

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221150

SWAT 模型在大尺度流域的应用探索

刘 琨, 李梦杰, 吕振豫, 殷兆凯, 刘志武, 梁犁丽

(中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 100038)

摘要: 为检验 SWAT 模型在大尺度流域径流模拟的应用效果, 构建了巴西巴拉那河上游流域分布式水文模型并分析了模型的敏感性参数, 利用 17 个流量站进行模型参数率定和验证。结果表明, 土壤蒸发补偿系数和 SCS 径流曲线数是影响模拟的最敏感参数; 对于实测站点密度较大的子流域, 模型可以较好地模拟流域径流变化, 17 个流量站中有 11 个站的 R^2 值大于 0.5; 受降水数据不足和土地利用变化等因素的影响, 模型验证期表现不如率定期。可见 SWAT 模型可以作为大尺度流域的径流模拟工具, 但模拟精度很大程度上取决于降水数据质量。

关键词: 大尺度流域; SWAT 模型; 参数敏感性; 径流模拟

中图分类号: TV121.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)04-0035-04

1 概况

目前, SWAT 模型在小尺度流域应用效果较好, 但在大尺度流域的应用相对较少, 刘昌明等^[1]使用 SWAT 模型模拟了不同气候和土地覆被条件下黄河源区地表径流变化, 应用效果较好; 刘嘉佳等^[2]研究了子流域划分和 DEM 分辨率对大尺度流域径流模拟的影响, 发现对于特定流域存在最佳的流域划分尺度, 此时模型参数代表性最好; QIJ 等^[3]改进了 SWAT 模型的土壤冻融模块, 提高了密西西比河上游流域的月径流模拟精度。随着流域面积的增加, 积水面积阈值、气象数据代表性和模型参数等因素对模拟的影响更加复杂^[4]。因此, SWAT 模型在大尺度流域如巴西巴拉那河上游流域径流模拟的效果有待进一步的检验。巴西巴拉那河是南美洲仅次于亚马逊河的第二大河, 主源格兰德河源于巴西高原东南缘的曼蒂凯拉山北坡, 与巴拉那伊巴河汇合后, 始称巴拉那河。研究区域位于巴拉那河上游河段, 位于西经 $43^{\circ}35' \sim 55^{\circ}56'$ 、南纬 $15^{\circ}27' \sim 25^{\circ}39'$, 研究区出口位于巴西最大的水电站——伊泰普水电站上游约 90 km 处, 总面积约 $78.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 巴西境内巴拉那河上游流域主要支流包括格兰德河、铁特河及巴拉那帕内马河, 研究区地理位置及河流水系见图 1。研究区高程在 210~2 715 m 之间,

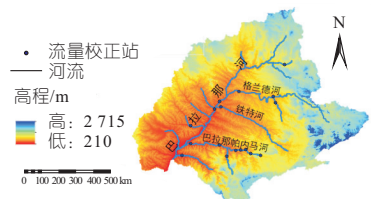


图 1 研究区地理位置及 DEM

Fig. 1 Location and the DEM of the study area

东部位于巴拉那高原上, 巴拉那河上游多丘陵、山地, 海拔超过 1 000 m; 自东北向西南地势逐渐平坦, 巴拉那伊巴河下游地区海拔仅 400 m 左右; 至福兹杜伊瓜苏/斯特罗埃斯纳总统港一带, 海拔仅约 200 m。研究区属亚热带湿润气候, 降水量时空分布不均, 四季皆有降水, 春、夏季(12 月至次年 5 月)多雨, 冬季(7~11 月)较干旱, 流域年均降水量约为 1 462 mm。针对巴西巴拉那河上游流域, 构建并率定了 SWAT 模型, 检验了 SWAT 模型在大尺度流域径流模拟的应用效果, 以为为该模型在湿润地区大尺度流域的应用提供技术支撑和参考。

2 模型及方法

2.1 SWAT 模型

基于地形数据, SWAT 模型^[5]将流域离散为子流域, 各子流域由河网连接。为了评估流域内土地覆被和土壤的空间异质性, 根据土地利用、土

收稿日期: 2022-05-30, 修回日期: 2022-06-28

作者简介: 刘琨(1991-), 男, 博士、工程师, 研究方向为水文水资源, E-mail: 1249091967@qq.com

壤类型和坡度的组合,将每个子流域进一步离散为水文响应单元。对于每个水文响应单元,分别模拟水文过程,包括地表径流和蒸散量等,再通过河网汇流到流域出口。

2.2 参数敏感性分析及率定方法

采用 SWATCUP2019 软件中的 LHS-OAT 方法^[6]进行参数敏感性分析。选取与流量相关的 20 个参数(表 1)进行分析,采用 t 、 P 值检验参数的敏感度。其中, t 值的绝对值越大说明该参数对模型敏感性越强; P 值取值范围为 0~1, 越接近于 0, 参数敏感性越强。

表 1 参数敏感性分析结果

Tab. 1 Parameter sensitivity analysis results

编号	参数名称	t 值	P 值	编号	参数名称	t 值	P 值
1	ESCO_hru	-17.86	0.00	11	ALPHA_BNK_rte	1.28	0.20
2	CN2_mgt	-40.15	0.00	12	CH_K2_rte	-1.09	0.28
3	ALPHA_BF_gw	-6.17	0.00	13	CANMX_hru	-1.06	0.29
4	SOL_AWC_sol	4.98	0.00	14	GWQMN_gw	1.04	0.30
5	GW_DELAY_gw	4.63	0.00	15	LAT_TTIME_hru	0.91	0.36
6	SOL_K_sol	-2.40	0.02	16	SURLAG_bsn	-0.71	0.48
7	RCHRG_DP_gw	2.04	0.04	17	HRU_SLP_hru	0.66	0.51
8	OV_N_hru	2.04	0.04	18	REVAPMN_gw	0.19	0.85
9	SLSUBBSN_hru	1.32	0.19	19	CH_N2_rte	0.17	0.87
10	EPCO_bsn	1.29	0.20	20	GW_REVAP_gw	-0.16	0.87

采用顺序不确定性拟合算法(SUFI-2)进行参数率定^[7]。SUFI-2 算法采用拉丁超立方体抽样法获得参数值代入模型进行模拟,通过 P 因子(95%不确定性区间内的观测数据的百分数)和 r 因子(95%不确定性区间上下限的平均距离与标准偏差的比值)评价参数不确定性程度, P 因子的理论值区间为 0~100%, r 因子的理论值区间为 0~+∞。当 $P=1, r=0$ 时,为完全理想的模拟结果。故常以 $P \rightarrow 1, r \rightarrow 0$ 的程度来评价模拟效果。

SUFI-2 算法首先定义较大的参数范围,然后按照 SUFI-2 算法运行要求,设定各参数范围、模拟次数、实测值和目标函数。最后,由程序进行多次迭代,依据迭代结果的目标函数调整参数范围,直至获得理想的迭代结果。

2.3 模型精度评价指标

采用相关系数(R^2)、Nash-Sutcliffe 系数(N_{NSE})和偏差系数(P_{PBias})评价模型的精度。

2.4 模型构建

2.4.1 模型数据及其处理

SWAT 模型需要输入数据包括气象、水文和物理变量。图 2 给出了使用数据的空间分布。气象数据包含最高、最低气温,平均风速、平均相对湿度、平均太阳辐射量等。由于未收集到相关实测数据,使用 CFSR 再分析数据的每日气象数据,其空间分辨率约为 38 km×38 km。实测降水数据来源于巴西国家水务局,选用 1995~2014 年具有 20 年以上连续资料的 922 个站点(图 2(a))。对于系列中存在短时间的缺失数据,采用模型自带的天气发生器生成。径流观测数据来源于巴西国家水务局,选取 17 个具有 20 年以上连续日流量观测数据的站点作为流量校正站(图 1)。

土地利用数据采用欧空局(ESA)的 GlobCover2009 数据集,其空间分辨率为 300 m×300 m。SWAT 模型中的土地利用类型按照美国地质调查局(USGS)定义,因此将 ESA 的 GlobCover2009 数据按照 USGS 标准重新分类,参考 RAFEE S 等^[8]将土地利用类型重分类为 6 种 SWAT 中对应的类型(图 2(b))。

土壤数据采用联合国粮农组织与维也纳国际应用系统研究所联合建立的标准化世界土壤数据库(HWSD)数据集,其空间分辨率为 1 km×1 km,研究区内共 13 种土壤类型(图 2(c))。土壤参数是 SWAT 模型最基本的参数,直接影响模拟精度。土壤有效含水率(mm)、土壤湿重度(g/cm^3)、饱和水力传导系数(mm/hr)和土层结构参数通过 SPAW 软件计算,使用 SWATeditor 工具将计算好的土壤特性参数输入 SWAT 土壤数据库中。

2.4.2 子流域划分

子流域的划分细度会影响径流模拟结果^[5],通过对比不同子流域划分数量的模拟结果,选择子流域集水面积阈值为 100 km²。根据研究区实际情况,人工添加 27 个子流域出口,最终将流域划分为 4 111 个子流域。根据土地利用、土壤类型和坡度在子流域占比阈值定义水文响应单元。

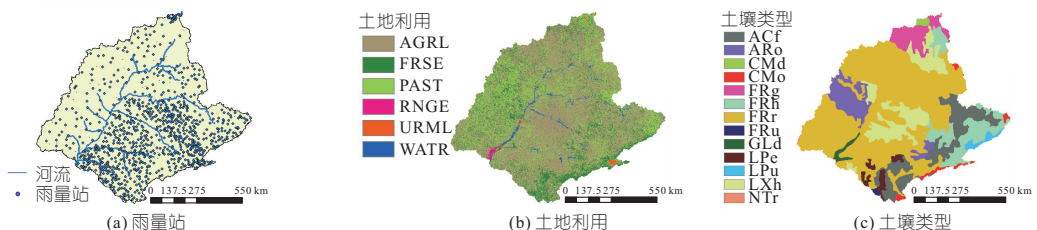


图 2 研究区雨量站、土地利用和土壤类型分布

Fig. 2 Distribution of rainfall stations, land use and soil types in the study area

土地利用、土壤和坡度对应的阈值分别设置为 20%、10%、20%，流域共划分了 13 535 个水文响应单元。

2.4.3 其他设置

由于流域内水电站大多为径流式电站，且未获得各水电站的相关调度信息，在建模过程中未考虑水电站调度对径流的影响。本文参数优化时迭代次数设置为 5 次，使最优解的范围不断缩小，最终得到参数最优解；模型率定期设置为 1997~2006 年，验证期设置为 2007~2014 年。

3 结果与分析

3.1 参数敏感性分析

根据所提参数敏感性分析方法，选取 20 个与径流相关的参数的敏感性分析结果，见表 1。由表 1 可知，在 20 个参数中，土壤蒸发补偿系数 (ESCO) 和 SCS 径流曲线数 (CN2) 是影响模拟效果的最敏感参数， t 值绝对值分别为 17.9、40.1， P 值均为 0。增加 ESCO 值，模拟径流减少，增加 CN2 的值，模拟径流增加。除平均坡度 (HRU_SLP)、浅层含水层再蒸发的水深阈值 (REVAPMN)、主河道曼宁系数 (CH_N2) 和地下水再蒸发系数 (GW_REVAP) 四个参数外，其余参数也较为敏感， t 值绝对值均大于 0.7， P 值小于 0.5。

3.2 模型率定验证结果

模型率定期为 1997~2006 年，其中 1995~1996 年设置为预热期。部分站点率定期径流模拟值与观测值对比见图 3，率定期径流模拟精度评价指标见表 2。由图 3 可知，模型经过率定后可以较好地模拟部分站点的径流动态变化，17 个校正站中有 11 个站的 R^2 值大于 0.5。但径流模拟的 N_{NSE} 值较低，仅 6 个站的 N_{NSE} 值大于 0.5，其中 EMBORCAÇÃO 和 FAZENDA BURITI 模拟精度最低， N_{NSE} 值为负值。

分析发现，模拟结果较好的 ROSANA、CAPIVARA、CANOAS I、CANOAS II 和 SALTO GRANDE 站点均位于巴拉那帕内马河上，由图 2(a) 可知，该区域雨量站密度较大，可为模型计算提供更准确的面雨量估计，从而取得较满意的模拟结果。然而，EMBORCAÇÃO 站点所在巴拉那巴河区域和 FAZENDA BURITI 所在的巴拉那河上游区域的实测雨量站的密度较低，因而使用的雨量站实测降水站点不能有效代表子流域的降水情况，导致径流模拟精度较低。

以 2007~2014 年为验证期，将率定后的模型

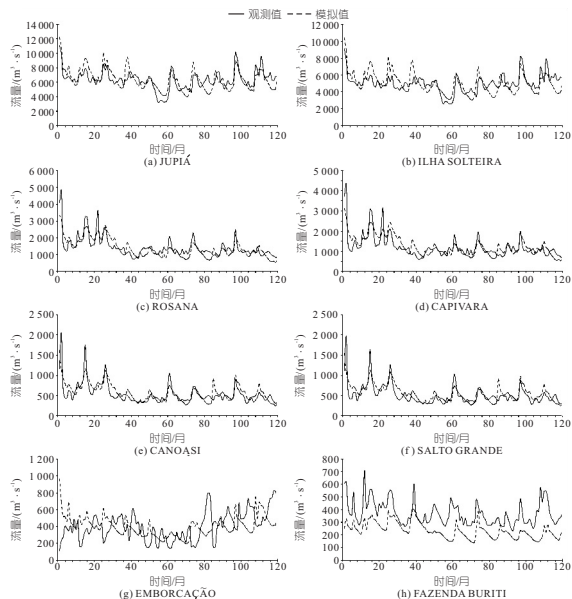


图 3 率定期径流模拟值与观测值对比

Fig. 3 Comparison of simulated and observed discharge in calibration period

表 2 率定期、验证期径流模拟精度评价指标

Tab. 2 Evaluation indicators of discharge simulations in calibration and validation period

时期	编号	站点	P 值	r 值	R^2	N_{NSE}	P_{PBIAS}
率定期	1	JUPIÁ	0.68	1.04	0.54	0.37	-1.4
	2	ILHA SOLTEIRA	0.60	1.00	0.41	0.10	-0.4
	3	ÁGUA VERMELHA	0.62	0.77	0.29	0.16	-11.1
	4	PORTO COLÔMBIA	0.36	0.33	0.50	0.25	-20.6
	5	TRÊS IRMÃOS	0.46	0.30	0.58	0.53	0.7
	6	ROSANA	0.94	2.50	0.65	0.63	5.6
	7	NOVO PORTO TAQUARA	0.76	1.31	0.52	0.48	4.1
	8	CAPIVARA	0.88	2.31	0.62	0.61	-2.9
	9	EMBORCAÇÃO	0.29	0.53	0	-0.60	-1.3
	10	CANOAS I	0.89	2.53	0.58	0.55	-4.7
	11	PONTE JOAQUIM JUSTINO	0.25	0.25	0.63	0.44	-15.1
	12	CAPIVARA JATAIZINHO	0.65	1.25	0.51	0.49	0.1
	13	CANOAS II	0.85	2.46	0.57	0.54	-7.6
	14	SALTO GRANDE	0.85	2.46	0.56	0.53	-6
	15	CHAVANTES	0.78	2.27	0.43	0.38	-6.2
	16	FAZENDA BURITI	0.13	0.65	0.27	-1.76	36.2
	17	JURUMIRIM	0.78	2.15	0.38	0.35	-2.4
验证期	1	JUPIÁ	0.58	0.47	0.28	0.12	-4.2
	2	ILHA SOLTEIRA	0.55	0.47	0.19	-0.13	-4.1
	3	ÁGUA VERMELHA	0.46	0.49	0.08	-0.17	-5.0
	4	PORTO COLÔMBIA	0.43	0.38	0.10	0.01	-5.0
	5	TRÊS IRMÃOS	0.21	0.04	0.38	0.21	-18.0
	6	ROSANA	0.39	0.04	0.58	0.39	-13.4
	7	NOVO PORTO TAQUARA	0.14	0.02	0.70	0.57	-0.9
	8	CAPIVARA	0.33	0.03	0.52	0.36	-13.8
	9	EMBORCAÇÃO	0.31	0.28	0	-0.35	-13.7
	10	CANOAS I	0.19	0.03	0.58	0.17	-24.2
	11	PONTE JOAQUIM JUSTINO	0.27	0.26	0.43	0.35	-4.0
	12	CAPIVARA JATAIZINHO	0.25	0.03	0.68	0.58	-4.5
	13	CANOAS II	0.20	0.03	0.58	0.33	-14.6
	14	SALTO GRANDE	0.24	0.03	0.44	0.36	-12.7
	15	CHAVANTES	0.21	0.03	0.57	0.29	-11.6
	16	FAZENDA BURITI	0.48	0.40	0.66	0.08	23.3
	17	JURUMIRIM	0.18	0.03	0.51	0.30	-7.8

参数进行验证，验证期径流模拟值与观测值对比见图 4，验证期各断面的径流模拟精度评价指标见表 2。

由图 4 可看出，验证期径流模拟效果不如率定期，17 个校正站中有 9 个站点的 R^2 值大于 0.5，其中多数站点位于巴拉那帕内马河上。径流模拟的纳什效率系数 N_{NSE} 值总体较低，只有 NOVO

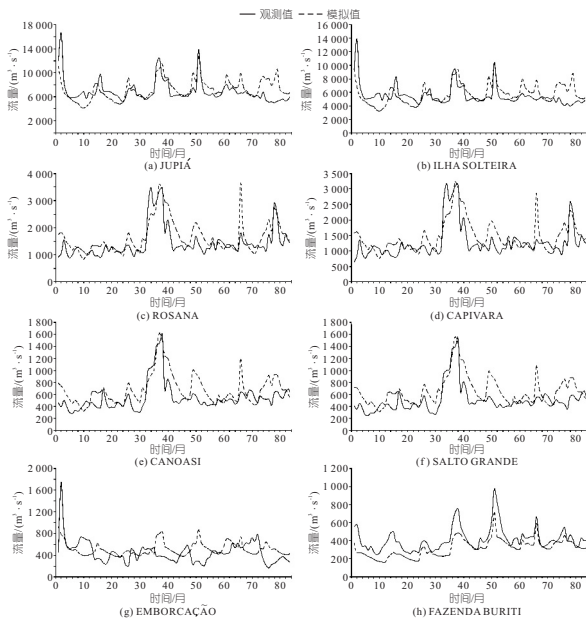


图 4 验证期径流模拟值与观测值对比

Fig. 4 Comparison of simulated and observed discharge in validation period

PORTO TAQUARA、CAPIVARA JATAIZINHO 站点的 N_{NSE} 值大于 0.5。原因可能是受实测降水站点不足影响；流域北部的子流域中 ILHA SOLTEIRA、ÁGUA VERMELHA、EMBORCAÇÃO 断面的 N_{NSE} 值均小于零，可能是实际情况中验证期与率定期内土地利用类型有所改变，而模拟中未考虑土地利用类型变化对径流模拟的影响。

4 结论

a. SWAT 模型可作为大尺度流域的径流模拟工具，在研究区 17 个流量站的应用结果显示，模型可以较好地模拟控制站以上流域的径流变化；土壤蒸发补偿系数和 SCS 径流曲线数是影响模拟结果的两个最敏感参数。

b. SWAT 模型在大尺度流域的模拟精度很大程度上取决于降水数据的质量，实测站点密度较大地区的模拟精度明显更高。对于实测站点密度较小的研究区西部子流域，后续将采用多源降

水融合数据来比较和定量分析实测站点多寡带来的模拟精度影响。

c. 大尺度流域径流模拟影响因素较多，下一步将继续分析 SWAT 模型在大尺度流域径流模拟中的限制因素，提高模型径流模拟精度。

参考文献：

- [1] 刘昌明, 李道峰, 田英, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 437-445, 541-542.
- [2] 刘佳嘉, 周祖昊, 严子奇, 等. 子流域划分及 DEM 分辨率对大尺度流域水文模拟效果的影响[C]//中国水利学会 2020 学术年会论文集第二分册. 2020: 37-42. DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.069772.
- [3] QI J, ZHANG X, WANG Q. Improving hydrological simulation in the upper mississippi river basin through enhanced freeze-thaw cycle representation [J]. Journal of hydrology, 2019, 571:605-618.
- [4] FERNANDEZ-PALOMINO C A, HATTERMANN F F, KRYSANOVA V, et al. A novel high-resolution gridded precipitation dataset for Peruvian and Ecuadorian watersheds: development and hydrological evaluation[J]. Journal of hydrometeorology, 2022, 23 (3):309-336.
- [5] ABBASPOUR K C, JING Y, MAXIMOV I, et al. Modelling of hydrology and water quality in the Pre-Alpine/Alpine Thur watershed using SWAT [J]. Journal of hydrology, 2007, 333(2-4): 413-430.
- [6] GRIENSVEN A V, MEIXNER T, GRUNWALD S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models [J]. Journal of hydrology, 2006, 324(1-4): 10-23.
- [7] ABBASPOUR K C, JOHNSON C A, GENUCHTEN M. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure [J]. Vadose zone journal, 2004, 3(4): 1340-1352.
- [8] RAFEE S, UVO C B, MARTINS J A, et al. Large-scale hydrological modelling of the upper Paraná river basin [J]. Water, 2019, 11(5): 882.

Application of SWAT Model in Large-scale Watershed

LIU Kun, LI Meng-jie, LV Zhen-yu, YIN Zhao-kai, LIU Zhi-wu, LIANG Li-li

(Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: A SWAT model of the upper Paraná River basin in Brazil was constructed to test its applicability in large-scale watershed. The sensitivity parameters of the model were analyzed. Then the model was calibrated and validated using 17 runoff stations. The results show that the soil evaporation compensation coefficient (ESCO) and the SCS runoff curve number (CN2) are the most sensitive parameters for the sub-basins with a high density of rain gauged stations, the model could simulate the discharge well after calibration, and the R^2 values of 11 stations among 17 calibration stations were greater than 0.5; Affected by factors such as insufficient precipitation data and changes in land use, the model in validation period did not perform as well as in the calibration period. Thus, the SWAT model could be used as an effective tool for large-scale watersheds, but the simulation accuracy largely depends on the quality of precipitation data.

Key words: large scale watershed; SWAT model; parameter sensitivity; discharge simulation