

基于 SUFI-2 优化算法和 SWAT 模型的 汾河流域月径流模拟

李紫妍^{1,2}, 刘登峰^{1,2}, 黄 强^{1,2}, 白 涛^{1,2}, 周 帅^{1,2}

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048;
2. 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:以黄河中游的汾河流域为研究区域,构建汾河流域 SWAT 分布式水文模型,采用 SUFI-2 优化算法进行参数敏感性分析、率定与不确定性分析,模拟了流域控制站河津水文站的月径流过程。结果表明:12 个水文参数对径流的模拟均有不同程度的影响,对径流影响量最大的为土壤层有效含水量、其次为径流曲线数,影响最小的为主河道河床曼宁系数;率定期和验证期 E_{ns} 值均达到了 0.80 以上,相对误差 R_e 均小于 20%,且确定性系数 R^2 均大于 0.85。汾河流域 SWAT 模型的月径流模拟效果较好,验证期较率定期落在不确定性区间的数量有所增加,表明验证期的径流模拟比率定期的径流模拟不确定性程度大。

关键词:SWAT 模型;参数敏感性;水文模拟;参数不确定性

中图分类号:P33

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2017)S1-0095-04

随着 3S 技术的发展,基于 DEM 的分布式水文模型已成为流域水文过程模拟的新的发展方向^[1]。分布式水文模型的最大特点是参数具有空间异质性,能够反映降水、蒸发等气象因素和地形、土壤、土地利用等下垫面因素的空间变异对流域水循环过程的影响^[2]。在众多水文水质模型中,SWAT 模型以其强大的功能、先进的模型结构和高效的计算能力,已经在世界各国的众多领域取得了极为广泛的应用,如水文过程模拟与分析^[3-4]、非点源污染控制与模拟^[5-6]、土地利用及气候变化的水文响应^[7]以及不确定性分析^[8]等。然而,随着水环境模型研究程度的不断深入,水文模型模拟的不确定性愈加突出,其主要受限于模型结构不确定性、参数不确定性、人为因素等方面,模型的模拟结果往往与实际结果存在一定的偏差^[9]。因此,引入不确定性分析方法可定量评价模型模拟结果的可靠性,以期为流域水资源管理部门提供有效的理论指导。

近年来,SWAT 分布式水文模型不确定性研究引起国内外学者广泛的关注^[10-12],对于 SWAT 模型不确定性的研究,研究者往往通过 SWAT 模型自带

的 SWAT-CUP 软件进行不确定性分析,其方法主要包括 SUFI-2、GLUE、Parasol 以及 PSO。Sellami 等^[13]采用 SUFI-2、GLUE 及 Parasol 等 3 种不确定性方法对模型模拟结果进行不确定性分析,结果表明,模型不确定性不仅和具体的案例有关,还和研究者选取的不确定性分析方法有很大的关系,明确地考虑输出数据对不确定性的影响可以缩小 95PPU 区间宽度;Khoi 等^[14]通过 SUFI-2、GLUE、Parasol 以及 PSO 等 4 种不确定性分析方法对越南某一流域应用 SWAT 模型进行径流模拟比较,结果表明 SUFI-2 能通过最少的模拟次数得到最佳的模拟结果和最小的不确定性置信区间;刘伟等^[15]以三峡库区大宁河流域建立 SWAT 模型,通过对比分析 SUFI-2 和 GLUE 两种参数不确定性方法的优劣,得出 SUFI-2 方法能通过更少的模拟次数得到更加的模拟效果和不确定性带。左德鹏等^[16]在渭河流域构建 SWAT 分布式水文模型,对渭河流域 1961—2008 年的月径流过程进行模拟,结果表明,28 个与水文相关的参数对径流均有不同程度的影响,在对渭河 5 个水文站(林家村、魏家堡、咸阳、临潼和华县)月径流模拟的过程中,咸阳、临潼和华县的模拟效果比较好,仅有林

基金项目:国家自然科学基金(51779203);陕西省自然科学基金基础研究计划(2016JQ5105);榆林市科技计划项目(2016-21)

作者简介:李紫妍(1994—),女,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail: liziyen94@163.com

通信作者:刘登峰,副教授,博士,E-mail: ldchn@126.com

家村和魏家堡站模拟效果偏差一些。相关研究多以湿润与半湿润流域为主,SWAT 模型在我国干旱半干旱地区的应用研究较少,对模型参数率定算法和不确定性分析方面的研究不多。本文以汾河流域为研究对象,应用 SWAT 模型对黄河中游汾河流域控制站河津水文站进行模拟,采用 SUFI-2 算法进行参数敏感性分析、率定与不确定性分析,识别出敏感的水文参数,以期 SWAT 模型在我国北方地区的应用提供参考。

1 研究区域概况及数据来源

汾河是山西省境内最大的河流,也是黄河第二大支流,发源于宁武县管涔山的雷鸣寺泉,纵贯山西省境中部,地跨忻州、太原、晋中、离石、临汾、运城 6 个地市,流经宁武、平遥、河津等 34 个县市,然后经河津汇入黄河,全长 716 km。汾河流域控制面积 39 741 km²,占山西全省面积的 25.3%。流域位于黄土高原之上,属于半干旱、半湿润温带大陆性气候,四季分明,气候南北差异较大,全流域多年平均降水量为 504.8 mm。

本文所用数据包括:DEM、土地利用和土壤类型数据和水文及气象测站数据等。DEM(1:250 000)、土地利用数据(1:100 000)和土壤数据(1:1 000 000)均来源于中国科学院东北地理与农业生态所遥感与信息中心,如图 1 所示。流域气象数据选取 1960—

2010 年近 50 a 的日序列数据。河津水文站的流量观测数据的系列是 1960—2010 年月的径流数据。汾河流域内及周边 13 个气象站、1 个水文站(河津)资料,流域气象站及水系空间分布见图 2。

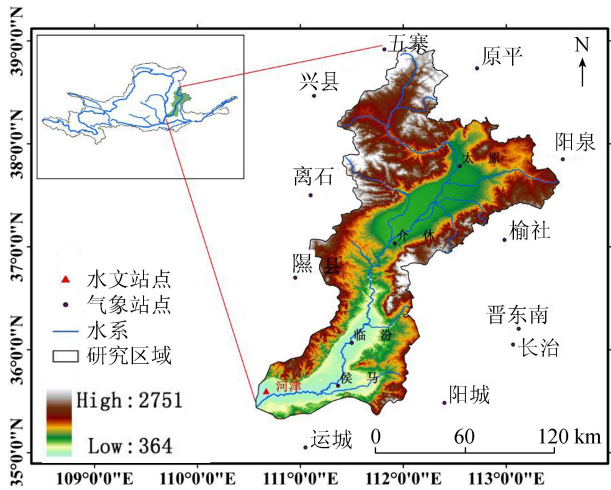


图 2 气象站点及水系空间分布

2 研究方法

2.1 参数敏感性分析

SWAT 模型参数众多,不同的参数对模型的敏感性不同,有些参数微小的改变对模型模拟结果起着举足轻重的作用^[17],因此,通过模型敏感性分析筛选剔除对模型结果影响较小的参数,提高运行效率,从而减少不确定性。本文通过 SUFI-2 算法中自带的敏感性、拉丁超立方随机抽样(LH-OAT)方法对模型影响径流的 12 种参数进行参数敏感性分析,通过 *t* 检验方法判断模型中各参数的敏感性,*t* 值越大、*P* 值越小,参数越敏感。

2.2 模型适用性评价指标

选用相对误差 *R_e*、确定性系数 *R*² 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 *E_{ns}* 等 3 个指标对模型的参数校准及验证结果进行评价,其计算公式分别为

$$R_e = \frac{\bar{Q}_{sim} - \bar{Q}_{obs}}{\bar{Q}_{obs}} \cdot 100\% \tag{1}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2} \tag{2}$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \tag{3}$$

式中: $\bar{Q}_{sim}$ 为模拟的平均流量; $\bar{Q}_{obs}$ 为实测的平均流量; $Q_{sim,i}$ 为第 *i* 次的模拟流量值; $Q_{obs,i}$ 为第 *i* 次的实测流量值;*n* 为实测数据个数。

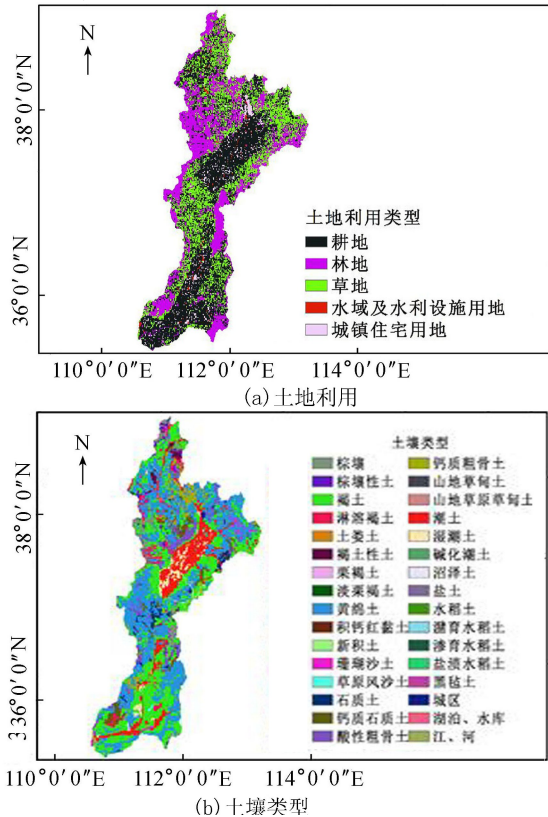


图 1 汾河流域土地利用及土壤类型

一般认为在月尺度下,当模拟值平均月径流与实测值平均月径流的相对误差绝对值 $|R_e| < 20\%$ 、 $E_{ns} > 0.5$ 和 $R^2 > 0.6$ 同时满足的情况下,最终评价结果的模拟精度符合标准^[18]。

2.3 SUFI-2 不确定性分析方法

本文选用 SUFI-2 算法作为参数估计的最优化算法,该算法同时考虑了参数、模型结构、输入数据等的不确定性,并将率定后的参数范围通过 95PPU 图可视化,即参数率定后 95% 置信水平上的不确定性区间,模拟结果总的不确定性通过拉丁超立方随机抽样中输出变量累计分布的 2.5% (L95ppu) 和 97.5% (U95ppu) 水平计算得到。

SUFI-2 算法采用以下两个指标来衡量率定及不确定性分析结果,其计算公式如下^[19]：

$$P = Q_{obs}/Q_{sim,95ppu} \tag{4}$$

$$R = \left[\sum_{l=1}^k (X_U - X_L)_l \right] / (k\sigma_X) \tag{5}$$

式中: P 为 95ppu 区间包含实测数据的百分率; R 为由实测数据标准差划分的 95ppu 区间的平均宽度; Q_{obs} 为实测流量; $Q_{sim,95ppu}$ 为落在 95% 置信区间的预测值; X_U 和 X_L 分别为模拟值累积分布的 97.5% 和 2.5%;为实测流量值 X 的标准差。理论上, P_f 的范围为 $0 \sim 1$, R_f 的范围是 $0 \sim +\infty$ 。当与分别为 1 和 0 时,表明实测数据与模拟结果拟合效果最好。

3 结果与分析

基于 SUFI-2 优化算法对 SWAT 模型的参数进行率定,率定后依据河津水文站实测径流数据进行模型验证,使用 R_e 、 R^2 、 E_{ns} 3 个指标评价 SWAT 模型在汾河流域的月径流序列模拟值。选定 1975—1976 年作为预热期,1977—1981 年为率定期,1982—1986 年为验证期。

3.1 参数敏感性分析

以 E_{ns} 为目标函数,通过 t 检验方法来判断各参数的敏感性,汾河流域构建的 SWAT 模型中跟径流有关的参数共有 12 个,各参数均具有其物理意义(表 1)。敏感性分析结果表明,各参数对径流均有不同程度的影响,对径流贡献量极大的为 SOL_AWC,该参数是土壤层有效含水量的反映,其值越大,土壤的蓄水能力越强;表明汾河流域径流模拟的优劣主要与 SOL_AWC 参数的选取有直接联系,第二敏感的参数为 CN2,该参数是下垫面特征的综合反映,直接决定径流量的大小,其值越大,下垫面的不透水性越强,径流量越大。第三敏感性的参数为 GWQMN,该参数表示发生回归流所需的浅层含水层的水位阈值,直接反应基流的大小和快慢,对水文

过程有重要影响,其他参数如 ALPHA_BF、GW_REVAP、GW_DELAYG 等对径流的影响也比较敏感。

表 1 参数敏感性分析结果及最佳值

参数名称	物理意义	t 值	P 值	最优值
r_SOL_AWC(.). sol	土壤层有效水容量 (mm(H ₂ O)/mm(soil))	-113.92	0.00	-0.24
v_GWQMN. gw	浅层含水层产生 “基流”的阈值深度/mm	-21.89	0.00	100.71
v_GW_REVAP. gw	浅层地下水 再蒸发系数	-6.41	0.00	0.08
v_GW_DELAY. gw	地下水延迟时间/d	-5.87	0.00	358.55
v_CH_K2. rte	主河道河床有效水力 传导度/(mm·h ⁻¹)	-0.83	0.41	83.53
v_CH_N2. rte	主河道河床曼宁系数	-0.16	0.87	14.92
v_SFTMP. bsn	降雪温度/℃	0.66	0.51	2.92
r_SOL_BD(.). sol	土壤饱和容重/ (mm·m ⁻³)	1.89	0.06	-0.39
r_SOL_K(.). sol	土壤饱和和水力传导度/ (mm·h ⁻¹)	4.19	0.00	0.80
v_ALPHA_BF. gw	基流 alpha 因子/d	16.47	0.00	0.45
v_ESCO. hru	土壤蒸发补偿系数	16.64	0.00	0.59
r_CN2. mgt	径流曲线数	66.65	0.00	-0.16

3.2 参数率定与模型验证

参数率定及验证结果见图 3 和表 2,率定期和验证期河津水文站月径流模拟值和实测值过程线总体拟合效果较好,月径流模拟值与实测值 R^2 均达到 0.85 以上, E_{ns} 效率系数均达到 0.80 以上,且验证期大于率定期,表明验证期的模拟效果较好;相对误差均小于 20%,表明率定期和验证期河津站的模拟效果满足模拟精度要求。综上所述,河津水文站以上汾河流域的 SWAT 径流模拟效果非常好,验证期优于率定期。

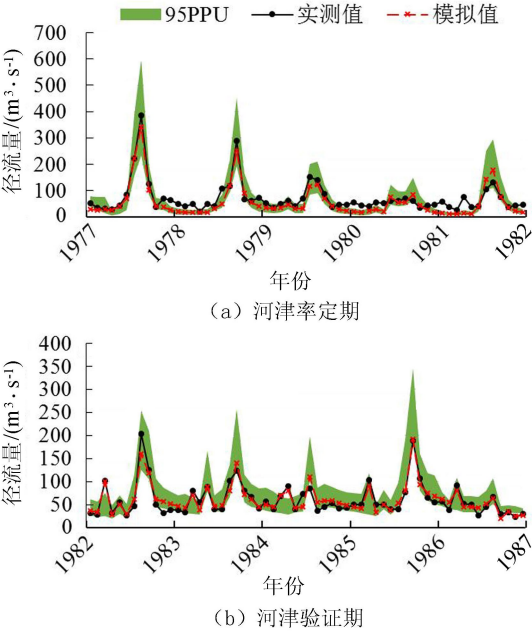


图 3 率定期和验证期河津水文站实测值与不确定性模拟区间月径流过程

3.3 不确定性分析

参数取值范围的改变会影响模拟分析的结果,较大的参数范围能够反映出参数对模拟结果的影响,较大的参数范围也产生较宽的不确定性区间,从而降低了模拟的置信水平,较小的参数范围可以获得较窄的不确定性区间且能够提高模拟的置信水平,但会降低参数变异的敏感性。本文通过 SUFI-2 算法的 2.5%~97.5% 区间作为 95% 不确定性区间(置信区间)。由表 2 可知,河津水文站率定期 P_f 和 R_f 分别为 0.52 与 0.33,表明实测径流值落在不确定区间的数量较少,大部分观测数据包含在置信区间内,验证期 P_f 和 R_f 分别为 0.60 和 0.42,较率定期观测数据落在不确定性区间的数量有所增加,且验证期产生了较宽的不确定性区间,表明验证期的径流模拟比率定期的径流模拟的不确定性大。

表 2 汾河流域河津水文站月径流模拟结果

水文站	模拟时段	R^2	E_{ns}	R_e	P_f	R_f
河津	率定期	0.89	0.81	12.28	0.52	0.33
	验证期	0.90	0.86	5.89	0.49	0.42

4 结 论

a. 参数敏感性分析结果表明,对该流域径流模拟影响较大的 3 个参数依次为土壤饱和含水量、径流曲线数以及浅层含水层产生“基流”的阈值,其余参数对径流模拟的影响量较弱。

b. 河津水文站率定期和验证期 E_{ns} 、相对误差 R_e 和确定性系数 R^2 均满足模型标准,其中率定期和验证期 E_{ns} 均达到了 0.80 以上,相对误差 R_e 均小于 20% 且 R^2 均大于 0.85,汾河流域 SWAT 模型月径流模拟效果较好。

c. 率定期和验证期河津水文站的 P_f 和 R_f 均较小,验证期较率定期落在不确定性区间的数量有所增加,表明验证期的径流模拟比率定期的径流模拟的不确定性大。

参考文献:

[1] 王中根, 刘昌明, 吴险峰. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2):168-173.

[2] 林炳青, 陈莹, 陈兴伟. SWAT 模型水文过程参数区域差异研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11):1988-1999.

[3] MILEWSKI A, SULTAN M, YAN E, et al. A remote sensing solution for estimating runoff and recharge in arid environments[J]. Journal of Hydrology, 2009, 373(1): 1-14.

[4] HOSSEINI M, AMIN M S M, GHAFOURI A M, et al.

Application of soil and water assessment tools model for runoff estimation[J]. American Journal of Applied Sciences, 2011, 8(5):486-494.

[5] SALEH A, ARNOLD J G, GASSMAN P W, et al. Application of SWAT for the Upper North Bosque Watershed [J]. Transactions of the Asae, 2000, 43(5):1077-1087.

[16] 秦耀民, 胥彦玲, 李怀恩. 基于 SWAT 模型的黑河流域不同土地利用情景的非点源污染研究[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2):440-448.

[7] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6):1559-1567.

[8] 李谦, 张静, 宫辉力. 基于 SUFI-2 算法和 SWAT 模型的妫水河流域水文模拟及参数不确定性分析[J]. 水文, 2015(3):43-48.

[9] 杨伟. SWAT 模型径流模拟的不确定性研究:以东苕溪上游小流域为例[D]. 杭州:浙江大学, 2014.

[10] 张余庆, 陈昌春, 杨绪红, 等. 基于 SUFI-2 算法的 SWAT 模型在修水流域径流模拟中的应用[J]. 水电能源科学, 2013(9):24-28.

[11] 宋增芳, 曾建军, 金彦兆, 等. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的石羊河流域月径流分布式模拟[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5):172-177.

[12] UNIYAL B, JHA M K, VERMA A K. Parameter identification and uncertainty analysis for simulating streamflow in a river basin of Eastern India[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(17):3744-3766.

[13] SELLAMI H, JEUNESSE I L, BENABDALLAH S, et al. Parameter and rating curve uncertainty propagation analysis of the SWAT model for two small Mediterranean catchments[J]. Hydrological Sciences Journal, 2013, 58(8): 1635-1657.

[14] KHOI D N, THOM V T. Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in a river catchment of Vietnam [J]. Global Ecology & Conservation, 2015, 4:538-548.

[15] 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.

[16] 左德鹏, 徐宗学. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的渭河流域月径流分布式模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(5):490-496.

[17] MULETA M K, NICKLOW J W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model [J]. Journal of Hydrology, 2005, 306(1/2/3/4):127-145.

[18] 郭军庭. 潮河流域土地利用/气候变化的水文响应研究[D]. 北京:北京林业大学, 2012.

[19] YANG J, 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):1-23.

(收稿日期:2017-12-03 编辑:徐 娟)