

基于 SWAT 模型的北江飞来峡流域径流模拟

陈晓丽¹, 黄国如^{1,2}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学
亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 为满足北江飞来峡流域非点源污染负荷核算需要, 利用 SWAT 模型对研究区 1969–2011 年日径流过程进行模拟。基于飞来峡流域水文、气象、地形、土地利用和土壤类型等资料构建 SWAT 径流模型, 并运用 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 方法对模型中的 14 个径流参数进行敏感性分析及参数率定, 再进行径流模拟效果定量评价。结果表明: 对径流过程有显著影响的参数主要为 SCS 径流曲线系数、主河道曼宁系数、地下水滞后系数以及地表径流滞后时间等; 日径流率定期和验证期的效率系数均为 0.83, 相对误差分别为 1.40% 和 0.58%, 且大部分模拟数据落在不确定性区间内, 模拟结果的不确定性较小, 表明所构建的 SWAT 径流模型具有较高的精度, 在北江飞来峡流域适用性良好。

关键词: SWAT 模型; 径流模拟; 敏感性分析; SUFI-2 方法; 飞来峡流域

中图分类号: TV121

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)05-0001-07

Runoff simulation of Feilaixia watershed of Beijiang River based on SWAT Model

CHEN Xiaoli¹, HUANG Guoru^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to meet the requirement of non-point source pollution load calculation in the Feilaixia watershed, the SWAT runoff model was used to simulate the daily runoff process in the study area from 1969 to 2011. Based on the hydrological, meteorological, terrain, land use data and soil types of the Feilaixia watershed, the SWAT runoff model was constructed. The 14 runoff parameters were calibrated by SUFI-2 method in SWAT-CUP, and their sensitivities were analyzed too. The quantitative evaluation of the runoff simulation effect was carried out. The results showed that the parameters which have significant influence on the runoff process included CN2, CH_N2, GW_DELAY, SURLAG and so on. In the daily runoff process, Nash-Sutcliffe coefficients were both up to 0.83 in the calibration and the verification period, and the relative errors were 1.40% and 0.58%. The simulation results obtained a smaller uncertainty as most of the simulated value lay on the uncertainty interval, indicating that the constructed SWAT runoff model has excellent accuracy and high applicability to the Feilaixia watershed.

Key words: SWAT model; runoff simulation; sensitivity analysis; SUFI-2; Feilaixia watershed

近年来,随着社会经济的快速发展,水环境问题已成为全球性问题,为此,许多分布式水文模型正被广泛地应用于水环境问题模拟分析中,例如 SWAT、HSPF、CREAMS 等^[1-2],其中尤以 SWAT 模型应用更为广泛。SWAT 模型是 1994 年由美国农业部研发的一个具有物理基础的流域水文模型^[3-4],最早

在美国得以广泛应用,随后 SWAT 在世界范围内得以推广。在径流模拟方面,国外学者利用 SWAT 模型开展了大量研究工作,Emam 等^[5]应用 SWAT 模型对伊朗 Razan-Ghahavand 流域径流过程进行模拟、校准和验证,使之适用于当地气候变化和土地利用变化评估;Yesuf 等^[6]在埃塞俄比亚的 Maybar 流

收稿日期:2017-06-03; 修回日期:2017-07-16

基金项目:广东省水利科技创新项目(2016-22)

作者简介:陈晓丽(1993-),女,广东揭阳人,博士研究生,主要从事水文学及水资源研究。

通讯作者:黄国如(1969-),男,江苏南京人,博士,教授,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究。

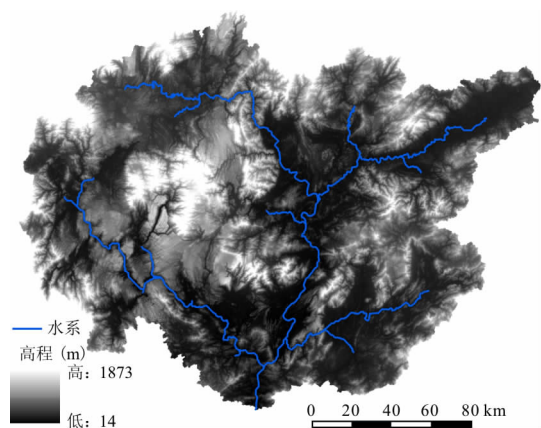


图 3 飞来峡流域 DEM 及水系图

土地利用数据采用中国科学院计算机网络信息中心全球变化参量数据库提供的土地利用数据(图 4),空间分辨率为 90m×90m。由于 1969–2011 年间飞来峡流域整体土地利用情况变化不大,主要仍以耕地、林地为主,故本文采用静态土地利用数据。SWAT 模型要求土地利用类型不超过 10 类,故根据 Globcover2009_Legend 分类标准,将其重分为 6 类,分别为耕地、草地、林地、城市用地、裸地及水域,各土地利用类型代码以及所占流域总面积的比重如表 1 所示。

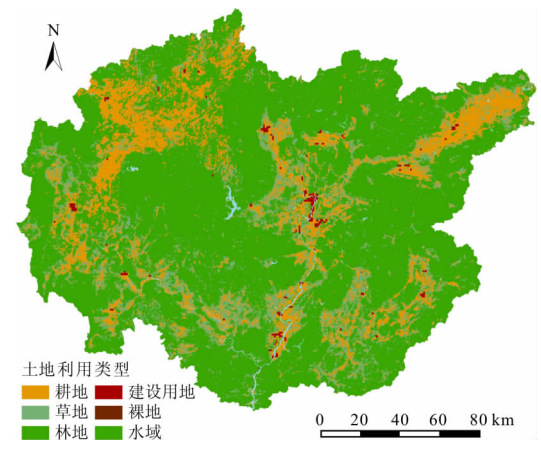


图 4 飞来峡流域土地利用数据

土壤数据采用世界粮农组织 (FAO) 和国际应用系统分析学会 (HASA) 共同开发的全球土壤数据库(图 5),空间分辨率为 90m×90m。根据 SWAT 模型要求,按照土壤理化性质,包括土壤中黏粒、砂粒、砾石的含量、有机碳含量、盐度等,将其重分为 9 类,分别为黏土 29.980%、壤土 23.933%、砂黏土 29.746%、粉质黏土 12.341%、砂壤土 2.840%、黏壤土 0.307%、壤质砂土 0.262%、粉质黏土 0.202% 及粉质黏壤土 0.388%。

为保证 SWAT 模型顺利运行,所有空间数据均需要具有统一的地理坐标系统,本文选取地理坐标系统为 D_WGS_1984,投影坐标系统为 WGS_1984_UTM_Zone_49N。

表 1 飞来峡流域土地利用类型分类表

土地类型	SWAT 分类	模型代码	所占比重/%
耕地	Agricultural Land – Generic	AGRL	16.221
草地	Pasture	PAST	12.464
林地	Forest – Mixed	FRST	70.275
城市用地	Residential	URBN	0.486
裸地	(Arid) Range	SWRN	0.003
水域	Water	WATR	0.551

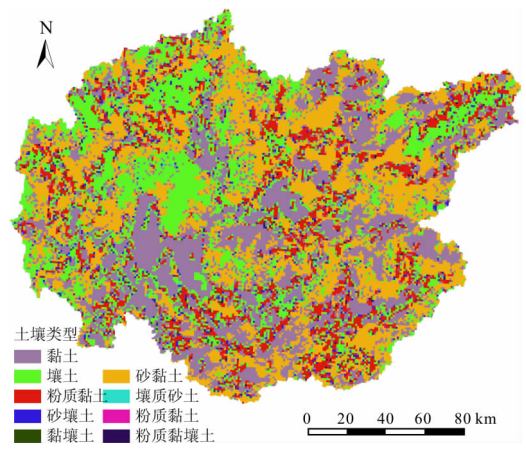


图 5 飞来峡流域土壤类型数据

3 SWAT 模型构建

SWAT 模型是基于流域–子流域–水文响应单元(HRU)的空间离散方法进行模拟的一种分布式水文模型,子流域通过集水面积阈值的设定而进行划分,基本单元 HRU 由土地利用、土壤类型和坡度共同定义,同样通过阈值划分。

对于子流域划分来说,集水面积阈值越小,流域划分就越详细,河网越密集,形成的 HRU 也越多,模拟精度也有所提高,但相应的计算量和计算时长也会增加,所以合适的阈值应该在保证模拟精度的前提下尽量提高模型的运行效率。综合考虑飞来峡实际情况,将阈值设定为 800 km²,飞来峡流域生成 27 个子流域,如图 6 所示。

在子流域划分的基础上,应用土地利用、土壤类型以及坡度划分等数据进行 HRU 划分。本文将研究区划分为 3 种坡度,0~1°、1~10°以及 10°以上,并设定土地利用、土壤类型和坡度各占子流域面积

5%、20% 和 20% 以上部分参与生成 HRU, 最终生成 262 个水文响应单元。

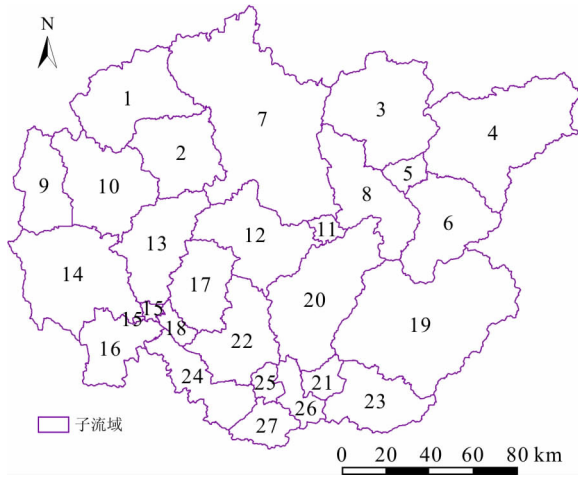


图6 飞来峡子流域划分图

最后,按 SWAT 模型输入要求,将降雨量、温度、湿度、风速和太阳辐射等水文气象数据分站点以 .txt 文件的格式进行整理,一个站点对应一个 .txt 文件,再为每个水文气象要素制作一个对应的 .txt 索引表,索引表里包括各站点编号、名称以及经纬度,在模型中加载上述各索引表文件,即可在模型中自动写入输入文件,至此,SWAT 模型构建完毕。

4 参数敏感性分析

4.1 SUFI-2 分析方法

选用 SWAT 模型自带的自动校准工具 SWAT-CUP 进行参数敏感性分析,SWAT-CUP 是一个将 SWAT 模型与外部系统分析工具耦合的界面,该软件包含 5 种敏感性分析方法,分别为 SUFI-2、GLUE、ParaSol、MCMC 和 PSO,本文选取 SUFI-2 这种较为常用的敏感性分析方法对 SWAT 模型参数进行敏感性分析。

SUFI-2 算法是一种反演建模法,该方法首先定义较大的参数范围,而后程序进行多次迭代,进而调整参数范围,将参数值限定至最适合模型的参数范围,直至获得理想的迭代结果,并通过验证最终参数范围来综合评估模型的适用性。

本文选取 1969-1990 年为参数率定期,1991-2011 年为模型验证期。根据 SWAT 模型的应用经验以及飞来峡流域的基本情况,选取 14 个参数进行敏感性分析,分别为 $CN2$ 、 $ALPHA_BF$ 、 GW_DELAY 、 $GWQMN$ 、 SOL_K 、 SOL_AWC 、 $ESCO$ 、 $EPCO$ 、 CH_N2 、 CH_K2 、 GW_REVAP 、 $SURLAG$ 、 SOL_BD 及 $REVAP$ -

MN , 并根据 SWAT-CUP 中的推荐设定各参数的初始范围,设置模型运行次数为开发者建议的 500 次,采用一种分层多维抽样方法——拉丁超立方抽样法^[16]生成 500 组参数,进行 500 次相互独立计算,读取计算结果可得各参数敏感性排序以及计算后推荐的新参数范围,将新参数范围覆盖初始范围(即迭代),再进行新一轮 500 次的相互独立计算。如此以往,进行多次迭代,完成参数率定,即可得到各参数敏感性分析结果以及最终参数范围,再进行模型验证。

4.2 敏感性分析结果

参数敏感性分析方面,选用 t -stat 与 p -value 两个指标进行评价, t -stat 值给出了敏感性的程度,绝对值越大越敏感, p -value 决定了敏感性的显著性,其值越接近 0 越显著。

参数率定期对模型进行了 3 次迭代,直到获得参数敏感性分析及率定的理想结果,即可从最后 1 次迭代的 500 次模拟中得出最佳模拟,并将最佳模拟的 Nash-Sutcliffe 效率系数 (NS) 及相对误差等作为模型结果进行分析,本研究的最佳模拟为模型最后 1 次迭代(即第 3 次迭代)的 500 次模拟中的第 494 次。

为了提高参数敏感性分析效率,根据参数变化范围选择两种参数变化方式, v 表示将给定值作为现有参数值, r 表示将初始参数值乘以 $(1 + \text{给定值})$ 作为现有参数值,给定值是指在一定取值范围内采用拉丁超立方抽样法所得到的数值^[17]。所得到的各参数敏感性排序及率定结果见表 2,结果表明,对飞来峡流域的径流过程有显著影响的参数依次为 $CN2$ 、 CH_N2 、 GW_DELAY 、 $SURLAG$ 、 $EPCO$ 、 GW_REVAP 等。

另外,由各参数值与效率系数 NS 之间的散点图,即抽样点分布,能够更直观地阐述参数的敏感性,如图 7 所示(限于篇幅,仅选取敏感性排序前 6 位的参数)。

由图 7 不难发现,就敏感性排序第 1 的 $CN2$ 系数来看, NS 值随 $CN2$ 增大从较分散的偏低值向高值聚集,随之又向低值扩散,体现了明显的规律性;对于敏感性排序第 2 的 CH_N2 , NS 随其值增大从较均匀的偏低值逐渐向高值聚集,规律性较为明显;而对于其余敏感性参数, NS 值随参数值变化的散点分布变化规律并不是很明显。模拟结果表明,在参数的最终范围内, $CN2$ 取较中间值, CH_N2 取偏大值时,模型更易获得理想的径流模拟效果,值得在径流模拟

时引起关注。

表 2 各参数敏感性排序及率定结果

参数名	物理意义	参数变化方式	<i>t</i> - <i>stat</i>	<i>p</i> - <i>value</i>	敏感性排序	最初范围	最终范围
<i>CN2</i>	<i>SCS</i> 径流曲线系数	<i>r</i>	- 17. 12	0. 00	1	- 0. 5 ~ 0. 5	0. 08 ~ 0. 47
<i>CH_N2</i>	主河道的曼宁系数	<i>v</i>	6. 50	0. 00	2	- 0. 01 ~ 0. 3	0. 21 ~ 0. 3
<i>GW_DELAY</i>	地下水滞后系数	<i>v</i>	- 2. 18	0. 03	3	30 ~ 450	92. 1 ~ 225. 9
<i>SURLAG</i>	地表径流滞后时间	<i>v</i>	1. 96	0. 05	4	0. 05 ~ 24	13. 39 ~ 21. 87
<i>EPCO</i>	植物吸收补偿系数	<i>v</i>	- 1. 10	0. 27	5	0 ~ 1	0. 25 ~ 0. 76
<i>GW_REVAP</i>	地下水再蒸发系数	<i>v</i>	- 1. 02	0. 31	6	0. 02 ~ 0. 2	0. 103 ~ 0. 180
<i>SOL_AWC</i>	土壤可利用水量	<i>v</i>	- 0. 86	0. 39	7	0 ~ 1	0. 30 ~ 0. 59
<i>REVAPMN</i>	浅层地下水再蒸发系数	<i>r</i>	0. 69	0. 49	8	- 0. 5 ~ 0. 5	- 0. 17 ~ 0. 14
<i>SOL_K</i>	饱和水力传导系数	<i>r</i>	- 0. 63	0. 53	9	- 0. 5 ~ 0. 5	- 0. 41 ~ - 0. 04
<i>CH_K2</i>	河道有效水力传导系数	<i>r</i>	- 0. 47	0. 64	10	- 0. 5 ~ 0. 5	0. 07 ~ 0. 43
<i>ALPHA_BF</i>	基流退水系数	<i>v</i>	0. 45	0. 65	11	0 ~ 1	0. 53 ~ 1
<i>GWQMN</i>	浅层地下水径流系数	<i>r</i>	- 0. 16	0. 88	12	- 0. 5 ~ 0. 5	- 0. 198 ~ 0. 005
<i>ESCO</i>	土壤蒸发补偿系数	<i>v</i>	0. 08	0. 94	13	0 ~ 1	0. 47 ~ 0. 82
<i>SOL_BD</i>	湿密度	<i>v</i>	- 0. 02	0. 98	14	0. 9 ~ 2. 5	1. 11 ~ 1. 53

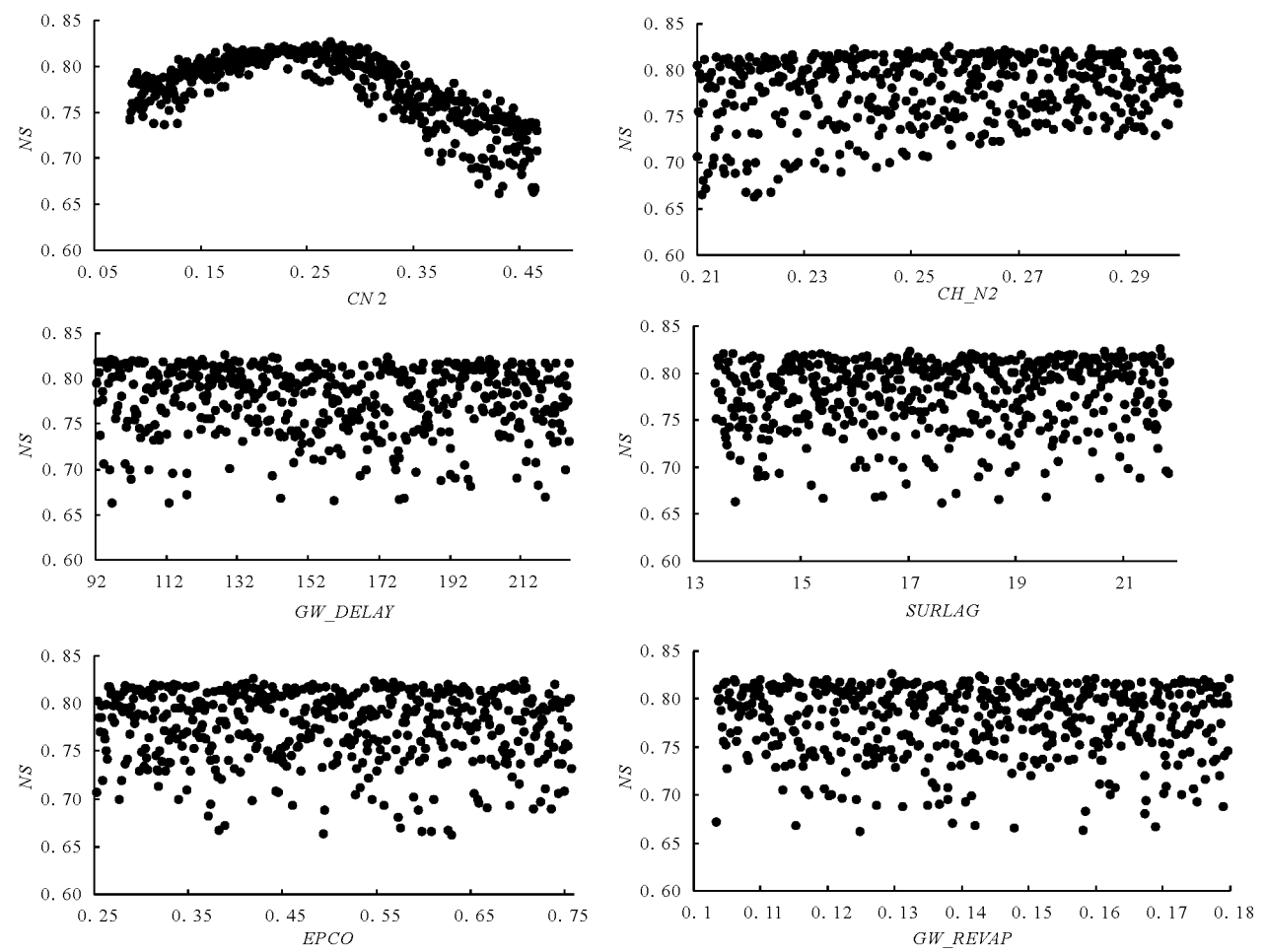


图 7 各参数值与目标函数值 *NS* 散点图

5 径流模拟结果分析

选用 Nash - Sutcliffe 效率系数 (NS) 及相对误差 (Re) 作为评价模拟值和实测值拟合效果的评价指标。由最佳模拟 (第 494 次) 对应的结果得到参数率定期实测、模拟的日径流量以及各评价指标如表 3 所列, 模拟值与实测值的拟合结果如图 8 所示。将率定期所获得的最终参数范围带入验证期进行 500 次计算, 即模型验证, 得到模型验证期实测、模拟的日径流量以及各评价指标亦如表 3 所示, 模拟值与实测值的拟合结果如图 9 所示。图 8、9 中的

95PPU 带 (95% Prediction Uncertainty) 是指通过拉丁超立方采样的输出结果在 2.5% 和 97.5% 分位数上的累积分布所得到的具有 95% 置信度的不确定性范围, 实测值落在此范围的比例越大代表模拟结果的不确定性越小。

表 3 率定期和验证期日径流模拟结果

时段	实测日径流量平均值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟日径流量平均值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	效率系数 NS	相对误差 $Re/\%$
率定期 (1969 - 1990)	1085.2	1100.4	0.83	1.40
验证期 (1991 - 2011)	1085.9	1092.2	0.83	0.58

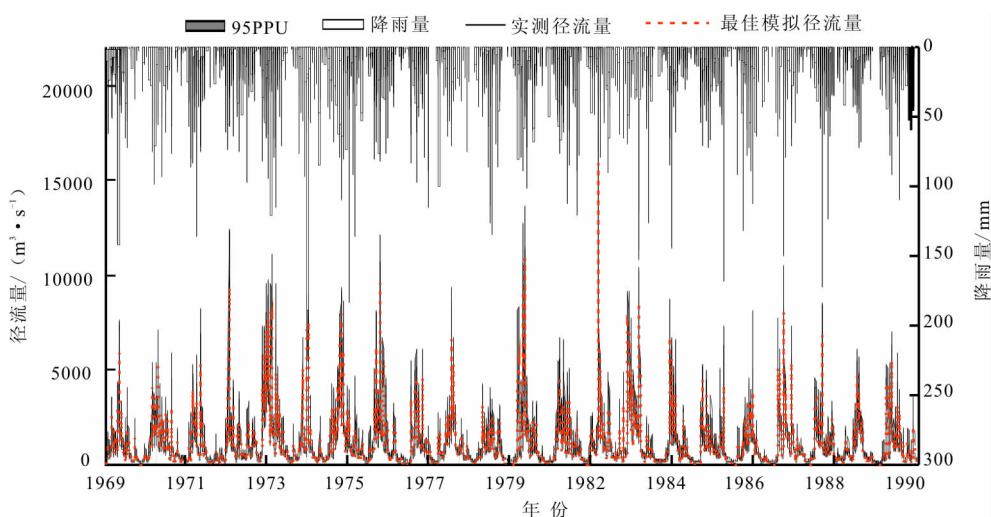


图 8 率定期 (1969 - 1990 年) 日径流模拟值与实测值拟合结果

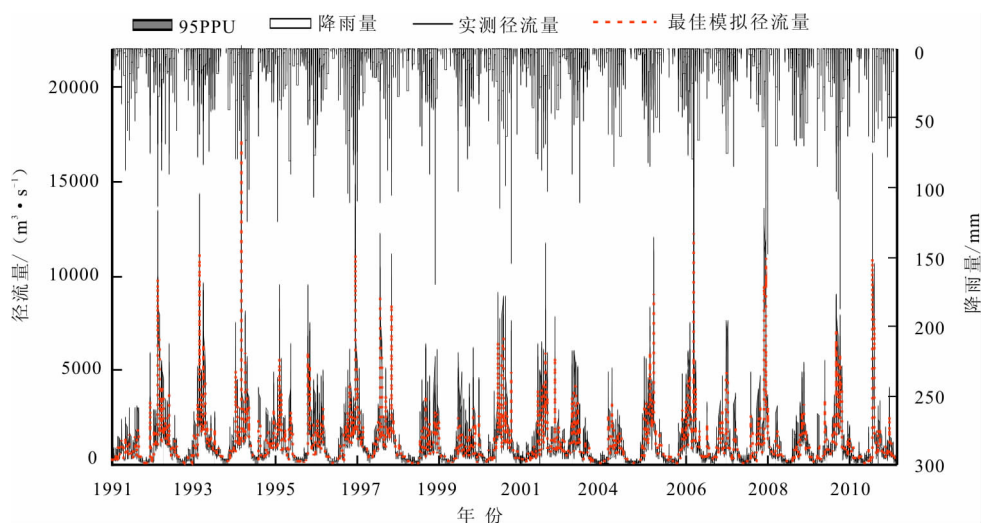


图 9 验证期 (1991 - 2011 年) 日径流模拟值与实测值拟合结果

由表 3 可知, 参数率定期实测日径流量平均值为 $1\,085.2\text{ m}^3/\text{s}$, 模拟日径流量平均值为 $1\,100.4\text{ m}^3/\text{s}$, 效率系数 0.83, 相对误差 1.40%; 模型验证期实测日径流量平均值为 $1\,085.9\text{ m}^3/\text{s}$, 模拟日径

流量平均值为 $1\,092.2\text{ m}^3/\text{s}$, 效率系数 0.83, 相对误差 0.58%。由图 8 和图 9 可以看出, 日径流量模拟和实测过程较为吻合, 且绝大部分径流实测值都落在 95PPU 带内, 模拟结果不确定性较小。

影响径流模拟结果的主要因素有水文气象数据精度、降雨空间分布及径流参数优化选取等,总体而言,本文采用 SUFI-2 方法对径流参数进行优化选取,获得了模型模拟和验证的较高精度,也表明本文所构建的 SWAT 模型适用于飞来峡流域的径流模拟,可为进一步研究该流域非点源污染负荷核算提供可靠的径流数据。

6 结 论

(1) 利用飞来峡流域的 DEM、土地利用、土壤类型及水文气象等资料构建了飞来峡流域 SWAT 径流模型,运用 SUFI-2 方法对其中 14 个参数进行敏感性分析,结果表明对飞来峡流域径流过程有显著影响的参数主要有 SCS 径流曲线系数、主河道的曼宁系数、地下水滞后系数以及地表径流滞后时间等。

(2) 飞来峡流域日径流量率定期和验证期效率系数均为 0.83,率定期和验证期相对误差分别为 1.40% 和 0.58%,模型模拟和验证精度均较高,表明本文所构建的 SWAT 模型具有良好的精度,可以为飞来峡流域非点源污染负荷核算提供可靠的径流数据。

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] 王慧亮,孙志琢,李叙勇,等. 非点源污染负荷模型的比较与选择[J]. 环境科学与技术,2013,36(5):176-182.
- [3] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment - Part 1: Model development[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1):91-101.
- [4] 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.
- [5] Emam A R, Kappas M, Abbaspour K C. Simulation of Water Balance Components in a Watershed Located in Central Drainage Basin of Iran[M]// Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle. John Wiley and Sons, Inc, 2013: 463-477.
- [6] Yesuf H M, Melesse A M, Zeleke G, et al. Streamflow prediction uncertainty analysis and verification of SWAT model in a tropical watershed[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9):1-16.
- [7] Zhang Ling, Karthikeyan R, Bai Zhongke, et al. Analysis of streamflow responses to climate variability and land use change in the Loess Plateau region of China[J]. *Catena*, 2017, 154:1-11.
- [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.
- [9] 苏 欢,董晓华,方燕琴,等. SWAT 在淮河上游地区径流模拟中的应用研究[J]. 人民长江,2016,47(8):18-22+38.
- [10] 刘 伟,安 伟,马金锋. SWAT 模型径流模拟的校正与不确定性分析[J]. 人民长江,2016, 47(15):30-35+62.
- [11] Chen Lixiang, Liang Zhongmin, Zhu Jinfeng. Application of SWAT Model to Runoff Simulation in Huangyahe Basin[J]. *Water Resources and Power*, 2011, 29(10):1-11.
- [12] Beven K, Binley A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction[J]. *Hydrological Processes*, 1992, 6(3):279-298.
- [13] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. SWAT: Model use, calibration, and validation[J]. *Transactions of the Asabe*, 2012, 55(4):1491-1508.
- [14] Yang Jing, Reichert P, Abbaspour K C, et al. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 358(1-2):1-23.
- [15] Wu Hongjing, Chen Bing. Evaluating uncertainty estimates in distributed hydrological modeling for the Wenjing River watershed in China by GLUE, SUFI-2, and ParaSol methods[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 76:110-121.
- [16] 张 巍,郑 一,王学军. 水环境非点源污染的不确定性分析方法[J]. 农业环境科学学报,2008,27(4):1290-1296.
- [17] Abbaspour K C. SWAT - CUP 2012: SWAT calibration and uncertainty programs - A user manual[R]. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Switzerland, 2011.