

SWAT 模型在东江流域的应用研究

林凯荣¹, 魏新平², 黄淑娴¹, 何艳虎¹

(1.中山大学水资源与环境系, 广东 广州 510275; 2.水利部水文局, 北京 100053)

摘要:以 SWAT 模型为研究工具, 对该模型在东江流域的 3 个子流域的适用性进行研究, 研究表明, SWAT 模型在东江流域 3 个子流域的适用性较好, 校准期(1970~1975 年)日径流模拟和月径流模拟的相对误差 Re 均在 10% 以内, 日径流模拟的决定系数 R^2 均在 70% 以上, 月径流模拟的决定系数 R^2 均在 80% 以上, Nash-Sutcliffe 效率系数基本达到 70%; 验证期(1976~1985 年及 1996~2005 年), 月径流模拟的决定系数 R^2 和 Nash-Sutcliffe 效率系数均在 70% 以上, 相对误差 Re 基本在 $\pm 20\%$ 以内, 可以满足该流域的水资源评价与规划的要求。

关键词: SWAT 模型; 水文模拟; 东江流域

中图分类号: P338

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2013)04-0032-05

变化环境下的水文水资源响应是当前水文科学研究的热点问题之一。20 世纪 90 年代, 美国农业部农业研究中心推出了以日为时间步长、以流域为尺度的具有很强的物理机制的分布式水文模型——SWAT 模型^[1]。该模型正是研究环境变化对流域水文水资源影响的有力工具; 东江作为珠江三角洲的重要水源, 其水资源及水文情势变化直接关系到区域生态改善和社会的健康发展。因此, 本文选择东江流域的顺天、岳城、蓝塘 3 个小流域作为研究对象, 旨在研究 SWAT 模型在东江流域的适用性, 在实践上为东江流域的水资源开发利用规划提供科学的工具。

1 研究区概况与资料

1.1 研究区概况

东江流域位于北纬 $22^{\circ}38' \sim 25^{\circ}14'$, 东经 $113^{\circ}52' \sim 115^{\circ}52'$, 地处珠江三角洲的东北地区, 南临南海, 毗邻香港, 西南为广州。流域的总面积约为 $35\,340\text{km}^2$, 多年平均雨量约为 $1\,500 \sim 2\,400\text{mm}$, 多年平均气温在 $20 \sim 22^{\circ}\text{C}$, 多年平均水面蒸发量约为 $1\,000 \sim 1\,400\text{mm}^{\text{[2]}}$ 。本文选取东江流域的顺天、岳城、蓝塘 3 个小流域作为研究对象。

1.2 数据资料

本文研究的气象数据采用东江流域的河源、惠阳、

深圳三大气象站 1953~2005 年的气象数据。此外, 还收集了河源、惠阳、深圳、广州等气象站的历年平均月日照百分率、平均日照时数等数据。水文数据选取 1970~1985 年、1996~2005 年 3 个研究子流域内各雨量站日降水以及顺天、岳城、蓝塘三站 1970~1978 年的日径流量、1970~2005 年的月径流量序列。空间数据包括: 分辨率为 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 的东江流域数字高程模型 (DEM), 东江流域 1980s 和 2000s 的土地利用类型图, 以及东江流域的土壤类型图。

2 模型数据库的建立

2.1 气象数据库

利用东江流域的河源、惠阳、深圳三大气象站 1953~2005 年共 53a 气象数据, 根据 SWAT 模型的要求, 建立起适用于东江流域的气象数据库。本次参数计算说明如下:

- (1) 月日均最高气温、月日均最低气温、月日均露点温度可由 SWAT 模型官网提供的 dew02 软件计算;
- (2) 月日均最高气温标准偏差、月日均最低标准偏差由 Excel 提供的 STDEV 函数计算, 月日均风速由 Excel 提供的 AVERAGE 函数计算;
- (3) 月总降水量均值、月日降水量标准偏差、月日

收稿日期: 2012-05-09

基金项目: 广州市珠江科技新星专项(2011J2200051); 广东省自然科学基金(S2011010001549); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3161395)

作者简介: 林凯荣(1980-), 男, 福建龙海人, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源方面的研究工作。E-mail: linkr@mail.sysu.edu.cn

均偏度系数、月内干日系数、月内湿日系数、月均降雨天数由 SWAT 模型官网提供的 pcpSTAT 软件计算。此外,月最大半小时降雨量参考文献[3]。

(4)太阳辐射量计算参考文献[4],具体公式如下:

$$Q=Q_0(a+bS_1) \quad (1)$$

式中: Q 为太阳辐射总量; Q_0 为天文辐射; a 、 b 为经验系数; S_1 为日照百分率。由于广东省只有广州、汕头两个辐射监测站,本次计算参考《广东省太阳总辐射的气候学计算及其分布特征》^[5]中广州站的 a 、 b 值,利用收集到的广州站的月日照百分率计算月太阳辐射总量,再结合河源站、惠阳站、深圳站的月日照百分率,推算出 3 个站点的月太阳辐射量,并计算月日均太阳辐射量。河源站气象数据库的各参数计算结果见表 1。

2.2 土壤数据库

根据下载的土壤类型图,以及我国的土壤分布情况,初步确定东江流域的土壤类型及其分布。土壤数据库中的参数值主要参考文献[5],部分难以获得的参数值,采用模型默认值。建立的东江流域土壤数据库如表 2 所示。

3 模型的校准及验证

3.1 评价指标

本研究采用 3 个评价指标用于模型的适用性研究,包括相对误差 Re , 决定系数 R^2 , 和 Nash-Suttcliffe 效率系数^[6]。

(1)相对误差 Re

$$Re = \frac{Q_p - Q_0}{Q_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Q_p 为模拟值; Q_0 为实测值。

(2)决定系数 R^2

R 为简单相关系数(也称皮尔逊相关系数),计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中: n 为样本量; X_i 、 \bar{X} 以及 Y_i 、 \bar{Y} 分别为两个变量的观测值和均值。 R 描述的是两个变量间线性相关强弱的程度。其取值在 $[-1, 1]$ 之间。

决定系数 R^2 是相关系数 R 的平方,取值在 $0 \sim 1$ 之间。 $R^2=1$ 表示模型模拟值与实测值刚好吻合, R^2 越小数据吻合程度越低。

(3)Nash-Suttcliffe 效率系数

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (4)$$

式中: \bar{Q} 为实测平均值; n 为实测数据个数;其他变量说明同上。

3.2 模型的校准

本文研究的 SWAT 模型以月模拟为主;同时考虑到月尺度序列较短,为了提高模型的模拟精度,在进行模型的校准时,以日模拟作为辅助。考虑到数据资料的完整性,利用 3 个流域 1970~1975 年的气象和水文资

表 1 河源站气象参数计算结果

Table 1 The result of meteorologic parameter calculation of the Heyuan station

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
月日均最高气温 / °C	18.19	18.80	21.98	26.10	29.59	31.32	33.30	33.21	31.79	28.90	24.50	20.19
月日均最低气温 / °C	8.76	10.53	14.14	18.65	22.15	24.12	24.96	24.78	23.33	19.46	14.71	10.12
月日均最高气温标准偏差	4.77	5.49	4.84	3.78	2.84	2.59	2.13	2.14	2.54	2.96	3.70	4.23
月日均最低气温标准偏差	3.70	4.00	3.78	3.01	1.97	1.39	0.93	0.97	1.59	2.79	3.55	3.68
月总降水量均值 / mm	50.31	92.17	136.95	224.35	322.95	384.51	213.32	228.01	157.87	53.93	35.38	35.84
月日降水量标准偏差	6.19	8.21	11.11	16.25	21.34	27.34	16.60	15.35	14.76	7.36	4.95	5.36
月日降水量偏度系数	7.50	4.26	4.76	3.42	3.91	5.14	4.92	3.85	5.46	6.80	6.24	8.20
月内干日系数	0.15	0.23	0.29	0.30	0.35	0.39	0.33	0.34	0.23	0.09	0.10	0.12
月内湿日系数	0.55	0.66	0.69	0.70	0.76	0.77	0.68	0.71	0.64	0.51	0.52	0.50
月均降雨天数	8.15	12.08	15.62	16.25	19.26	19.83	16.62	17.75	12.70	5.53	5.30	6.09
最大半小时降雨量 / mm	10.00	10.00	38.00	50.00	52.00	60.00	50.00	62.00	45.00	50.00	19.00	10.00
月日均太阳辐射量 / MJ·(m ² ·d) ⁻¹	9.24	8.31	10.20	11.52	11.96	12.08	14.65	14.18	13.38	13.70	11.36	9.71
月日均露点温度 / °C	8.38	10.58	14.53	19.05	22.67	24.78	25.66	25.72	23.48	18.71	13.90	9.53
月日均风速 / m·s ⁻¹	1.57	1.57	1.49	1.39	1.39	1.38	1.42	1.16	1.22	1.42	1.53	1.51

表2 东江流域土壤数据库

Table 2 The soil database for the Dongjiang River basin

名称	层数	SOL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SOL_CBN	CLAY	SILT	SAND	SOL_ALB	USLE_K
		土壤层深度/mm	土壤湿密度/g.cm ⁻³	土层可利用有效水	饱和水力传导系数/mm.hr ⁻¹	有机碳含量	黏土/%	壤土/%	沙土/%	地表反射率	土壤侵蚀力因子
赤红壤	1	80	1.6	0.1	6.9	1.1	28.2	23.6	48.2	0.01	0.3
	2	270	1.7	0.1	5.1	0.9	30.4	26.2	43.5	0.01	0.3
	3	1110	1.8	0.1	3.6	0.4	32.1	26.0	42.0	0.01	0.3
红壤	1	250	0.9	0.1	50.3	1.4	11.3	16.8	72.0	0.01	0.2
	2	1080	1.3	0.1	16.3	0.5	20.0	16.0	64.0	0.01	0.2
水稻土	1	130.9	1.1	0.1	23.1	1.4	15.9	36.6	47.5	0.01	0.3
	2	198.6	1.3	0.1	13.2	0.9	20.4	34.5	45.1	0.01	0.3
	3	992.6	1.1	0.1	21.3	0.5	15.1	30.7	54.2	0.01	0.3
黄壤	1	330	1.0	0.1	50.8	2.4	12.0	23.6	64.4	0.01	0.2
	2	950	1.3	0.1	15.0	0.8	20.1	24.6	50.3	0.01	0.3
黄红壤	1	260	1.0	0.1	33.0	1.2	14.0	22.2	63.8	0.01	0.2
	2	600	1.0	0.1	29.5	0.5	14.0	21.3	64.7	0.01	0.2
	3	900	1.0	0.1	28.2	0.3	14.0	21.3	64.7	0.01	0.2
紫色土	1	160	1.3	0.1	12.4	1.1	21.2	35.8	43.0	0.01	0.3
	2	620	1.7	0.1	4.6	0.7	30.4	35.3	34.3	0.01	0.3
潮土	1	100	0.9	0.0	102.6	0.4	4.1	13.7	82.2	0.01	0.2
	2	400	0.9	0.0	119.4	0.2	3.3	13.6	83.1	0.01	0.2
	3	1110	0.9	0.0	132.1	0.1	2.6	10.7	86.7	0.01	0.1
石质土	1	90	1.6	0.1	5.1	0.3	26.6	17.9	47.0	0.01	0.2
	2	140	1.3	0.1	11.9	0.2	20.4	15.9	56.8	0.01	0.2

表3 主要参数的最佳值

Table 3 The best values of the main parameters

参数		顺天流域	岳城流域	蓝塘流域
名称	含义			
CN2	SCS 径流曲线系数	50.883	36.566	41.371
ALPHA_BF	基流 α 系数	0.134	0.57	0.227
GW_DELAY	地下水滞后系数	142.454	92.052	220.822
GW_REVAP	地下水再蒸发系数	0.138	0.141	0.201
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.929	0.719	0.802
CH_N2	主河道曼宁系数	0.026	0.027	0.242
ALPHA_BNK	河岸基流 α 系数	0.799	0.038	0.928
SOL_AWC	土层可利用的有效水	0.321	0.559	0.515

料、1980s 的土地利用资料来进行日径流模拟以对模型进行校准。

在参数敏感性分析基础上,结合前人研究经验,选择对流域产流有影响的参数,利用 SWAT 官方网站提供的 swat-cup 软件,采用 suf2 方法,对模型进行校准。在模型校准过程中,结合模拟结果进行手动调整,尽量使产流量模拟值与实测值吻合。本次评价指标选用相对误差 Re , 决定系数 R^2 以及 Nash-Suttcliffe 效率系数,在模型校准时,作为辅助作用的日径流模拟率定精度评价: $R^2>0.6, NS>0.5$, 作为主要作用的月径流模拟率定精度评价: $Re<20%, R^2>0.7, NS>0.6$ 。

通过模型校准,3 个流域分别得到一套最佳参数值,主要参数的最佳值见表 3。校准后,3 个流域日径流模拟和月径流模拟的相对误差 Re 均在 10%以内;日径流模拟的决定系数 R^2 均在 70%以上,月径流模拟的决定系数 R^2 均在 80%以上;顺天、岳城流域的日径流模拟的 Nash-Suttcliffe 效率系数均在 70%以上,蓝塘略低,为 68.4%,3 个流域月径流模拟的 Nash-Suttcliffe 效率系数均在 80%以上,具体见表 4,校准结果基本符合要求。

3.3 模型的验证

考虑到本研究将利用 SWAT 模型进行 2011~2050

表 4 1970~1975 年 3 个流域校准结果

Table 4 The results calibration of the 3 subbasins from 1970 to 1975

评价指标	顺天流域		岳城流域		蓝塘流域	
	日模拟	月模拟	日模拟	月模拟	日模拟	月模拟
Re / %	7.9	7.8	5.5	5.4	4.1	4.2
R ² / %	72.1	94.8	74.9	91.8	70.9	86.6
NS / %	71.3	91.6	73.5	89.9	68.4	84.0

表 5 3 个流域验证结果

Table 5 The results validation of the 3 subbasins

评价指标	顺天流域		岳城流域		蓝塘流域	
	1976~1985	1996~2005	1976~1985	1996~2005	1976~1985	1996~2005
Re / %	2.5	10.3	6.0	3.3	-5.0	22.3
R ² / %	92.9	86.7	94.9	82.8	89.9	81.3
NS / %	91.6	84.7	94.3	82.6	87.1	75.1

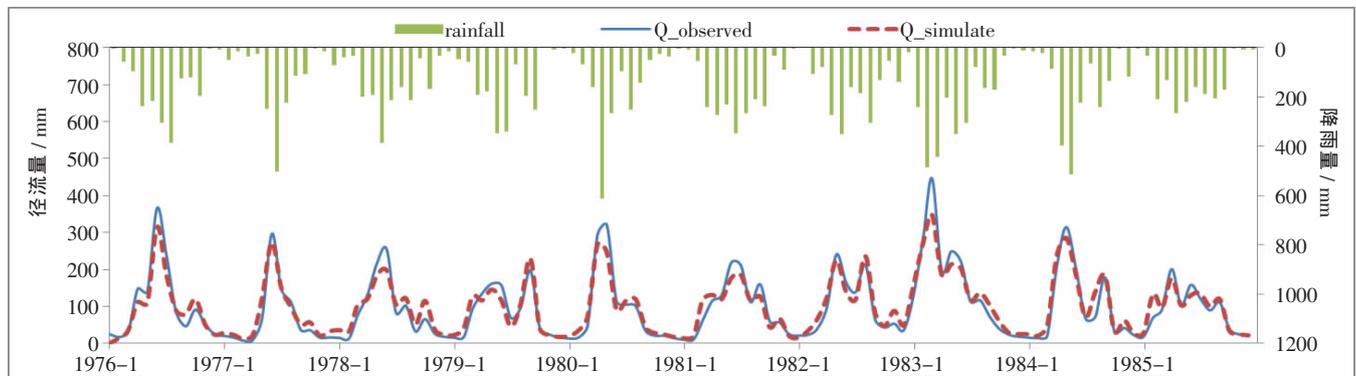


图 1 顺天流域 1976~1985 年月模拟验证效果图(1980s 土地利用类型)

Fig.1 The validation effect of the monthly runoff simulation for the Shuntian watershed from 1976 to 1985(1980s type of land use)

年的预测模拟，时间跨度较大，故本次采用 1976~1985、1996~2005 年两个验证期，共 20a 的气象和水文资料、1980s 和 2000s 的土地利用，对模型进行验证，以便更好地反映已建立的 SWAT 模型长时期模拟的效果。验证结果见表 5 和图 1~2。

3 个流域在两个验证期的月径流模拟中，决定系数 R² 和 Nash-Suttcliffe 效率系数均在 70% 以上，相对误差 Re 值除蓝塘流域 1996~2005 年为 22.3% 外，其余均在 ±20% 以内，可见验证结果较好。

4 结论

本文将 SWAT 模型应用到东江流域中的顺天、岳城、蓝塘 3 个小流域，选用 1970~1975 年为校准期，校

准后，3 个流域日径流模拟和月径流模拟的相对误差 Re 均在 10% 以内；日径流模拟的决定系数 R² 均在 70% 以上，月径流模拟的决定系数 R² 均在 80% 以上；顺天、岳城流域的日径流模拟的 Nash-Suttcliffe 效率系数均在 70% 以上，蓝塘略低，为 68.4%，3 个流域月径流模拟的 Nash-Suttcliffe 效率系数均在 80% 以上。此外，还选用 1976~1985 年以及 1996~2005 年两个验证期进行验证。3 个流域在两个验证期的月径流模拟中，决定系数 R² 和 Nash-Suttcliffe 效率系数均在 70% 以上，相对误差 Re 值除蓝塘流域 1996~2005 年为 22.3% 外，其余均在 ±20% 以内。研究结果表明，SWAT 模型在东江流域具有较好的适用性，可以满足流域的水资源评价与规划的要求。

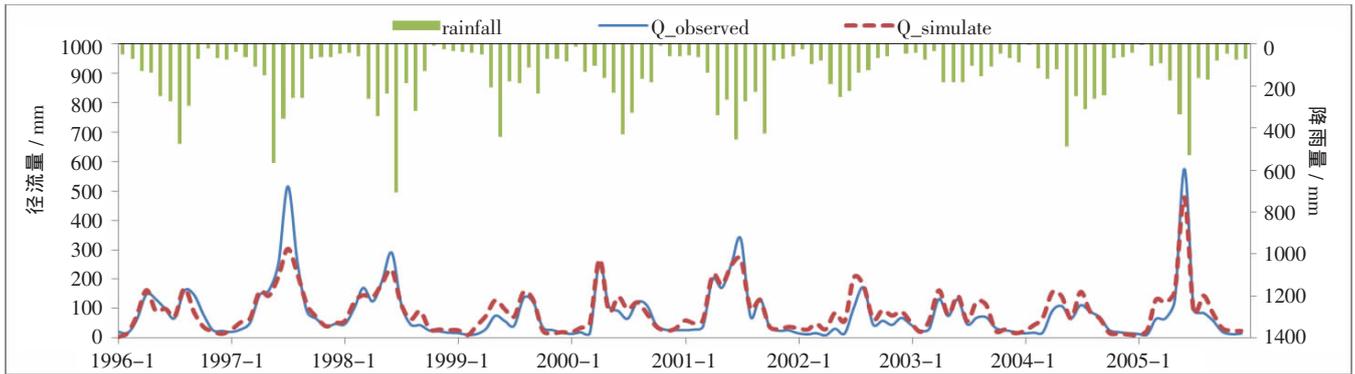


图2 顺天流域1996~2005年月模拟验证效果图(2000s土地利用类型)

Fig.2 The validation effect of the monthly runoff simulation for the Shuntian watershed from 1996 to 2005(2000s type of land use)

参考文献:

- [1] 陈军锋, 陈秀万. SWAT模型的水量平衡及其在梭磨河流域的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(2): 265-270. (CHEN Jun-feng, CHEN Xiuwan. Water balance of the SWAT model and its application in the Suomo basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis, 2004, 40(2): 265-270. (in Chinese))
- [2] 林凯荣, 何艳虎, 雷旭, 等. 东江流域1959-2009年气候变化及其对径流的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(12): 1783-1787. (LIN Kairong, HE Yanhu, LEI Xu, et al. Climate change and its impact on runoff during 1956-2009 in Dongjiang basin [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(12): 1783-1787. (in Chinese))
- [3] 谢毅文, 陈晓宏, 王兆礼, 等. 东江流域最大半小时降雨时空分布与年际变化特征分析[J]. 水文, 2009, 29(3): 32-36. (XIE Yiwen, CHEN Xiaohong, WANG Zhaoli, et al. Spatio-temporal distribution and change characteristics of maximum half-hour rainfall in Dongjiang River basin [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(3): 32-36. (in Chinese))
- [4] 杜尧东, 毛慧琴, 刘爱君, 等. 广东省太阳总辐射的气候学计算及其分布特征[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 66-70. (DU Yaodong, MAO Huiqin, LIU Aijun, et al. The climatological calculation and distributive character of global solar radiation in Guangdong province [J]. Resources Science, 2003, 25(6): 66-70. (in Chinese))
- [5] 广东省土壤普查办公室. 广东省土种志[M]. 广州: 科学出版社, 1996. (Soil Survey Office of Guangdong Province. Soil Type Records of Guangdong Province [M]. Guangzhou: Science Press, 1996. (in Chinese))
- [6] 肖军仓, 周文斌, 罗定贵, 等. 非点源污染模型-SWAT用户应用指南[M]. 北京: 地质出版社, 2010. (XIAO Juncang, ZHOU Wenbin, LUO Dinggui, et al. Non Point Pollution Source Model: SWAT Model User Application Guide [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010. (in Chinese))

Application of SWAT Model in Dongjiang River Basin

LIN Kairong¹, WEI Xinping², HUANG Shuxian¹, HE Yanhu¹

(1. Department of Water Resource and Environment, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Bureau of Hydrology, MWR, Beijing 100053, China)

Abstract: The applicability of SWAT model in the 3 subbasins of the Dongjiang River Basin was studied. The result shows that the SWAT model for the 3 subbasins performs well. In the calibration period (1970-1975), the relative errors (Re) of daily runoff simulation and monthly runoff simulation are within 10%, the coefficient of determination (R^2) of daily runoff simulation are more than 70%, those of monthly runoff simulation are more than 80%, and the Nash-Sutcliffe efficiency (NS) are above 70%. In the validation period (1976-1985 and 1996-2005), R^2 and NS of monthly runoff simulation are above 70%, Re of it are almost within $\pm 20\%$. It can meet the requirements of water resources evaluation and planning in the Dongjiang River Basin.

Key words: SWAT; hydrological simulation; Dongjiang River Basin