

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.015

系统微分响应参数率定方法在建阳流域 SWAT 模型中的应用

瞿思敏¹, 杨庆一¹, 郑何声园¹, 石 朋¹, 尚艳丽², 徐 瑶³, 宋兰兰¹, 郝庆庆¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 山东省泰安市水文中心, 山东 泰安 271000;
3. 江苏省水利科教中心, 江苏 南京 210003)

摘要:利用基于系统微分响应理论参数率定方法率定闽江建阳流域 SWAT 模型,通过流域 1992—2000 年日资料验证了该方法的实际应用效果,采用纳什效率系数(NSE)、偏差百分比(PBIAS)和相关系数 r 作为评价指标对率定后的 SWAT 模型模拟精度进行评价,并传统利用 SUFI-2 方法率定得到的 SWAT 模型模拟结果进行对比分析。结果表明:系统微分响应方法率定的参数在建阳流域的日径流模拟中表现较好,率定期和检验期 NSE 均为 0.65 以上,径流量 PBIAS 在 5% 以内, r 在 0.65 以上;利用系统微分响应率定参数方法率定 SWAT 模型参数在实际应用中可行,且效率与精度均高于传统的 SUFI-2 方法。

关键词:系统微分响应; SWAT 模型; 日径流模拟; 自动参数率定

中图分类号:TV121⁺.2; TV124 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0118-07

Application of system differential response parameter calibration method in SWAT model of Jianyang Basin// QU Simin¹, YANG Qingyi¹, ZHENG Heshengyuan¹, SHI Peng¹, SHANG Yanli², XU Yao³, SONG Lanlan¹, HAO Qingqing¹
(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Taian Hydrology Center of Shandong Province, Taian 271000, China; 3. Water Science and Education Center of Jiangsu Province, Nanjing 210003, China)

Abstract: The SWAT model of Jianyang Basin of Minjiang River is calibrated by the parameter calibration method based on the system differential response theory. The actual application effect of this method is verified by the daily data of the basin from 1992 to 2000. Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), percent bias (PBIAS) and correlation coefficient (r) are used as evaluation indicators to evaluate the simulation accuracy of SWAT model after calibration, and compared with the simulation results of SWAT model obtained by traditional calibration using SUFI-2 method. The results show that the parameters calibrated by the system differential response method perform well in the daily runoff simulation of Jianyang Basin, with NSE of more than 0.65, PBIAS of runoff within 5%, and r of more than 0.65 in the calibration and validation periods. It is feasible to use the system differential response parameter calibration method to determine the parameters of SWAT model in practical application, and the efficiency and accuracy are higher than the traditional SUFI-2 method.

Key words: system differential response; SWAT model; daily runoff simulation; automatic parameter calibration

流域水文模型是对自然界中复杂水文现象的一种概化,是水文水资源学科的重要研究领域之一,在水资源评价管理、水污染治理、水环境预测以及全球气候变化研究等方面应用广泛。随着计算机和空间离散技术的发展,能够准确反映降水和自然流域空

间异质性的的大尺度精细化分布式水文模型得到迅速发展。SWAT 模型是美国农业部农业研究中心研发的一个具有很强物理机制的分布式水文模型^[1],该模型利用遥感和地理信息系统提供的空间信息,分析研究区内土地利用和土壤类型的空间分布,来反

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC0409000);国家自然科学基金(52179011);浙江省水利厅科技项目(RA1903,RC1958,RB1926);中央高校基本科研业务费专项(2019B41014,2017B10914)

作者简介:瞿思敏(1977—),女,教授,博士,主要从事流域水文模拟及同位素水文研究。E-mail: wanily@hhu.edu.cn

通信作者:石朋(1976—),男,教授,博士,主要从事地貌单位线及流域水文模拟研究。E-mail: ship@hhu.edu.cn

映下垫面因素对流域水循环的影响。SWAT 模型具有计算效率高、模拟精度高的特点,在各研究领域得到了广泛的应用^[2-4]。以往的研究及应用结果表明,对水文模型起决定性作用的是模型结构和参数,当模型结构确定时选择客观、合理、高效的参数率定方法尤为重要。参数率定方法可分为人机交互率定和自动率定。人机交互参数率定方法费时费力,有很大主观性。参数自动率定方法更客观,也是增加模型可用性和易用性的重要途径。目前,绝大多数的自动率定方法是以误差平方和为目标函数,以不同的优化算法为基础从而在曲面上寻找最优值。自动率定方法可分为传统优化算法和现代优化算法。传统优化算法是一种基于单点迭代的局部优化方法,找到全局最优较为困难,比如单纯形法^[5]、Rosenbrock 方法^[6]等;现代优化算法在整个目标函数曲面上寻优,也称全局优化算法,更易找到全局最优值,比如遗传算法^[7]、SCE-UA 算法^[8]、粒子群算法^[9]等。但以误差平方和为目标函数曲面比参数函数曲面复杂,会增加局部不相关最优值,从而使计算过程复杂、效率低。基于系统微分响应的参数自动率定方法利用反演计算思想,直接在参数函数曲面上寻优,可以有效避免现有参数率定方法中存在的绝大多数问题^[10]。根据现有研究,基于系统微分响应的参数自动率定方法在新安江模型、SAC 模型、VIC 模型、垂向混合产流模型、HBV 模型的参数优化中均取得了较好的应用效果^[11-13],但尚未应用于 SWAT 模型。

本文构建闽江建阳流域 SWAT 模型,采用系统微分响应参数率定方法进行参数率定,并与传统的 SUFI-2 方法进行比较,探究该参数率定方法在建阳流域 SWAT 模型中的适用性和有效性。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

选择闽江上游的建阳站以上流域为研究区。建阳站以上流域控制面积 4 848 km²,流域范围为东经 117°31′~118°19′,北纬 27°10′~28°5′,地处福建省北部,属亚热带季风湿润气候,气候温和,雨量充沛,四季分明,降雨年内、年际变化较大,多年平均降水量 1 702 mm,降雨空间分布不均匀,总体趋势从北向南递减,多年平均径流系数 0.56。流域内植被较好,地下水埋深较浅,是典型的山丘区地形,洪水大多数由暴雨形成^[14]。研究区内有岭阳、坑口等 17 个雨量站和 1 个水文站(建阳水文站),站点分布见图 1。

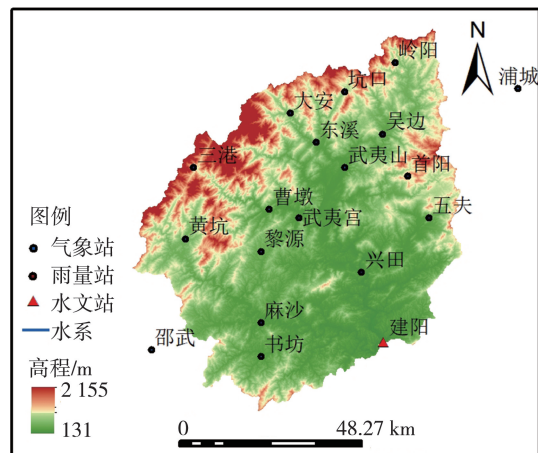


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

构建 SWAT 模型需要输入空间数据和属性数据。空间数据包括 DEM 数据、土地利用分布数据及土壤分布数据;属性数据则为研究区的水文气象数据。DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.Gscloud.cn/>),分辨率为 90 m × 90 m;土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,分辨率为 1 km × 1 km;土壤数据来源于南京土壤所第二次全国土地调查数据,分辨率为 1 km × 1 km。研究区内可用的水文气象资料有 17 个雨量站 1992—2000 年的日降水数据、建阳水文站的日流量数据以及研究区内及周边的气象站数据。由于气象站数据序列时间长短不一致,最终选取邵武、武夷山、浦城 3 个气象站点的数据用于构建 SWAT 模型的天气发生器。日尺度气象数据来源于中国地面气候资料日值数据集,日尺度雨量站及水文站数据来源于水文年鉴。

2 研究方法

2.1 SWAT 模型

SWAT 模型包含气象、水文、泥沙输移、营养物质、污染物等模块,本研究主要应用其水文模拟模块,结构示意图见图 2。水文模拟模块的地表径流量计算有两种计算方法:SCS 径流曲线法和 Green & Ampt 下渗法,本文采用 SCS 径流曲线法进行计算,计算公式为

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(D - 0.2S)^2}{(D + 0.8S)} \quad (1)$$

式中: Q_{surf} 为累计径流量或超渗雨量,mm; D 为降雨深,mm; S 为滞留参数,mm。

2.2 系统微分响应参数率定方法

系统微分响应参数率定方法是一种基于参数函数曲面的参数估计寻优方法^[12]。将水文模型看作

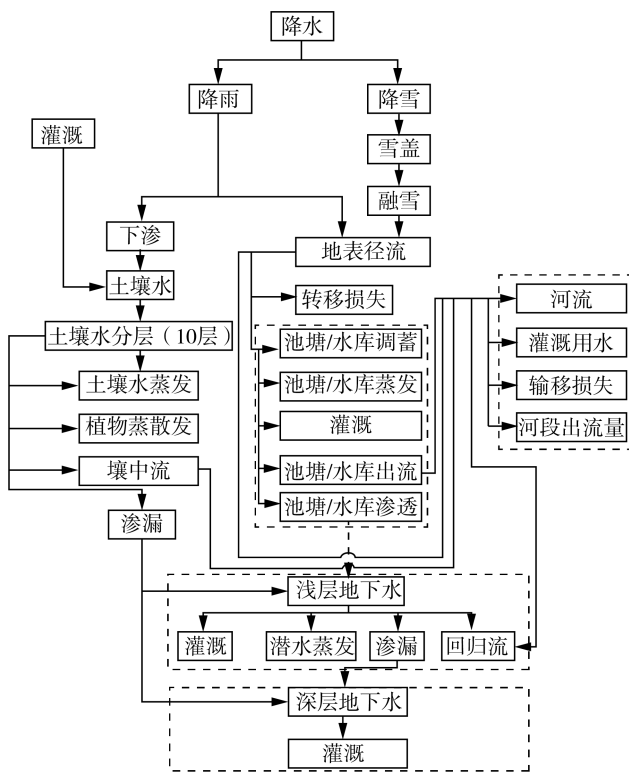


图2 水文模拟模块结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of SWAT model structure

函数 $Y = f(\theta, X)$, 模型输入自变量为实测值 X , 模型输出因变量为 Y , 参数为 θ 。对于一组实测样本 (X, Q) , 输入的自变量和每一个参数都会影响模型计算的出口断面流量过程, 当模型输入的自变量 X 固定不变后, 因变量 Y 即只随参数 θ 的改变而改变, 这便形成了定义在参数空间域上的函数曲面。一般情况下水文模型没有明确的数学表达式, 因此常用差分格式来计算偏微分。定义多参数函数 $Y(\theta) = f(\theta_i, X)$, 对自变量 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$, 进行微分可得:

$$dY = \frac{\partial f}{\partial \theta_1} d\theta_1 + \frac{\partial f}{\partial \theta_2} d\theta_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial \theta_n} d\theta_n \quad (2)$$

函数增量 dY_i 随参数增量 $d\theta_1, d\theta_2, \dots, d\theta_n$ 而改变, 称为参数增量的全微分系统响应。对式(2)中的微分向前差分可得:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial \theta_i} \right|_{\theta_i = \theta_{i,j}} = \frac{f([\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i + \Delta \theta_i, \dots, \theta_n]^T, X) - f([\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n]^T, X)}{\Delta \theta_i} \quad (3)$$

式中: $\theta_{i,j}$ 为参数 θ_i 的第 j 次率定; $\Delta \theta_i$ 为参数 θ_i 增加的一个微小量。用 $f_{i,j}$ 表示代入 $\theta_{i,j}$ 的函数值, 考虑所有参数的差分, 则式(3)可写为

$$f_{i,j+1} = f_{i,j} + \left. \frac{\partial f}{\partial \theta_i} \right|_{\theta_i = \theta_{i,j}} (\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j}) + \dots + \left. \frac{\partial f}{\partial \theta_n} \right|_{\theta_n = \theta_{n,j}} (\theta_{n,j+1} - \theta_{n,j}) \quad (4)$$

假设有 N 组实测样本 $(X_1, Q_1), (X_2, Q_2), \dots, (X_N, Q_N)$, 将其代入式(4)并用向量形式表示为

$$Q = f_j + s(\theta_{1,j+1} - \theta_{1,j}) + e \quad (5)$$

$$\left[\frac{\partial f(\theta_j, X_1)}{\partial \theta_1} \quad \dots \quad \frac{\partial f(\theta_j, X_1)}{\partial \theta_n} \right]$$

$$\text{其中 } s = \begin{bmatrix} \vdots \\ \frac{\partial f(\theta_j, X_n)}{\partial \theta_1} \quad \dots \quad \frac{\partial f(\theta_j, X_n)}{\partial \theta_n} \end{bmatrix}$$

式中: e 为实测矩阵 Q 与函数计算值矩阵 f_{j+1} 之间的偏差矩阵; s 为参数系统响应矩阵。

新参数 θ_{j+1} 应使误差平方和最小, 可得 θ_{j+1} 的最佳估计(式(6)), 具体的推导过程可参考文献[12]。

$$\theta_{j+1} = \theta_j + (s^T s)^{-1} s^T (Q - f_j) \quad (6)$$

系统微分响应方法率定水文模型参数的步骤为: ①输入实测数据并设置参数初值 θ_0 ; ②将参数 θ_j 代入模型计算得到一组输出 f_j , 并计算得到参数系统响应矩阵 s ; ③将参数代入式(6)中计算得到新参数 θ_{j+1} ; ④判断参数及模拟结果是否满足收敛条件, 是则退出率定, 否则令 $j = j + 1$, 跳转到步骤②继续循环。

3 结果与分析

3.1 SWAT 模型构建

对建阳流域空间数据进行剪裁和重分类, 土地利用类型和土壤类型重分类结果如图3(a)(b)。根据DEM、河网数据, 并选取1万hm²为给水区分阈值, 将建阳流域划分为31个子流域, 如图3(c)所示, 流域出口位于28子流域。根据土地利用数据、土壤类型数据、坡度并分别取10%的阈值进行叠加分析, 将建阳流域划分为171个水文响应单元。

3.2 理想模型应用

理想模型指输入、参数和输出均已知的模型。为验证系统微分响应方法是否能适用于SWAT模型的参数率定, 首先构建SWAT理想模型进行单参数率定验证。随机设定参数初值, 根据模型输入和输出, 采用系统微分响应方法进行参数寻优, 结果与给定的参数真值进行对比, 检验方法的有效性。根据郭晓英^[15]对闽江流域SWAT模型参数敏感性分析以及SUFI-2方法对于建阳流域综合分析, 最终选择SWAT模型中的CN2、CH_K2、SOL_K、SOL_AWC、HRU_SLP、GW_DELAY、ALPHA_BF和SLSUBBSN共8个参数来进行验证, 参数的物理意义、取值范围及参数真值见表1, 参数的初始值选为参数的下限。

图4为8个参数理想模型寻找真值的过程, 可

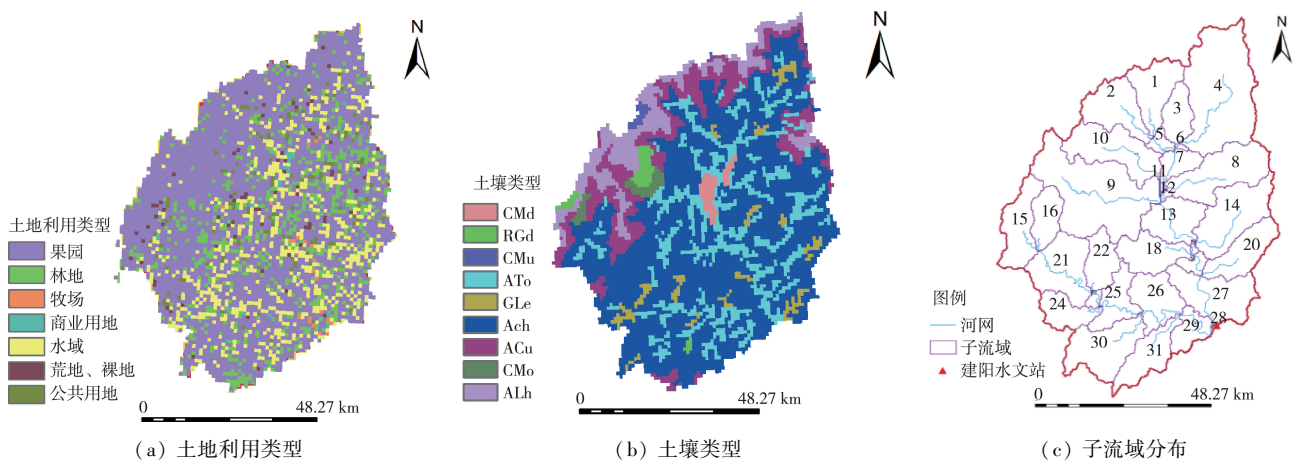


图 3 建阳流域空间数据重分类结果

Fig. 3 Reclassification results of spatial data in Jianyang Basin

表 1 参数取值范围及参数真值

Table 1 Value range and real value of parameters

参数	所属文件	参数物理意义	范围	真值
CN2	MGT	水分条件 II 时的初始 SCS 径流曲线数	-0.5 ~ 0.5	-0.002
CH_K2	RTE	主河道河床有效水力传导度	5 ~ 130	125.4
SOL_K	SOL	土壤饱和渗透系数	-0.8 ~ 0.8	0.37
SOL_AWC	SOL	土壤有效含水量	-0.5 ~ 0.5	0.43
HRU_SLP	HRU	平均比降	0 ~ 1	0.65
GW_DELAY	GW	地下水延迟时间	30 ~ 450	97.6
ALPHA_BF	GW	河岸调蓄基流消退系数	0 ~ 1	0.92
SLSUBSN	HRU	平均坡长	-0.5 ~ 0.5	0.069

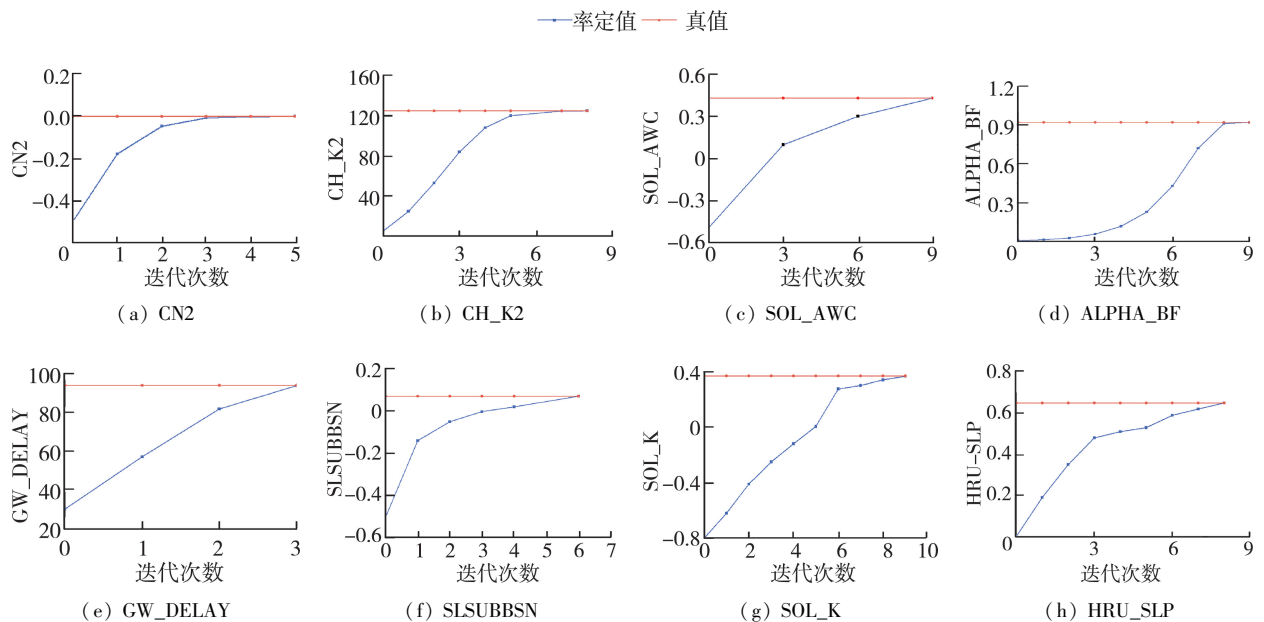


图 4 理想模型单参数率定结果

Fig. 4 Parameter calibration results of ideal model

见,各个参数经均能收敛到真值,并且迭代次数均在 10 次以内。其中,迭代次数最多的为参数 SOL_K, 迭代 9 次;迭代次数最少的为参数 SOL_AWC 和GW_

DELAY,只迭代了 3 次就寻找到了真值。而传统 SUFI-2 方法率定参数时有大循环和小循环之分, SUFI-2 方法对单参数进行率定时一般大循环 4 次,

即总率定 2 000 次达到最优值,率定效率低,时间长。从理想模型单参数检验可以看出,系统微分响应方法在理想模型单参数验证中表现较好,可以应用于 SWAT 模型的参数率定。

3.3 建阳流域 SWAT 模型参考率定方法对比

将系统微分响应方法用于建阳流域 SWAT 模型参数率定,并与常用的 SUFI-2 参数率定方法进行比较。采用建阳水文站 1992—2000 年的日径流数据进行参数率定和验证,对 SWAT 模型中 8 个敏感参数同时进行率定。将 1992 年设为预热期,模拟结果不计入目标函数,1993—1998 年为率定期,1999—2000 年为验证期。参数率定时以纳什效率系数(NSE)作为目标函数,当 NSE 趋于一个稳定值时结束循环,并设置最大迭代次数为 100 以防止迭代计算过程陷入死循环。SUFI-2 方法则借助 SWAT-CUP 软件进行模型参数的自动校准和验证。在 SWAT-CUP 中采用 SUFI-2 方法率定参数时,1 次迭代的模拟次数设为 500,通常不超过 4 次迭代即总模拟次数不超过 2 000 次就能获得较为满意的目标函数。而系统微分响应方法率定参数时,在第 6 次迭代时目标函数 NSE 便趋于稳定,两种参数率定方法具体计算过程见表 2。由表 2 可见,相比 SUFI-2 方法,系统微分响应方法率定参数能用较少的运行次数获得较好的目标函数,说明系统微分响应方法率定参数的效率更高。

表 2 两种参数率定方法率定过程对比

Table 2 Calibration process of two parameter calibration methods

系统微分响应方法		SUFI-2 方法	
迭代次数	NSE	模拟次数	NSE
0	0.23	1 ~ 500	0.67
1	0.49	501 ~ 1 000	0.69
2	0.60	1 001 ~ 1 500	0.70
3	0.64	1 501 ~ 2 000	0.71
4	0.71		
5	0.72		
6	0.72		

两种方法参数率定的结果见表 3。由表 3 可见,两种方法率定所得参数 CN2、CH_K2、SOL_AWC、SOL_K、SLSUBBSN 和 HRU_SLP 取值相差不大,参数 ALPHA_BF 和 GW_DELAY 相差略大。采用两种参数率定方法得到的参数模拟的径流过程统计结果见表 4。由表 4 可见,两种参数率定方法所得参数模拟的日径流过程效果相差不大,NSE 在率定期和检验期均在 0.65 以上,偏差百分比(PBIAS)均在 5% 以内,相关系数(r)在 0.65 以上。系统微分响应方法的 NSE 略高,SUFI-2 方法的 PBIAS 略低,两种方法的 r 相近。两种参数率定方法率定期和检验期的实测流量过程与模拟流量过程如图 5、图 6,可见,利用系统微分响应方法进行参数率定后的 SWAT 模型能较好地模拟建阳流域的日径流过程,具有较好的适用性。

表 3 两种参数率定方法参数最优值

Table 3 The optimal value of two parameter calibration methods

率定方法	CN2	CH_K2	SOL_AWC	ALPHA_BF	SOL_K	SLSUBBSN	GW_DELAY	HRU_SLP
系统微分响应方法	-0.48	110	0.09	0.76	0.75	-0.45	41	0.92
SUFI-2 方法	-0.48	106	-0.054	0.47	0.79	-0.41	71	0.98

表 4 两种参数率定方法模拟效果

Table 4 Simulation results of two parameter calibration methods

率定方法	率定期			检验期		
	NSE	PBIAS	r	NSE	PBIAS	r
系统微分响应方法	0.72	3.9	0.73	0.68	3.9	0.69
SUFI-2 方法	0.71	3.0	0.73	0.68	2.9	0.69

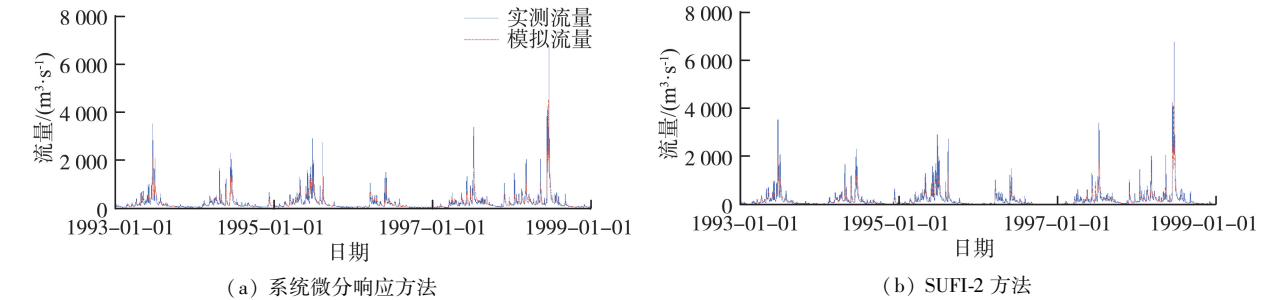
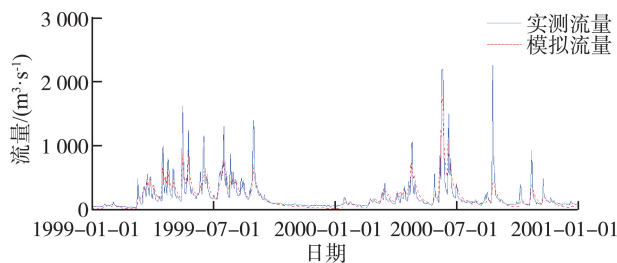
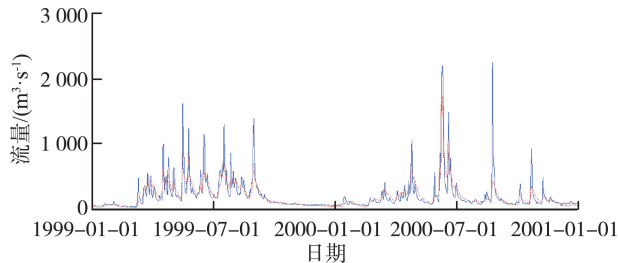


图 5 率定期 SWAT 模型结果

Fig.5 SWAT model results during calibration period



(a) 系统微分响应方法



(b) SUFI-2 方法

图 6 检验期 SWAT 模型结果

Fig. 6 SWAT model results during validation period

4 结 论

a. 理想模型验证结果表明,系统微分响应参数率定方法可行性高,能在迭代次数 10 次以内找到最优值;建阳流域实际应用表明,该方法用于 SWAT 模型参数率定时,稳定性好、效率高、精度高。

b. 由系统微分响应方法率定的 SWAT 模型能较好地模拟闽江检验流域的日径流,NSE 在率定期和检验期均在 0.65 以上,PBIAS 均在 5% 以内, r 在 0.65 以上。

c. 系统微分响应方法与 SUFI-2 方法对比结果表明,系统微分响应方法效率更高。

参考文献:

- [1] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment, part I: model development [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-79.
- [2] 叶加俊, 卢健涛, 银星黎, 等. 基于 SDSM-SWAT 模型的汉江上游径流变化模拟[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(4): 1-4. (YE Jiajun, LU Jiantao, YIN Xingli, et al. Simulation of runoff change in the upper reaches of the hanjiang river based on SDSM-SWAT model [J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(4): 1-4. (in Chinese))
- [3] BOURAOU F, BENABDALLAH S, JRAD A, et al. Application of the SWAT model on the Medjerda River Basin (Tunisia) [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30(8): 497-507.
- [4] 薛丰, 石朋, 胡健伟, 等. 降雨输入不确定性对 SWAT 模型径流模拟的影响研究[J]. *中国农村水利水电*, 2017(10): 23-27. (XUE Feng, SHI Peng, HU Jianwei, et al. Study on effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on runoff modeling based on SWAT model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(10): 23-27. (in Chinese))
- [5] 敖特根. 单纯形法的产生与发展探析[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(5): 861-864. (AO Tegen.

- Analysis of the formation and development of the simplex method [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2012, 42(5): 861-864. (in Chinese))
- [6] 邵鹏, 吴志健. 基于改进 PSO 算法的 Rosenbrock 函数优化问题的研究[J]. *计算机科学*, 2013, 40(9): 194-197. (SHAO Peng, WU Zhijian. Rosenbrock function optimization based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. *Computer Science*, 2013, 40(9): 194-197. (in Chinese))
- [7] 席裕庚, 柴天佑, 恽为民. 遗传算法综述[J]. *控制理论与应用*, 1996(6): 697-708. (XI Yugeng, CHAI Tianyou, HUI Weimin. Overview of genetic algorithms [J]. *Control Theory and Applications*, 1996(6): 697-708. (in Chinese))
- [8] HAPUARACHCHI H A P, 李致家, 王寿辉. SCE-UA 方法在新安江模型参数优化中的应用(英文)[J]. *湖泊科学*, 2001, 23(4): 304-314. (HAPUARACHCHI H A P, LI Zhijia, WANG Shouhui. Application of SCE-UA method for calibrating the Xinanjiang watershed model [J]. *Journal of Lake Science*, 2001, 23(4): 304-314. (in Chinese))
- [9] 陈国初, 俞金寿. 单纯形微粒群优化算法及其应用[J]. *系统仿真学报*, 2006(4): 862-865. (CHEN Guochu, YU Jinshou. Simplex particle swarm optimization algorithm and its application [J]. *Journal of System Simulation*, 2006(4): 862-865. (in Chinese))
- [10] BAO Weimin, ZHAO Liping. Application of linearized calibration method for vertically mixed runoff model parameters[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(8): 04014007.
- [11] 罗良丰, 包为民, 赖善证. 新安江模型函数曲面参数率定方法在水吉流域的应用[J]. *节水灌溉*, 2013(12): 48-51. (LUO Liangfeng, BAO Weimin, LAI Shanzheng. Xinanjiang model calibration based on parameter function surface in Shuiji Basin [J]. *Water Saving Irrigation*, 2013(12): 48-51. (in Chinese))
- [12] 陈学秋. 基于系统微分响应理论的 VIC 模型参数率定方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2019.
- [13] 赖善证, 瞿思敏, 包为民, 等. 函数曲面参数率定方法在 SAC 模型中的应用[J]. *水利学报*, 2014, 45(8): 973-

983. (LAI Shanzheng, QU Simin, BAO Weimin, et al. Application of parameter calibration method based on parameter function surface in SAC model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45 (8): 973-983. (in Chinese))
 - [14] 杨姗姗,包为民,杨小强,等.微分响应在降雨误差修正中的应用[J].中国农村水利水电,2015(1):75-79.
 - (YANG Shanshan, BAO Weimin, YANG Xiaoqiang, et al. The application of differential response in rainfall error correction[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015 (1):75-79. (in Chinese))
 - [15] 郭晓英.气候变化和人类活动对闽江流域径流的影响[D].福州:福建师范大学,2016.
 - (收稿日期:2022-02-06 编辑:王芳)
-
- (上接第 108 页)
- [25] 黄显峰,贾永乐,方国华,等.基于 PP-RVA 法的水电站下游河流水文情势评价[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):479-485. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua, et al. Hydrological regime evaluation of hydropower station downstream based on the PP-RVA method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(6):479-485. (in Chinese))
 - [26] 王鹏,华祖林,褚克坚,等.高度城镇化地区河网水系生态调控方案[J].水资源保护,2022,38(1):205-212. (WANG Peng, HUA Zulin, CHU Kejian, et al. Ecological regulation scheme of river network and water system in highly urbanized areas [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):205-212. (in Chinese))
 - [27] 邹磊,夏军,张印,等.海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J].水资源保护,2021,37(1):53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):53-60. (in Chinese))
 - [28] 雷红富,谢平,陈广才,等.水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J].水电能源科学,2007,25(4):36-40. (LEI Hongfu, XIE Ping, CHEN Guangcai, et al. Comparison and analysis on the performance of hydrological time series change-point testing methods[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(4):36-40. (in Chinese))
 - [29] 魏健,潘兴瑶,孔刚,等.基于生态补水的缺水河流生态修复研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):64-69. (WEI Jian, PAN Xingyao, KONG Gang, et al. Study on ecological restoration of water-deficient rivers based on ecological water supplement method [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(1):64-69. (in Chinese))
 - [30] 康玲,黄云燕,杨正祥,等.水库生态调度模型及其应用[J].水利学报,2010,41(2):134-141. (KANG Ling, HUANG Yunyan, YANG Zhengxiang, et al. Reservoir ecological operation model and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2):134-141. (in Chinese))
 - [31] 郭利丹,夏自强,李捷.河流生态径流量常用计算方法的对比[J].人民黄河,2008,30(4):28-30. (GUO Lidan, XIA Zhiqiang, LI Jie. Comparison of common calculation methods for river ecological runoff [J]. Yellow River, 2008, 30(4):28-30. (in Chinese))
 - [32] 吴恒卿,黄强,徐炜,等.基于聚合模型的水库群引水与供水多目标优化调度[J].农业工程学报,2016,32(1):140-146. (WU Hengqing, HUANG Qiang, XU Wei, et al. Multi-objective optimal operation for multi-reservoirs for water diversion and supply by using aggregation model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1):140-146. (in Chinese))
 - [33] 负汝安,董增川,王好芳,等.基于 NSGA2 的水库多目标优化[J].山东大学学报(工学版),2010,40(6):124-128. (YUN Ru'an, DONG Zengchuan, WANG Haofang, et al. Multi-objective optimization of a reservoir based on NSGA-II [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2010, 40(6):124-128. (in Chinese))
 - [34] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):190-197.
 - [35] 王学斌,畅建霞,孟雪姣,等.基于改进 NSGA-II 的黄河下游水库多目标调度研究[J].水利学报,2017,48(2):135-145. (WANG Xuebin, CHANG Jianxia, MENG Xuejiao, et al. Research on multi-objective operation based on improved NSGA-II for the lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(2):135-145. (in Chinese))
 - [36] 金文婷,王义民,白涛,等.枯水年引汉济渭并联水库多目标调度及决策[J].水力发电学报,2019,38(2):70-83. (JIN Wenting, WANG Yimin, BAI Tao, et al. Multi-objective operation and decision making of parallel reservoirs for Hanjiang-to-Weihe Water Diversion Project in dry years [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(2):70-83. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-01-13 编辑:王芳)