用和土壤资料(最好有不同年份)等;②开展多元数据同化。针对多来源资料,开展资料同化研究,充分利用资料信息,以提高模型模拟精度;③开展时空降尺度。若收集到的资料时空分辨率较低,则需要对资料进行时空降尺度,与模型所采用的时间与空间尺度匹配,进而提高模型精度。

### 参考文献:

[1] 王中根,刘昌明,左其亭,等. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展, 2002,21(5):430-439. (WANG Zhonggen, LIU Changming, ZUO Qiting, et al. Methods of constructing distributed hydrological model based on DEM [J]. Progress in Geography, 2002,21(5):430-439. (in Chinese))

[2] 梁犁丽,汪党献,王芳,等. 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. (LIANG Lili, WANG Dangxian, WANG Fang, et al. Discussion on SWAT model and its application [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007,5(2):125-131. (in Chinese))

[3] 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, 2006,5(9):105-111. (ZHU Xinjun, WANG Zhonggen, LI Jianxin, et al. Applications of SWAT model in Zhang Wei River

- basin [J]. *Progress in Geography*, 2006,5(9):105-111. (in Chinese)
- [4] 张雪松,郝芳华,杨志峰,等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. *水土保持研究*, 2003,(12):38-42. (ZHANG Xuesong, HAO Fanghua, YANG Zhifeng, et al. Runoff and sediment yield modeling in meso-scale watershed based on SWAT model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003,(12):38-42. (in Chinese))
- [5] 刘薇. 基于 SWAT 模型的非点源污染模拟研究及应用 [D]. 河海大学, 2008:46-53. (LIU Wei. Non-point Source Pollution Simulation Research and Application Based on SWAT [D]. Hohai University, 2008:46-53. (in Chinese))
- [6] 田彦杰. 基于 SWAT 的流域下垫面变化的水文响应研究 [D]. 天津理工大学, 2012:53-79. (TIAN Jie. Study on Hydrological Response to Basin Underlying Surface Change Based on SWAT [D]. Tianjin University of Technology, 2012:53-79. (in Chinese))
- [7] 王中根,刘昌明. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. *地理科学进展*, 2003,22 (1):79-86. (WANG Zhonggen, LIU Changming. The theory of SWAT model and its application in Heihe basin [J]. *Progress in Geography*, 2003,22(1):79-86. (in Chinese))
- [8] 包为民. 水文预报(第四版)[M]. 中国水利水电出版社, 2009. (BAO Weimin. *Hydrology Forecast (the fourth version)* [M]. China WaterPower Press, 2009. (in Chinese))
- [9] UMD 1km global land cover [EB/OL]. <http://www.geog.umd.edu/landcover/1km-map.html>
- [10] GLDAS globe soils dataset of reynolds [EB/OL]. <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/cdroms/reynolds/reynolds/reynolds.htm>, 2005
- [11] 闻新宇,王绍武,朱锦红,等. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化[J]. *大气科学*, 2006,30(5):854-904. (WEN Xinyu, WANG Shaowu, ZHU Jinhong, et al. An overview of China climate change over the 20th century using UK UEA/ CRU high resolution grid data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006,30(5):854-904. (in Chinese))
- [12] Nash J E, Suttcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principle [J]. *Journal of Hydrology*, 1970,10(3):282-290
- [13] S.L. Neilsch, J.G. Arnold, J.R.Kiniry, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2000:93-94 [EB/OL].

### Application of SWAT Model in Misai Basin

LIU Jin<sup>1</sup>, WEI Xiping<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>

(1. Bureau of Hydrology, MWR, Beijing 100053, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** For making comparison between SWAT model and XAJ model, this paper built two type models, which adopted daily or monthly scale, respectively. Taking Misai Basin as example, SWAT model was calibrated and validated according to CRU data while XAJ model was calibrated and validated according to the observed data. The results indicate that SWAT model has advantage in monthly runoff simulation, and suit to simulate runoff in China.

**Key words:** SWAT model; XAJ model; CRU data

—————  
(上接第 44 页)

- [5] 孔祥元,郭际明,刘宗泉.大地测量学基础(第二版)[M]. 武汉:武汉大学出版社,2010. (KONG Xiangyuan, GUO Jiming, LIU Zongquan. *Foundation of Geodesy* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010. (in Chinese))
- [6] 中国水利百科全书编委会. 中国水利百科全书[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006. (Editorial Board of China's Water Conservancy Encyclopedia. *China's Water Conservancy Encyclopedia* [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2006. (in Chinese))
- [7] 徐菊华,姜本海,姚楚光. 长江中下游干流吴淞高程系统概论[J]. 人民长江, 2007,(10):86-88. (XU Juhua, JIANG Benhai, YAO Chuguang. Introduction to Wusong elevation system in middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Yangtze River*, 2007,(10):86-88. (in Chinese))

### Discussion on Height Datum of Water Level

SONG Zhengfeng

(Shanghai Hydrology Bureau, Shanghai 200232, China)

**Abstract:** This paper analyzed the current major problems in the water level height datum of hydrometric stations, explained how to use the base surface and control hydrometric station altitude, and effective way to achieve stability control water level height datum. It also gave the new technical measures in station examination.

**Key words:** water level; height datum; approximate elevation; stationary datum; base conversion; station examination