

# SWAT 模型在海拉尔河流域径流模拟中的应用研究

任娟慧<sup>1</sup>, 李卫平<sup>1</sup>, 任波<sup>2</sup>, 段浩浩<sup>1</sup>, 杨文焕<sup>1</sup>, 殷震育<sup>1</sup>

(1.内蒙古科技大学能源与环境学院,内蒙古 包头 014010;2.山西省水文水资源勘测局,山西 太原 030001)

**摘要:**以海拉尔河上游流域作为研究区域,基于 ArcGIS 构建 SWAT 分布式水文模型对流域水文过程进行模拟,通过对流域的基础数据整合,模型采用 1999~2003 年实测径流数据进行参数率定,将 2004~2010 年实测径流数据作为模型的验证期,对模型在海拉尔河上游的适用性进行研究。通过对月 and 年径流模拟值和实测值的比较,率定期和验证期的 Nash 系数  $E_{ns}$  和相关系数  $R^2$  分别在 0.861~0.873 和 0.877~0.899 之间。基于这两个评价标准可知:SWAT 模型在海拉尔河上游流域有良好的适用性,可以为该流域的水资源管理提供依据。

**关键词:**海拉尔河;SWAT 模型;径流模拟

中图分类号:TV121

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)02-0051-05

海拉尔河流域位于内蒙古自治区呼伦贝尔市西南部,大兴安岭西坡与内蒙古高原的东北边缘结合部,属于温带大陆性季风气候。从统计资料来看,近 50a 来,在自然和人为因素的共同作用下,海拉尔河流域的生态平衡受到破坏,生态环境不断恶化,生态功能日益减退,造成了草原严重退化、水域和湿地萎缩、土壤侵蚀严重等一系列生态环境问题。目前,该地已成为全国生态环境最脆弱、破坏最严重的地区之一<sup>[1]</sup>。SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tool)是由美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)Jeff Arnold 博士开发的一种分布式水文模型,它具有很强的物理基础,以其良好的集成了地理信息系统(GIS)、遥感技术(RS)、数字高程模型(DEM)等,可模拟预测不同气候、土地利用条件下径流变化等水文过程。因此,本文通过建立海拉尔河流域的分布式水文模型,以 GIS 技术为支撑,探讨流域的径流变化规律,为东北冻土区的水资源配置提供可靠依据<sup>[2-3]</sup>。

## 1 资料与方法

### 1.1 海拉尔河流域概况

海拉尔河发源于大兴安岭吉勒奇老山西麓,自东向西流至阿巴该图山附近。

地理位置为东经 117°43'~122°27', 北纬 47°38'~

50°16'。海拉尔河全长 708km,河宽约为 145m,流域面积约 540 万 km<sup>2</sup>。海拉尔河流域主要有库杜尔河、免渡河、伊敏河、莫尔格勒河等支流。海拉尔河流域的年平均气温约为 5℃,年平均降雨量约为 350mm,且降水集中在 6~9 月。本文研究的是海拉尔上游流域。

### 1.2 基础数据的整合

建立 SWAT 模型需要的基础数据包括空间数据和属性数据。空间数据包括数字高程图(DEM)、土地利用 GIS 图、土壤类型 GIS 图、水文站及气象站点的空间位置等。属性数据包括土壤类型数据、气象数据、实测水文气象数据等。

#### 1.2.1 DEM 高程图

本文采用的 DEM 数据是精度为 90m 的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)DEM 数据,该数据通过中国科学院国际科学数据服务平台下载。首先根据 Google Earth 的卫星地图估计海拉尔河流域的坐标范围,然后下载所需的 DEM 数据。由于 ArcSWAT 建模要求所有的输入数据具有平面坐标,因此在 ArcMap 中加载该数据后,对其进行投影转换,处理后的研究区域 DEM 数据如图 1 所示。

#### 1.2.2 土地利用 GIS 图

土地利用数据是在地理空间数据云服务平台上

收稿日期:2014-12-01

基金项目:国家自然科学基金(项目编号:41263010)

作者简介:任娟慧(1991-),女,山西大同人,硕士研究生,主要从事水资源利用与水环境保护。E-mail:chunyanxueyan@163.com

通讯作者:李卫平(1973-),男,陕西神木人,副教授,主要从事寒旱区湖泊水环境治理。E-mail:sjlwp@163.com

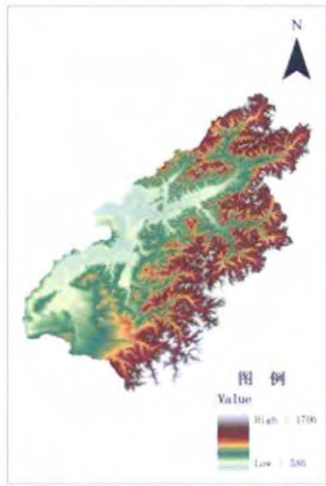


图1 研究区DEM高程图

Fig.1 DEM of the study area

下载的TM遥感影像,对其进行解译得到。SWAT模型中要求土地利用类型不超过10类,因此需要对原有的土地利用进行重分类,最后划分为:耕地、林地和草地等10类。建立landuse土地利用索引表,如表1所示,最后得到的土地利用图如图2所示。

表1 土地利用类型索引表

Table1 The indexes of the land use

VALUE	SNAME	名称
1	AGRL	耕地
2	PAST	草地
3	FRST	林地
4	UINS	公共用地
5	SWRN	沼泽地
6	URBN	城镇住宅用地
7	URLD	农村宅基地
8	WATR	水域
9	UTRN	交通用地
10	UIDU	工业用地



图2 土地利用图

Fig.2 The land use of the study area

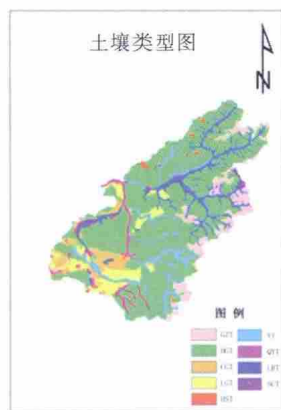


图3 土壤类型图

Fig.3 The soil type of the study area

### 1.2.3 土壤类型GIS图

土壤数据来源于联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(HASA)一起构建的世界协调土壤数据库(Harmonized World Soil Database(HWSD))。世界协调土壤数据库中的中国部分来源于1995年国家第二次土壤调查,是由南京土壤科学研究所编制的中国土壤图,土壤质地采用的是美制标准,因此,不需要进行粒径转换<sup>[4]</sup>。研究区域土壤类型GIS图是利用模型生成的流域边界作为Mask,对其进行切割得到,如图3所示。土壤类型索引表如表2所示。

表2 土壤类型索引表

Table2 The indexes of the soil type

VALUE	SNAME	名称
1	GZT	钙质土
2	HGT	黑钙土
3	CGT	粗骨土
4	LGT	栗钙土
5	HST	红砂土
6	YT	盐土
7	QYT	潜育土
8	LRT	淋溶土
9	SCT	始成土

### 1.3 属性数据库的建立

#### 1.3.1 土壤属性数据库的建立

文中对海拉尔河上游流域的径流进行模拟,因此,只需要考虑土壤的物理属性。SWAT模型中的土壤物理属性数据主要包括:土壤名称、土壤分层、土壤水文学分组、土壤层结构、有机碳含量、湿密度、饱和水力传导系数、有效持水量等,这些属性对水文响应单元的划分起着重要作用。

文中的土壤物理属性数据来源于HWSD世界土壤数据库,包括土壤名称、土壤分层、土壤质地、有机碳含量等。土壤水文学分组包括A、B、C、D四组,依据土壤最小下渗率得到。湿密度、饱和水力传导系数、有效持水量是利用SPA(Water-Plant-Atmosphere-Soil)软件计算得到<sup>[5]</sup>。

#### 1.3.2 气象数据库的建立

SWAT模型需要的气象数据包括:日降水量、日平均气温、日最高最低气温、日平均风速、相对湿度、日太阳辐射,将长序列的气象数据按照.txt格式整理后,导入SWATWeather中,得到模型所需的数据并保存<sup>[6]</sup>。由于研究区内没有气象站,因此选择附近的海拉尔和新巴尔虎右旗两个气象站作为天气发生器中的气象站,提供日最高最低气温、日降水量、日平均风速、相对

湿度、日太阳辐射等气象数据。其中,SWATWeather 中降雨相关参数可由 PcpSTAT 来计算,运用 Dew02 程序结合日最高最低气温及日相对湿度数据计算露点温度<sup>[7]</sup>。降水数据与径流数据来自于水文站实测。

## 2 结果与分析

### 2.1 SWAT 模型的建立

在 ArcSWAT 中加载研究区流域 DEM 高程图,设定集水面积阈值,模型自动划分河网,选定某水文站作为研究区的总出口,以某水文站上游作为研究区域。通过加载土壤类型数据、土地利用数据以及坡度来划分水文响应单元(HRU)。

水文响应单元划分完成后,在 Weather Data Definition 中加载整理好的海拉尔河、新巴尔虎右旗两个气象站点的位置、日降水量、日平均风速、日太阳辐射、露点温度等气象数据。根据收集的某水文站实测径流数据,本文模拟时间段为 1999~2010 年,以 1999 年作为模型预热期,设置模型所有参数,点击 Run SWAT,模型开始运行<sup>[6]</sup>。

### 2.2 参数敏感性分析及率定

由于 SWAT 模型中参数较多,无法对每个参数进行校准,因此,就需要我们对参数进行敏感性分析,筛选出对模拟结果影响较大的参数,对其进行校准。文中采用 1999 年~2010 年的实测径流数据,根据模型自带的敏感性分析方法(LH-OAT),对影响径流模拟结果的参数进行敏感性分析,由于海拉尔河补给水源以降水和融雪为主,因此,在确定影响径流的各个参数时,不仅要考虑降水和气温等因素的影响,还要考虑与融雪相关的参数。最终得到排在前 6 位的参数如表 3 所示。

表3 参数敏感性分析结果

Table3 The results of the parameter sensitivity analysis

VALUE	SNAME	名称
1	sol_awc	土壤可利用水量
2	esco	土壤蒸发补偿系数
3	gwqmn	浅层地下水径流系数
4	alpha_bf	基流分割系数
5	cn2	SCS 径流曲线系数
6	canmx	最大冠层蓄水量

参数的率定是先自动率定,然后再进行手动率定。运用 Auto Calibration and Uncertainty 对上述 6 个参数进行自动率定,然后再采用 Manual Calibration Helper 对自动率定结果进行调试,从而提高模拟精度<sup>[8]</sup>。参数率定结果如表 4 所示,表 5 为融雪参数率定结果。

表4 参数率定结果

Table4 The results of the parameter calibration

等级	参数	含义	取值
1	sol_awc	土壤可利用水量	1
2	esco	土壤蒸发补偿系数	0.01
3	gwqmn	浅层地下水径流系数	1000
4	alpha_bf	基流分割系数	0.01
5	cn2	SCS 径流曲线系数	53
6	canmx	最大冠层蓄水量	1

表5 融雪参数率定结果

Table5 The calibrated results of the snowmelt parameters

参数	含义	取值
sftmp	降雪温度	4.7
smtmp	融雪最低温度	4.9
smfmn	6月21日融雪因子	1
smfmx	12月21日融雪因子	6

### 2.3 模拟结果及分析

选用的 1999~2010 年的月、年径流数据,以 1999~2003 年实测径流数据进行参数率定,将 2004~2010 年数据作为模型的验证期。选用 Nash 系数  $E_{ns}$  和相关系数  $R^2$  对模拟结果进行评价,结果见表 6、7。

表6 模型率定与验证期月径流模拟结果评价

Table6 Evaluation of the simulation results of the monthly streamflow during calibration and validation periods

模拟时期	$R^2$	$E_{ns}$
率定期	0.897	0.869
验证期	0.877	0.861

表7 模型率定与验证期年径流模拟结果评价

Table7 Evaluation of the simulation results of the annual streamflow during calibration and validation periods

模拟时期	$R^2$	$E_{ns}$
率定期	0.899	0.873
验证期	0.885	0.866

Nash 系数  $E_{ns}$  是反映模拟值与实测值的拟合情况,其取值范围一般为 0~1,只有  $E_{ns}>0.5$  时,模拟结果可接受;相关系数  $R^2$  是反映模拟值与实测值的吻合情况,其取值范围为 0~1,只有  $R^2>0.5$  时,认为模拟结果可接受。其计算公式分别如下式(1)、(2)所示:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_s - P_m)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_s - Q_p)^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_s - Q_p)(P_m - P_p)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_s - Q_p)^2 \sum_{i=1}^n (P_m - P_p)^2} \quad (2)$$

式中： $Q_s$  为实测值； $P_m$  为模拟值； $Q_p$  为实测平均值； $P_p$  为模拟平均值。

从表 6、7 可以看到：模型的相关系数  $R^2$  较理想，在 0.877~0.899 之间，Nash 系数  $E_{ns}$  也相差不大，在 0.861~0.873 之间。率定期的验证结果优于验证期的结果，年径流模拟结果优于月径流模拟结果。总体而言，模型的模拟效果较好，能达到模型要求的精度，表明 SWAT 模型是适用于海拉尔河流域的月、年径流模拟的。

率定期与验证期实测及模拟月、年径流量如图 5、6、7、8 所示。

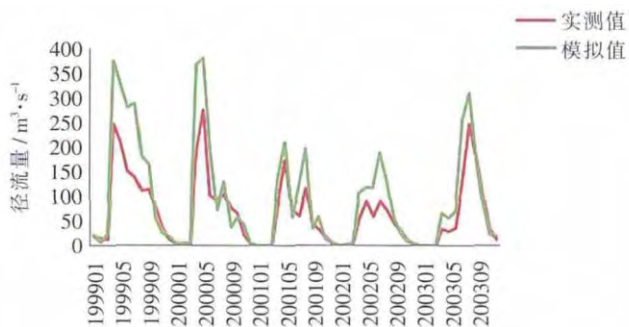


图 5 率定期月径流量模拟值与实测值对比  
Fig.5 Comparison between the simulated and observed monthly streamflow during calibration period

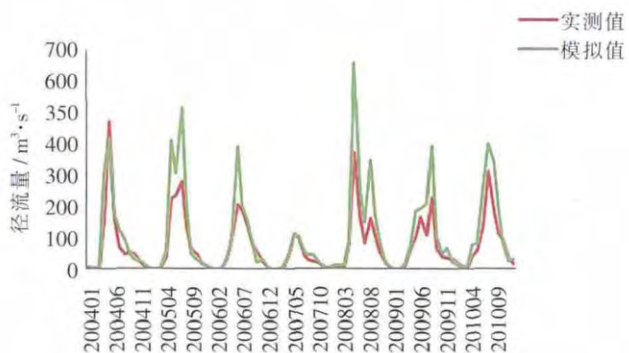


图 6 验证期月径流量模拟值与实测值对比  
Fig.6 Comparison between the simulated and observed monthly streamflow during validation period

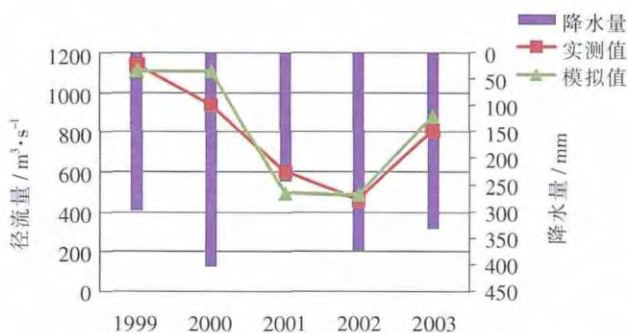


图 7 率定期年径流量模拟值与实测值对比  
Fig.7 Comparison between the simulated and observed annual streamflow during calibration period

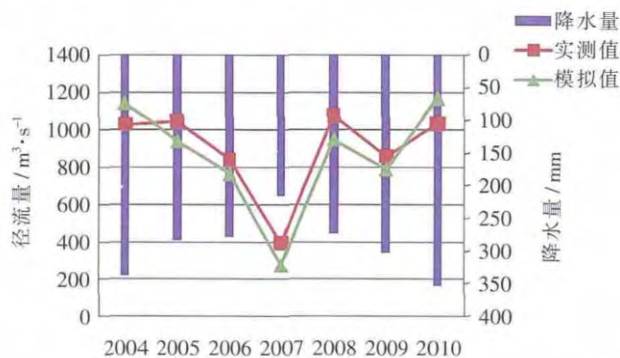


图 8 验证期年径流量模拟值与实测值对比  
Fig.8 Comparison between the simulated and observed annual streamflow during validation period

从图 5、6、7、8 可以看到：对于年径流来说，模型模拟结果与实测径流整体上吻合较好，但也有个别年份的模拟值与实测值存在较大差异，对于降雨量突增或突减的年份，径流模拟值与实测值相差较大，说明模型对于降雨量突变的情况适应性比较差。月径流模拟结果能较好的反映径流量的年内变化趋势，但较春季径流模拟结果而言，夏季和秋季径流模拟结果较好，冬季次之，可能是由于春季融雪和冬季积雪对径流产生影响，夏季和秋季降水较好。整体而言，年径流模拟结果能较好的反映研究流域年际变化趋势，月径流模拟结果能较好的反映流域年内变化趋势，模拟效果较好，在该流域有较好的适用性。

### 3 结论

根据以上分析，SWAT 模型在海拉尔河月径流模拟结果能较好的反映径流量的年内变化趋势，年径流模拟结果能较好的反映年际变化趋势。

由于海拉尔河位于北方寒旱区，积雪融雪会对径流产生影响，从而对该流域的水文模拟过程造成影响。再者，SWAT 模型的构建需要长序列的水文气象数据，数据不易获取、数据缺失的现象普遍存在，也会对模拟结果的精度造成影响。总体来说，根据 Nash 系数  $E_{ns}$  和相关系数  $R^2$  这两个评价标准的取值，表明 SWAT 模型在海拉尔河流域的适用性较好，模拟结果能较好的反映海拉尔河流域的年、月径流水文过程，可以为该流域的水资源管理提供依据。

参考文献：

[1] 路瑶. 海拉尔河流域土地利用/土地覆被变化及其驱动力研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2011. (LU Yao. Land Use and Land Cover Change of Hailar River Basin and Its Driving Forces [D]. Hohhot:

- Inner Mongolia University, 2011. (in Chinese))
- [2] 朱乔,梁睿,晋华,等. 基于 SWAT 模型的岚河流域径流模拟[J]. 水电能源科学, 2013,31(3):25-27. (ZHU Qiao, LIANG Rui, JIN Hua, et al. Runoff simulation of Lanhe River basin based on SWAT model [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(3):25-27. (in Chinese))
- [3] 李忠娟. 基于 SWAT 模型的三水河流域径流模拟 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013. (LI Zhongjuan. Runoff Simulation Based on SWAT Model in the Sanshuihe Basin [D]. Yangling: Northwest Agriculture Forestry University, 2013. (in Chinese))
- [4] 李成六. 基于 SWAT 模型的石羊河流域上游山区径流模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011. (LI Chengliu. Runoff Simulation in Upstream of the Shiyang River Basin Using SWAT Model [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese))
- [5] 李忠娟,马孝义,李贤波,等. 基于 SWAT 模型的三水河流域径流模拟[J]. 节水灌溉, 2013,(4):22-29. (LI Zhongjuan, MA Xiaoyi, LI Xi-anbo, et al. Runoff simulation based on SWAT model in the San-shuihe basin [J]. Water Saving Irrigation, 2013,(4):22-29. (in Chinese))
- [6] 杨霞,贾尔恒,阿哈提,邱秀云,等. 乌伦古河流域 SWAT 模型基础数据库构建[J]. 水资源与水工程学报, 2013,24(6):74-78. (YANG Xia, JIAERHENG.Ahati, QIU Xiuyun, et al. Construction of basic database for SWAT model in Wulungu River basin [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013,24(6):74-78. (in Chinese))
- [7] 李磊,董晓华,喻丹,等. 基于 SWAT 模型的清江流域径流模拟研究[J]. 人民长江, 2013,44(22):25-29. (LI Lei, DONG Xiaohua, YU Dan, et al. Study on runoff simulations on Qingjiang River basin by SWAT model [J]. Yangtze River, 2013,44(22):25-29. (in Chinese))
- [8] 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. (BAI Shuying, WANG Li, SHI Jianqiao, et al. Runoff simulation for Kaidu River basin based on SWAT model [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013,27(9):79-84. (in Chinese))

### Runoff Simulation of Hailar River Basin Based on SWAT Model

REN Juanhui<sup>1</sup>, LI Weiping<sup>1</sup>, REN Bo<sup>2</sup>, DUAN Haojie<sup>1</sup>, YANG Wenhuan<sup>1</sup>, YIN Zhenyu<sup>1</sup>

(1. Faculty of Environment & Energy Resources, Inner Mongolia University of Sciences & Technology, Baotou 014010, China;

2. Hydrology Bureau of Shanxi Province, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** This study was based on ArcGIS to build distributed hydrological model SWAT to simulation of the watershed hydrological processes of the Hailar River upstream basin. In order to study the applicability of the model in the Hailar River upstream, through integration the based data of the basin, the model using the measured runoff data from 1999 to 2003 to parameter calibration, and the measured runoff data from 2004 to 2010 to validate the model. The comparison between the simulated and measured monthly and annual runoff show that the Nash coefficient of Ens and correlation coefficient R<sup>2</sup> calibration and validation periods are respectively 0.861~0.873 and 0.877~0.861. Based on the two evaluation criteria, the SWAT model has a good applicability in the Hailar River upstream basin, and also could provide the basis to the basin water resources management.

**Key words:** Hailar River; SWAT model; runoff simulation

(上接第 95 页)

- [4] 章四龙. 预报系统关键技术研究与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006:256. (ZHANG Silong. Key Technology Research and Practice of Flood Forecasting System [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2006:256. (in Chinese))
- [5] 刘国纬. 论防灾减灾非工程措施的定义与分类 [J]. 水科学进展, 2003,14(1):98-103. (LIU Guowei. Definition and classification of non engineering measures for disaster reduction and mitigation [J]. Advances in Water Science, 2003,14(1):98-103. (in Chinese))

### Analysis of “7.21” Storm Flood in Mengshi City of Dehong Autonomous Prefecture in 2014

ZHANG Zhengqiang, YE Xinming, LI Yueqing, YANG Liping, SUN Tao

(Dehong Hydrology and Water Resources Bureau of Yunnan Province, Mangshi 678400, China)

**Abstract:** By the effect of the Super Typhoon “Ramasun” in July 2014, the counties in Dehong Prefecture suffered from the rainstorm, heavy rainfall appeared in the river basins of Irrawaddy and Salween, particularly at 6:00 on July 21, 2014. The flash floods, landslides and debris flow occurred in Mnghai, Mangshi City. Analysis of the storm flood, storm rainfall and the concerned disaster characteristics is helpful to understand the characteristics of the rainstorm floods in the region, which provide the basis for flood control and disaster prevention<sup>[1]</sup>.

**Key words:** “7·21” storm; rainstorm characteristics; rainstorm volume; flood; Mangshi City of Yunnan Province