

# 基于 SWAT 模型对洮赵新河流域径流的模拟研究

芦昌兴<sup>1</sup>, 王甲荣<sup>1,2</sup>, 官雪亮<sup>1</sup>, 孙秀玲<sup>1</sup>

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 洮赵新河是南四湖流域重要的入湖河流,研究该流域的径流对南四湖湖西平原区具有重要意义。选用 SWAT 分布式水文模型,通过 SWAT-CUP 程序的 Sufi-2 算法进行参数率定、敏感性分析与不确定性分析,模拟了洮赵新河流域 2008-2014 年的月径流过程。结果表明:月径流在校准期和验证期的相关系数  $R^2$  和 NS 效率系数均大于 0.85,表明 SWAT 模型在洮赵新河流域适用性较好;根据敏感性分析结果发现水文相关参数与径流有不同程度的相关性,其中植被蒸腾补偿系数、河岸调蓄的基流  $\alpha$  因子、浅层地下水径流系数等 13 个参数最为敏感;在气象站点密度较小的地区,引入 CMADS 气象数据集作为流域水文模型的驱动数据集,取得了理想的效果。

**关键词:** SWAT 模型; 径流模拟; CMADS; 洮赵新河

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)06-0019-06

## Study on runoff simulation in Zhuzhaoxin River Basin by SWAT model

LU Changxing<sup>1</sup>, WANG Jiarong<sup>1,2</sup>, GONG Xueliang<sup>1</sup>, SUN Xiuling<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

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

**Abstract:** Zhuzhaoxin River is an important river in Nansi Lake Basin, and it is of great significance to study the runoff of the river basin and the west plain area of Nansi Lake. This paper chooses a distributed hydrological model - SWAT and uses parameter sensitivity analysis, parameter rate determination and uncertainty analysis based on Sufi-2 algorithm of SWAT-CUP program, to simulate Zhuzhaoxin River Basin monthly runoff process in 2008-2014. The results showed that: The correlation coefficient  $R^2$  and NS efficiency coefficient of the monthly runoff and the validation period were all greater than 0.85, indicated that the SWAT model was applicable in Zhuzhaoxin River Basin. The sensitivity analysis results showed that several hydrological parameters have different degree of correlation with runoff, with 13 the most sensitive, such as compensation coefficient of vegetation transpiration, the base flow of  $\alpha$  factor of the bank regulation, and shallow groundwater runoff coefficient. The introduction of the CMADS meteorological data set as the driving data set of the hydrological model in the basin has achieved the desired effect in the area with relatively low meteorological station density.

**Key words:** SWAT; runoff simulation; CMADS(The China Meteorological Assimilation Driving Datasets for the SWAT model); Zhuzhaoxin River

## 1 研究背景

水文模型可以用来探索复杂水文循环机理和过程,也可以解决许多实际水文问题<sup>[1]</sup>。SWAT 模型作为可以进行大尺度、长时期模拟分布式水文模型,是目前解决流域水文模拟、环境评价等问题的主要手段之一<sup>[2-3]</sup>。目前 SWAT 模型在国内外已大量应

用于径流和非点源污染的模拟,Tamm 等<sup>[4]</sup>用 SWAT 模型模拟土地利用和气候变化对波罗的海东部地区水资源的影响;Yesuf 等<sup>[5]</sup>利用 SWAT 模型对埃塞俄比亚的 Maybar 流域进行模拟,结果表明 SWAT 模型在热带流域的适用性良好;赵杰等<sup>[6]</sup>模拟了乌鲁木齐河流域径流,模拟结果与观测流量过程线拟合程度较好;喻晓等<sup>[7]</sup>以葫芦河流域为研究对象,研

收稿日期:2018-04-12; 修回日期:2018-06-13

基金项目:山东省省级水利科研与技术推广项目(SDSLKY201406)

作者简介:芦昌兴(1993-),男,山东济南人,硕士研究生,研究方向:水资源与环境保护研究。

究了不同亚流域数量对径流模拟的影响;贾静<sup>[8]</sup>、刘鹏<sup>[9]</sup>、马放等<sup>[10]</sup>利用 SWAT 模型分别对秦皇岛地区、滇池流域、阿什河流域非点源污染进行模拟,结果均表明模型适用性良好。

中国大气同化驱动数据集(China Meteorological Assimilation Driving Datasets for the SWAT model, CMADS)是孟现勇<sup>[11]</sup>建立的应用于 SWAT 模型的气象驱动数据集,与国内外 NCAR/DOE、JRA-25 及 Princeton 等数据集相比,CMADS 数据可更好的对我国大尺度地表分量时空演变规律进行细致化分析<sup>[12]</sup>。由于 CMADS 数据建立的时间较短,目前国内将 CMADS 作为 SWAT 模型气象驱动数据集的研究较少,孟现勇等<sup>[12-14]</sup>在分别在精博河流域、黑河流域、玛纳斯流域利用 CMADS 数据集驱动 SWAT 模型,其结果优于使用传统气象站的模拟结果。

南四湖作为南水北调东线工程中重要的调蓄场所,其水量水质直接影响东线工程运行的成败。洙赵新河是南四湖流域具有代表性的入湖河流,是鲁西南跨菏泽、济宁两市的大型防洪、排涝、灌溉综合性河道,也是山东省 15 条骨干河道之一,可作为研究湖西平原区的典型流域。本文选择洙赵新河为研究区,引入 CMADS 作为 SWAT 模型气象驱动数据集,构建洙赵新河流域日尺度分布式水文模型,结合 SWAT-CUP 模型对参数进行率定、敏感性以及不确定性分析,讨论 SWAT 分布式水文模型在洙赵新河流域径流模拟的适用性,以期为洙赵新河乃至整个南四湖水资源综合管理与决策提供科学依据。

## 2 研究区概况

洙赵新河流域流经菏泽、济宁两市,是鲁西南地区具有防洪、排涝和灌溉功能的大型综合性河道,其地理位置东临南阳湖,西靠黄河,南与万福河和东鱼河搭界,北接梁济运河流域。洙赵新河流域包括洙赵新河干流以及郛巨河、鄆郛河、洙水河 3 条大的支流,干流起源于东明县宋砦村,向东流经 8 个县(区)于刘官屯村东入南阳湖,全长 145.05 km,流域面积 4 206 km<sup>2</sup>,其中菏泽市境内 4 119 km<sup>2</sup>,济宁市境内 87 km<sup>2</sup>。该流域属黄泛冲积平原,地势西高东低,西部地面高程 57.40 m 左右,东部滨湖地面高程为 34.00 m 左右,地面坡度在 1/5000 至 1/12000 之间。流域属暖温带亚湿润气候区,多年平均气温为 13.7℃,流域内多年平均(1964-2009 年)降水量为 641 mm。

## 3 研究方法

### 3.1 适应性评价指标

本次研究采用 NS 系数和确定性系数  $R^2$  来评价模型模拟的结果。研究者普遍认为 SWAT 模型模拟满意标准为  $R^2 > 0.5$ ,  $NS > 0.5$ <sup>[15]</sup>;Moriasi 等<sup>[16]</sup>认为  $NS \geq 0.65$ (月尺度)就说明模型的适用性是可以接受的。本文综合选取的 3 种适用性评价指标,参考陈军锋等<sup>[17]</sup>对梭磨河流域的研究,基于 NS 系数及  $R^2$  的评价值可将模拟的结果划分为 4 个等级,具体的方案见表 1。

表 1 径流模拟评定等级标准值划分表

| 甲等         | 乙等       | 丙等       | 丁等   |
|------------|----------|----------|------|
| $\geq 0.9$ | 0.7~0.89 | 0.5~0.69 | <0.5 |

### 3.2 不确定性分析算法

SWAT-CUP 是独立于 SWAT 模型的参数校准分析软件,其有运算快、算法多、自动绘图等多个优点,同时可应用 SWAT-CUP 进行参数的敏感性分析和不确定性分析。SWAT-CUP 内部镶嵌了与 SWAT 链接的 SUFI-2、PSO、GLUE、Parasol、MCMC 算法程序。本次校准采用 SuFI-2 算法对参数进行自动校准,自动校准分为 4 步:设置初始参数、建立目标函数、确定算法终止条件、计算评价指标。

SuFI-2 算法是一种反演建模法,参数的不确定性表示为范围(均匀分布),考虑了所有不确定性来源,例如驱动变量(例如降水量)的不确定性、概念模型、参数和测量数据。参数中不确定性的传播导致模型输出变量的不确定性,表示为 95% 概率分布。这些是使用拉丁超立方采样通过参数不确定性的传播产生的输出变量的累积分布的 2.5% 和 97.5% 水平计算的,被称为 95% 预测不确定度,即 95PPU,这些 95PPU 是随机校准方法中的模型输出。重要的是没有单个信号代表模型输出,而是由某个参数范围生成的 95PPU 表示的良好解决方案<sup>[18]</sup>。

## 4 构建 SWAT 模型

### 4.1 数据预处理

洙赵新河流域 SWAT 模型模拟需要 5 类资料,其中数字高程数据(DEM)、土地利用和土壤类型数据用于模型的构建,气象数据资料(包括降水、温度、风速、太阳辐射、相对湿度)用于驱动模型,实测径流资料用于模型参数率定,各类型数据的来源及用途见表 2。

研究区的数字高程数据 (DEM) 是空间分辨率为  $3\text{ s} \times 3\text{ s} (90\text{ m} \times 90\text{ m})$  的 SRTM\_DEM, 该数据获取自 CGIAR - CSISRTM90 数据库, 在 ArcGIS 中经格式转换、掩膜提取出 SWAT 模型所需的南四湖流域的 DEM 数据, 数据如图 1 所示。

表 2 SWAT 模型所需数据来源及用途

| 数据名称         | 数据描述                   | 来源                    | 数据用途           |
|--------------|------------------------|-----------------------|----------------|
| 数字高程模型 (DEM) | 90 m $\times$ 90 m 分辨率 | CGIAR - CSISRTM90 数据库 | 生成河网、划分亚流域     |
| 土壤类型         | 1: 1000000             | 寒区旱区科学数据中心            | 生成 HRU、构建土壤数据库 |
| 土地利用类型       | 1: 1000000             | 寒区旱区科学数据中心            | 生成 HRU         |
| 气象数据         | 2008 - 2016 逐日数据       | 寒区旱区科学数据中心            | 构建气象数据库        |
| 实测径流         | 1974 - 2015 逐月数据       | 山东省淮河流域水利管理局          | 径流率定及验证        |

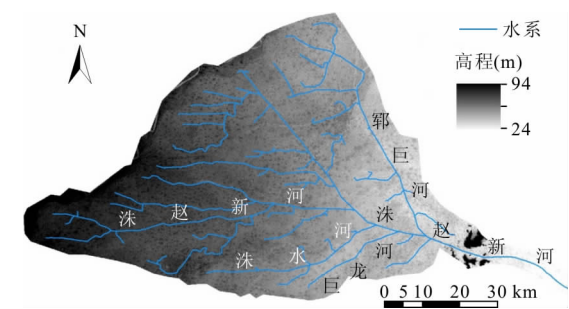


图 1 洮赵新河流域数字高程数据图

土壤数据来自于寒区旱区科学数据中心的 1: 100 万土壤数据, 空间分辨率为  $1\ 000\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$ 。该数据格式同土地利用类型。土壤分类系统采用 FAO - 90 系统。根据流域内现有的 100 中土壤类进行合并重新分类成 31 中土壤类型、11 种土组 (除水体、沙丘流沙外), 如图 2 所示。

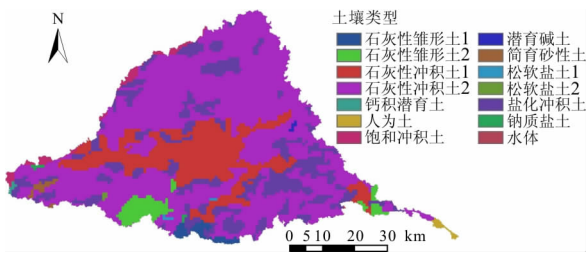


图 2 洮赵新河流域土壤类型分布图

土地利用数据选取寒区旱区科学数据中心的 中国地区土地覆盖综合数据集<sup>[19]</sup>, 数据集坐标系为 D\_Krasovsky\_1940, 空间分辨率为  $1\ 000\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$ , 数据格式为 GRID, 经过投影变换成统一的投影坐标系 (WGS\_1984\_UTM\_Zone\_50N), 掩膜提取研究区的土地利用数据, 并把原有的 24 种类型重分类成 10 种, 如图 3 所示。

流域内气象站点相对较少, 且气象数据不易获得, 本次研究采用寒区旱区科学数据中心发布的

SWAT 模型 CMADSV1.1 数据集<sup>[11]</sup>。数据时间序列为 2008 - 2014 年, 空间分辨率为  $1/3^\circ$ , 采用数据集站点共 9 个, 具体站点分布见图 4。

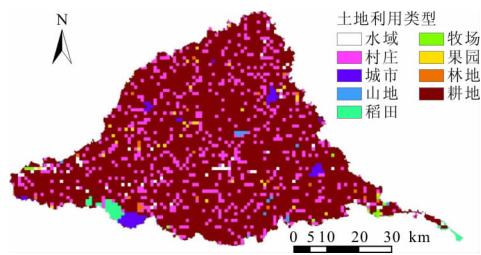


图 3 洮赵新河流域土地利用类型分布图

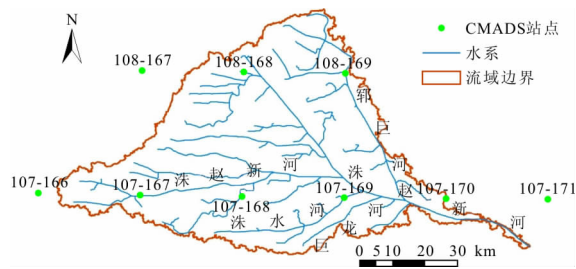


图 4 洮赵新河流域 CMADS 数据集站点分布图

4.2 模型构建

利用 Mask 对洮赵新河流域的 DEM、土壤类型、土地利用数据进行提取, 并进行流域坡度分析。根据对子流域划分的研究分析及模型的推荐值, 取洮赵新河流域的最小汇水面积的阈值为  $1\ 000\text{ hm}^2$ , 并基于 DEM 数据运用“burn - in”算法生成流域模型中的流域河网, 运用流域勾勒的八流点法则计算水流贡献单元数, 产生汇流栅格计算河道出水口, 共划分子流域个数 57 个, 并进行流域坡长、坡度等特征参数计算, 流域水系、子流域划分分别见图 5、6。

流域内共有 10 类土地利用类型、15 类土壤类型。流域内土壤类型较为单一, 92% 以上为黄河冲积土 (主要为石灰性冲积土、盐化冲积土); 土地利

用类型 80% 以上为耕地。流域地处平坦湖西地区,流域坡度在  $0 \sim 58.08^\circ$  之间,平均坡度为  $0.711^\circ$ ,流域坡度 97% 以上在  $2^\circ$  及以下,流域坡度定义采用 Multiple Slope 分二级定义 ( $0 \sim 6^\circ$ 、 $6 \sim 58.08^\circ$ ); 流域的 HRU 划分采用 Multiple HRUs 方法进行,并通过子流域内土壤、土地利用所占面积分析,设置土地利用、土壤、坡度阈值为 1%、9%、1% (相对面积),共划分 384 个 HRUs。流域验证测站梁山闸站所在子流域编号为 53。

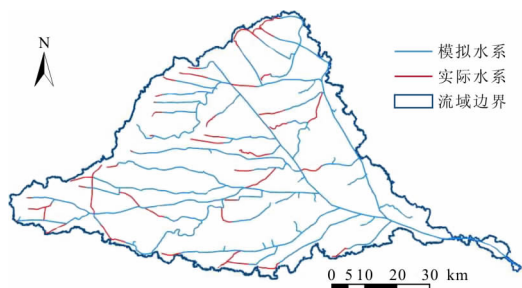


图 5 洮赵新河实际水系与模拟水系图

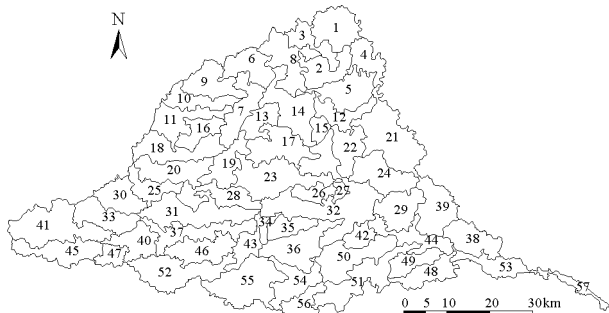


图 6 洮赵新河流域子流域划分图

#### 4.3 径流量还原计算

洮赵新河流域径流量的校准采用梁山闸水文站的实测月径流量数据,由于洮赵新河是 1973 年完成全流域开挖的坡水河,梁山闸站的流量过程受闸门影响严重,本次流域模拟在不考虑闸门影响的情况,对梁山闸站天然流量过程进行基于降水数据的还原计算。

综合历年降雨径流关系和洮赵新河治理研究报告水文部分,洮赵新河流域径流系数取用平均值  $\alpha = 0.28$  来推求测站径流量过程,并考虑上个月降水对下个月径流的影响,根据已有研究采用下述公式进行计算:

$$R_i = \alpha \frac{P_i F}{T} \quad (1)$$

$$R_i = M_1 R_{i-1} + M_2 R_i \quad (2)$$

式中:  $P_i$  为研究时间范围内第  $i$  时段内月降水量,

mm;  $R_i$ 、 $R_{i-1}$  分别为研究时间范围内第  $i$  时段及  $i-1$  时段对应的月径流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\alpha$ 、 $M_1$ 、 $M_2$  分别为洮赵新河流域全区的径流系数及由梁山闸、魏楼闸及郾鄢河入河口测站的降水、径流的历史资料修正的相邻时段间的排水模数。公式 (2) 中的  $R_i$  为最终用于模型率定的还原径流量。梁山闸站降水量与修正径流量过程线对比图、修正径流量过程及梁山闸站实测径流与修正径流过程线对比图见图 7、8。

对于湖西平原区控制面积较大的排水骨干河流,设计排水模数可采用经验公式法或单位线法,但以经验公式法较常用,本文采用经验公式形式如下:

$$M = KR^m F^n \quad (3)$$

式中:  $M$  为设计排涝模数,  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ;  $K$  为综合系数;  $R$  为设计净雨深, mm;  $F$  为流域面积,  $\text{km}^2$ ;  $m$  为峰量指数;  $n$  为排涝模数随面积增大而减小的指数。流域内梁山闸控制站的不同频率的排水模数如表 3 所示。

表 3 洮赵新河梁山闸断面排水模数成果表

| 断面名称 | 控制面积/<br>$\text{km}^2$ | 设计频率 | 净雨深<br>$R/\text{mm}$ | $M/$<br>$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2})$ |
|------|------------------------|------|----------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 梁山闸  | 4206                   | 1/50 | 124.0                | 0.48                                                            |
|      |                        | 1/20 | 94.4                 | 0.36                                                            |
|      |                        | 1/5  | 52.0                 | 0.20                                                            |

## 5 结果分析

研究区模拟时间选定 2008–2014 年,将各类数据向前延伸 1 年得到 2007 年的 5 类数据,作为预热期;2008–2010 年为校准期,进行流域径流、泥沙相关参数的调整与校准;2011–2014 年作为验证期,以检验建立模型的模拟效果。

### 5.1 参数率定及敏感性分析

本次模拟对常用的 25 个参数进行率定,主要为地下水参数、土壤参数等。参数取值范围参考 SWAT 模型数据库,通过在 SWAT-CUP 中的 SuFi-2 算法进行 1000 次迭代运算,比较参数的敏感性,最终确定 13 个对径流量的敏感性最大参数,参数模拟的最优结果及敏感性排序如表 4 所示。P-Value 是  $t$  检验值表对应的 P 概率值。P-Value 值越接近于 0,参数敏感性越高。

分析结果表明植被蒸腾补偿系数、河岸调蓄的基流  $\alpha$  因子、浅层地下水径流系数的 P-Value 小于 0.1,说明对径流量的敏感性较高。

### 5.2 模拟结果评价

洮赵新河流域的径流量校准期、验证期的模拟年系

列值与实测年系列值对比图及相关关系图见图 9、10。

由洮赵新河流域校准期、验证期的实测与模拟月径流量对比图可知,确定性系数在 0.80 以上,模拟效果基本满意;洮赵新河流域的模拟与实测月径流量过程的各评价指标值均满足模拟精度要求,模

拟等级属于乙级及以上,具体见表 5 所示。由图表可知,模拟流域的实测月径流系列值与模拟系列值趋于一致,模拟等级较高,丰水期的峰量控制较好,平枯水期及偏枯年份的模拟一般,模型整体模拟效果较好,满足研究需要。

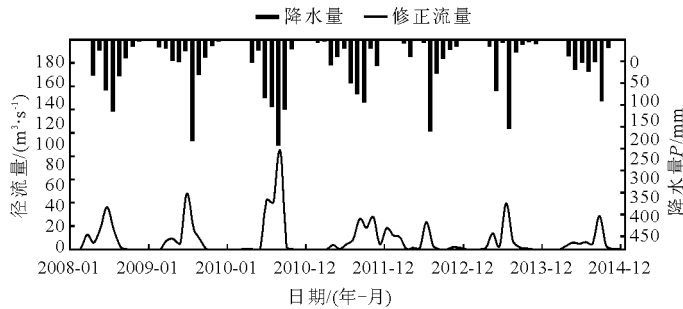


图 7 梁山闸站降水量与修正径流量过程

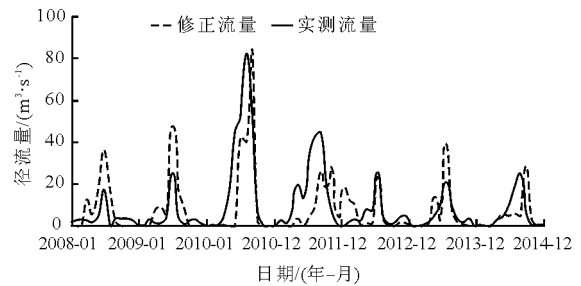


图 8 梁山闸站实测径流与修正径流过程线对比图

表 4 参数率定结果及敏感性排序

| 敏感性排序 | 参数名称               | 参数意义                | 下限    | 上限   | 最终值     | p - vaule |
|-------|--------------------|---------------------|-------|------|---------|-----------|
| 1     | V__EPCO. hru       | 植被蒸腾补偿系数            | 0     | 1    | 0.89    | 0.07      |
| 2     | V__ALPHA_BNK. rte  | 河岸调蓄的基流 $\alpha$ 因子 | 0     | 1    | 0.81    | 0.07      |
| 3     | V__GWQMN. gw       | 浅层地下水径流系数           | 0     | 2000 | 420.00  | 0.10      |
| 4     | V__ALPHA_BF. gw    | 基流 $\alpha$ 因子      | 0     | 1    | 0.67    | 0.12      |
| 5     | V__CH_K2. rte      | 主河道有效渗透系数           | 5     | 130  | 26.25   | 0.17      |
| 6     | V__ESCO. hru       | 土壤蒸发补偿系数            | 0     | 1    | 0.17    | 0.20      |
| 7     | R__SOL_Z(1). sol   | 土壤表面到层底的深度          | 0     | 3500 | 2625.00 | 0.24      |
| 8     | V__GW_DELAY. gw    | 地下水滞后系数             | 30    | 450  | 252.60  | 0.25      |
| 9     | R__SOL_AWC(1). sol | 土壤有效含水量             | 0     | 1    | 0.55    | 0.29      |
| 10    | V__GW_REVAP. gw    | 地下水再蒸发系数            | 0.02  | 0.2  | 0.04    | 0.43      |
| 11    | R__SOL_K(1). sol   | 土壤饱和导水率             | 0     | 2000 | 980.00  | 0.59      |
| 12    | V__PLAPS. sub      | 降水垂直变率              | -1000 | 1000 | 900.00  | 0.73      |
| 13    | R__CN2. mgt        | 径流曲线数               | -0.2  | 0.2  | 0.13    | 0.88      |

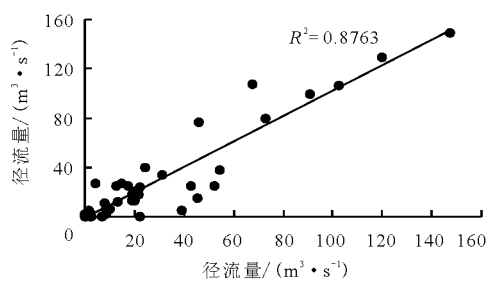
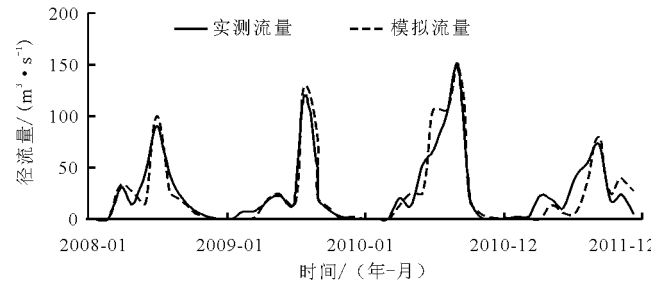


图 9 洮赵新河流域校准期实测与模拟月径流量对比图及相关关系图

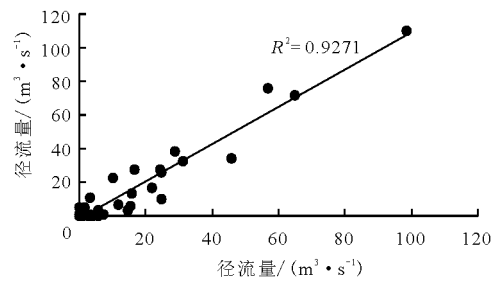
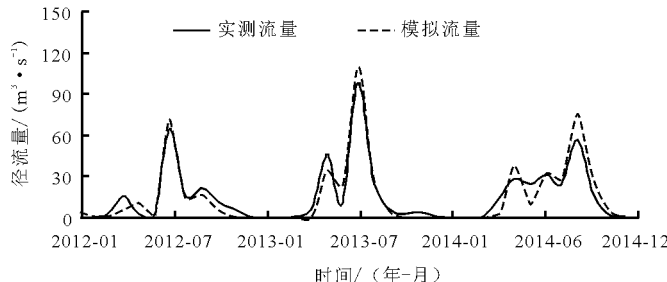


图 10 洮赵新河流域验证期实测与模拟月径流量对比图及相关关系图



表 5 模拟流域的月径流量模拟评价指标

| 时期  | 月均值/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) |        | $R^2$  | NS     | 等级 |
|-----|------------------------------------------|--------|--------|--------|----|
|     | 实测值                                      | 模拟值    |        |        |    |
| 校准期 | 25.343                                   | 25.176 | 0.8763 | 0.8886 | 乙级 |
| 验证期 | 15.154                                   | 15.257 | 0.9271 | 0.9267 | 甲级 |

## 6 结 论

本文用 SWAT 模型模拟了洮赵新河流域径流情况,并结合 Sufi-2 方法率定模型参数并进行敏感性分析,得到以下主要结论:

(1)在如洮赵新河流域这样气象站点较少的地区,引入 CMADS 气象数据集作为流域水文模型的驱动数据集,有效解决气象数据难获取、流域气象站点少的问题,在模型精确度、空间驱动分辨率上得到提升。

(2)根据敏感性分析结果发现水文相关参数与径流有不同程度的相关性,其中植被蒸腾补偿系数、河岸调蓄的基流  $\alpha$  因子、浅层地下水径流系数、基流  $\alpha$  因子、主河道有效渗透系数、土壤蒸发补偿系数、土壤表面到层底的深度、地下水滞后系数、土壤有效含水量、地下水再蒸发系数等参数对本研究区径流模拟影响相对明显。

(3)SWAT 模型对丰水年份模拟效率高,对于某些枯水年模拟不够理想,并且对径流量特征呈“双峰型”的时段模拟与实测径流量相差较大。总体来看,SWAT 模型模拟较为理想,模拟月径流时,率定期  $R^2$  和 NS 值均大于 0.85,验证期超过了 0.9,表明 SWAT 模型在洮赵新河流域适用性较好。

### 参考文献:

- [1] 夏 军,翟晓燕,张永勇. 水环境非点源污染模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7):941-952.
- [2] 徐宗学,程 磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报,2010,41(9):1009-1017.
- [3] 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):79-86.
- [4] TAMM O, MAASIKAMÄE S, PADARI A, et al. Modeling the effects of land use and climate change on the water resources in the eastern Baltic Sea region using the SWAT model[J]. CATENA, 2018,167:78-89.
- [5] YESUF H M, MELESSE A M, ZEKEKE G, et al. Stream-flow prediction uncertainty analysis and verification of SWAT model in a tropical watershed[J]. Environmental

Earth Sciences, 2016, 75(9):1-16.

- [6] 赵 杰,徐长春,高沈瞳,等. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河流域径流模拟[J]. 干旱区地理, 2015,38(4):666-674.
- [7] 喻 晓,马孝义,蔡朵朵. 基于 SWAT 模型的合理亚流域划分和径流模拟[J]. 中国农村水利水电,2017(11):20-25.
- [8] 贾 静. 基于 SWAT 模型的秦皇岛地区非点源污染模拟研究[D]. 石家庄:河北师范大学, 2017.
- [9] 刘 鹏. 基于 SWAT 模型的滇池流域不同施肥情景下农业非点源污染模拟研究[D]. 昆明:云南师范大学, 2017.
- [10] 马 放,姜晓峰,王 立,等. 基于 SWAT 模型的阿什河流域非点源污染控制措施[J]. 中国环境科学, 2016, 36(2):610-618.
- [11] 孟现勇. SWAT 模型中国大气同化驱动数据集 (CMADS V1.1) [DS]. 兰州:寒区旱区科学数据中心. 2016.
- [12] 孟现勇,王 浩,雷晓辉,等. 基于 CMDAS 驱动 SWAT 模式的精博河流域水文相关分量模拟、验证及分析[J]. 生态学报, 2017,37(21):7114-7127.
- [13] 孟现勇,师春香,刘时银,等. CMADS 数据集及其在流域水文模拟中的应用:以黑河流域为例[J]. 人民珠江, 2016, 37(7):1-19.
- [14] MENG Xianyong, WANG Hao, LEI Xiaohui, et al. Hydrological modeling in the Manas River Basin using soil and water assessment tool driven by CMADS [J]. Tehnički Vjesnik - Tehnical Gazette, 2017,24(2):525-534.
- [15] SANTHI C, ARNOLD J G, WILLIAMS J R, et al. Application of a watershed model to evaluate management efforts on point and nonpoint source pollution [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(6):1559-1570.
- [16] MORIASI D N, ARNOLD J R, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Trans ASABE, 2007, 50(3):885-900.
- [17] 陈军锋,李秀彬等. 模型模拟梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对流域水文的影响[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2004,34(7):668-674.
- [18] ABBASPOUR K C. SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty programs [M]. Duebendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, 2007:95.
- [19] 冉有华,李 新,卢 玲. 中国地区土地覆盖综合数据集 [DS]. 寒区旱区科学数据中心,2010. (doi:10.3972/westdc.007.2013.db).