

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.05.002

基于 SCE-UA 算法的新安江模型参数优化及应用

董洁平,李致家,戴健男

(河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

摘要:为了减小水文模型参数优化中人工试错法和局部优化法的不确定性,以一种快速有效的优化方法搜索到水文模型参数的全局最优解。以安徽呈村流域为例,使用 SCE-UA 算法对新安江模型参数进行优化,日模型和次洪模型分别采用总体水量误差和对数绝对值误差作为目标函数,分析优化结果并对优化参数进行检验。经检验分析,日模型检验期确定性系数均达到 0.8,次洪模型检验期确定性系数接近 0.9。研究结果表明,采用 SCE-UA 算法优化新安江模型参数可以取得较好结果,目标函数的选择对参数优化有着重要作用。

关键词: SCE-UA 算法;新安江模型;参数优化;安徽呈村流域

中图分类号: P333.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2012)05-0485-06

Application of SCE-UA algorithm to optimization of Xin 'anjiang model parameters

DONG Jieping, LI Zhijia, DAI Jiannan

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to find the globally optimal parameters of a hydrological model rapidly and effectively, and to reduce the uncertainty caused by the manual trial and error and local optimization methods, a case study was conducted in the Chengcun watershed, in Anhui Province, using the SCE-UA algorithm to optimize the parameters of the Xin 'anjiang model. The total water quantity balance error and logarithm absolute error were chosen as the objective functions of daily simulation and hourly simulation, respectively. The optimized parameters that were verified show that the Nash-Sutcliffe coefficient was 0.8 for daily simulation and approximately 0.9 for hourly simulation in the validation period. The results show that the SCE-UA algorithm is capable of optimizing the Xin 'anjiang model parameters, and the selection of the objective function is important for parameter optimization.

Key words: SCE-UA algorithm; Xin 'anjiang model; parameter optimization; Chengcun watershed in Anhui Province

随着计算机技术的发展,洪水预报和水资源管理等众多领域开始逐渐借助流域水文模型进行预报和管理。模型模拟的效果除了和模型结构合理性有关以外,还与模型参数的选择有重要关系。水文模型参数分为物理参数与过程参数 2 类,物理参数代表着流域可以测量的物理特征,如流域面积,过程参数代表着不能直接测量的物理特征,过程参数必须进行率定。一般来说,水文模型参数的率定方法主要有手工试错法和自动优化法。手工试错法率定模型参数主要依据个人主观评估模拟结果,很大程度上依赖调试人员的经验,从而增加了模型的不确定性;自动优化方法是随着计算机技术和应用数学的发展而迅速发展起来的参数率定方法,应用于水文模型参数率定的自动优化方法主要可以分为局部优化方法和全局优化方法^[1]。由于流域水文模型大多是非线性的,局部优化算法受起始点影响较大,对于不同的起始点会在不同的点结束运算,从而带来不同的优化结果。赵人俊等^[2]在进行新安江模型的参数率定时发现由于参数之间的相关最优不是一个点,而是一个面。因此局部优化算法明显不适用于此类模型,参数的率定必须用全局优化方法进行计算。水

文模型参数的全局优化具有搜索策略的局限性、目标函数的不连续性、参数间的高度非线性相互作用和影响等特征,从而使优选过程非常复杂,难以收敛到全局最优解^[3-4]。

20世纪90年代由美国亚利桑那大学 Duan 等^[5-6]、Sorooshian 等^[7]提出的单纯多边形进化算法(SCE-UA 算法)结合了包括基因算法在内的一些现有算法的优点,是一种以信息共享和生物演化规律为基础的非线性混合算法。马海波等^[8]将 SCE-UA 算法用于优化 TOPMODEL 参数,徐冬梅等^[9]采用 SCE-UA 算法估计马斯京根模型参数,雷晓辉等^[10]在分布式水文模型 EasyDHM(II)中运用 SCE-UA 算法进行参数优化,取得了较满意的结果,说明 SCE-UA 算法是一种能解决高维参数全局优化问题的有效算法。笔者以安徽呈村流域为例,用 SCE-UA 算法对新安江模型进行了参数优化。

1 新安江模型简介

新安江模型是由赵人俊教授研制的一个具有世界影响力的水文模型,广泛应用于我国的湿润和半湿润地区。新安江模型根据降水和下垫面的水文、地理情况将流域分为若干个单元。对每个单元流域做产汇流计算,得出单元流域的出流过程,再将每个单元面积预报的流量过程演算到流域出口,然后叠加起来即为整个流域的预报流量过程。该模型采用3层蒸散发模式计算流域蒸散发,按蓄满产流概念计算降雨产生的总径流量,采用流域蓄水曲线考虑下垫面不均匀对产流面积变化的影响。径流成分按三水源划分饱和和地面径流、壤中流和地下径流。河网汇流一般采用分段连续演算的 Muskingum 法或滞时演算法^[11]。

2 SCE-UA 算法简介

SCE-UA 算法是在1965年 Nelder 和 Mead 的单纯形算法基础上由自然界中的生物竞争进化原理和基因算法的基本原理等概念综合而成,是一种有效地解决非线性约束最优化问题的方法,可以一致、有效、快速地搜索到水文模型参数全局最优解。SCE-UA 算法被认为是流域水文模型参数优选中最有效的方法,在流域水文模型参数优选中应用十分广泛。

SCE-UA 算法的参数虽然较多,但绝大部分取值都可以采用已有研究成果的默认值,只有复合形个数 p 需要根据具体问题确定。根据文献[6]推荐 $m = 2n + 1$, $q = n + 1$, $s = pm$, $\alpha = 1$, $\beta = 2n + 1$ 。其中 n 为参数个数, m 为每个复合形顶点个数, q 为每个子复合形顶点数, s 为种群大小, α 和 β 为父代产生的子代个数及代数。算法具体步骤如下^[7,12]:

a. 初始化。假定待优化问题是 n 维问题,选取参与进化的复合形个数 p ($p \geq 1$) 和每个复合形所包含的顶点数目 m ($m \geq n + 1$), 计算样本点数目 s 。

b. 产生样本点。在可行域内随机产生 s 个样本点 x_1, \dots, x_s , 分别计算每一点 x_i 的函数值 $f_i = f(x_i)$, $i = 1, \dots, s$ 。

c. 样本点排序。把 s 个样本点 (x_i, f_i) 按函数值升序排列,排序后仍记为 (x_i, f_i) , $i = 1, \dots, s$, 其中 $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_s$, 记 $D = \{(x_i, f_i) | i = 1, \dots, s\}$ 。

d. 划分复合形群体。将 D 划分为 p 个复合形 A_1, \dots, A_p , 每个复合形含有 m 点, 其中

$$A_k = \{x_{k,j}, f_{k,j} | x_{k,j} = x_{k+p,j-1}, f_{k,j} = f_{k+p,j-1}, j = 1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

e. 复合形进化。按照竞争的复合形进化算法(CCE)分别进化各个复合形 A_k , $k = 1, 2, \dots, p$ 。

f. 复合形混合。把进化后的每个复合形的所有顶点组合成新的点集,再次按函数值 f_i 升序排列,排序后仍记为 D , 对 D 按目标函数的升序进行排列。

g. 收敛性判断。如果满足收敛条件则停止,否则返回第 d 步。

3 优化过程

3.1 确定参数寻优空间

寻优空间由参数的上下边界组成,可以根据新安江模型推荐的参数范围来确定,也可以根据参数的物理意义和研究流域的特性由人工给定^[13]。表1列出了本文选用的日模型优化参数的上下边界,表2列出了次洪模型优化参数的上下边界。表中各项参数的物理意义见文献[13]。

表 1 日模型参数上下边界

Table 1 Boundaries of daily simulation parameters

参数边界	K	B	C	W_m	W_{um}	W_{lm}	I_m	S_m	E_x	K_g	K_i	C_g	C_i	C_s	X
上限	1.50	0.30	0.18	125	20	65	0.02	60.00	1.50	0.50	0.40	1.00	0.89	0.30	0.30
下限	0.10	0.20	0.08	115	5	60	0.01	10.00	1.00	0.30	0.20	0.98	0.70	0.10	0.10

表 2 次洪模型参数上下边界

Table 2 Boundaries of hourly simulation parameters

参数边界	S_m	K_g	K_i	C_g	C_i	C_s	X
上限	60.00	0.50	0.40	1.00	0.89	0.89	0.30
下限	10.00	0.30	0.20	0.98	0.80	0.70	0.10

3.2 确定 SCE-UA 算法参数

SCE-UA 算法的参数缺省取值同文献 [6]。复合形的个数 p 是参数率定时唯一需要确定的参数。 p 值越大,越适宜于高阶非线性问题。本文取 $p = 2^{[14]}$ 。

3.3 目标函数

新安江模型一般可分为日模型和次洪模型,日模型主要是对日实测资料进行研究,率定的参数均与时段长无关,如 $K, B, C, W_m, W_{um}, W_{lm}$ 等参数;次洪模型主要是对场次洪水进行研究,率定的参数均与时段长有关,如 $S_m, K_g, K_i, C_g, C_i, C_s$ 等参数。由于 2 个模型研究的对象不同,因此目标函数的选取也有差异 [13, 15]。

在本文中,日模型选用总体水量误差作为目标函数:

$$f(\theta) = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N [q_{obs,i}(\theta) - q_{sim,i}(\theta)] \right| \quad (2)$$

次洪模型选用对数绝对值误差为目标函数:

$$f(\theta) = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N \left| \lg \left(\frac{q_{obs,i}}{q_{sim,i}(\theta)} \right) \right|}{\sum_{i=1}^N \left| \lg (q_{sim,i}(\theta)) \right|} \quad (3)$$

式中: $Q_{obs,i}$ ——实测流量序列; $Q_{sim,i}$ ——模拟流量序列; N ——流量序列数; θ ——优选参数。

3.4 确定迭代停止准则

a. 目标函数在 5 次循环后仍无法提高 0.01% 的精度时,则认为此参数取值对应的点到了可行域的平坦面,迭代停止。

b. 连续 5 次迭代后仍无法显著改变参数值,并且模拟结果没有明显提高时,则认为目标函数达到了最优,迭代停止 [16]。

4 实例应用

呈村流域面积为 290 km²,流域内有 10 个雨量站,蒸发数据与流量数据均来源于呈村水文站。流域位于亚热带季风气候区,年平均温度为 17℃,年平均降雨量为 1600 mm,其中 4—6 月份多雨,占全年雨水量的 50%,易发生洪涝灾害,河川径流年内、年际变化较大,属于典型的湿润地区。

日模型采用 1986—1995 年共 10a 的实测洪水资料进行参数优化,其中前 7a 资料用于参数率定,后 3a 资料用于参数检验。次洪模型选取 9 场洪水进行参数优化,其中前 7 场用于参数率定,后 2 场用于参数检验。

采用美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 提供的 1 km × 1 km DEM 数据,根据该流域雨量站情况进行分块。呈村流域共有雨量站 10 个,采用泰森多边形方法对其分块,确定每块的权重系数。

首先对日模型中的 15 个参数(表 3)进行寻优计算,然后在次洪模拟寻优计算中固定与时段长无关的 8 个参数: $K, B, C, W_m, W_{um}, W_{lm}, I_m, E_x$,直接引用日模型参数优化结果作为这些参数的值,只对剩余的 7 个参数进行优化。

表3 日模型优化参数

Table 3 Optimized parameters in daily simulation

参数名称	K	B	C	W_m	W_{um}	W_{lm}	I_m	S_m	E_x	K_g	K_i	C_g	C_i	C_s	X
最优参数	0.89	0.30	0.08	115	17.63	65	0.01	18.63	1.39	0.30	0.40	0.98	0.70	0.17	0.16

4.1 日模型参数优化结果

从表4统计结果来看,率定期的洪水确定性系数精度较高,径流量模拟结果较好,径流相对误差很小。将自动率定的最优参数用于检验期洪水模拟,同样得到了理想的结果,确定性系数均达到0.8以上,径流量相对误差控制在比较小的范围内。图1和图2分别是率定期和检验期模拟流量与实测流量过程对比,从这两幅图可以看出模拟流量和实测流量拟合程度比较高,说明利用自动优化的参数值在一定程度上反映出优化参数值与参数真值比较接近。

表4 呈村流域日模型参数率定期与检验期的洪水特征值

Table 4 Flood characteristic values in daily simulation during calibration and validation periods in Chengcun watershed

分期	洪号	降雨总量/ mm	蒸发总量/ mm	实测径流量/ $10^6 m^3$	模拟径流量/ $10^6 m^3$	径流相对误差/ %	确定性系数
率定期	1986	1846.48	657.06	353.67	333.04	5.83	0.82
	1987	2409.04	666.29	481.75	506.82	-5.20	0.93
	1988	1790.88	569.70	364.70	369.19	-1.23	0.87
	1989	2339.03	616.77	470.12	480.49	-2.21	0.89
	1990	1855.89	641.61	371.10	341.79	7.90	0.77
	1991	2114.01	544.17	483.98	470.51	2.78	0.76
	1992	1888.89	633.72	339.59	361.69	-6.51	0.77
检验期	1993	2519.95	540.21	570.39	567.69	0.47	0.81
	1994	1789.88	572.57	338.62	354.20	-4.60	0.82
	1995	2110.01	501.15	494.12	482.63	2.33	0.82

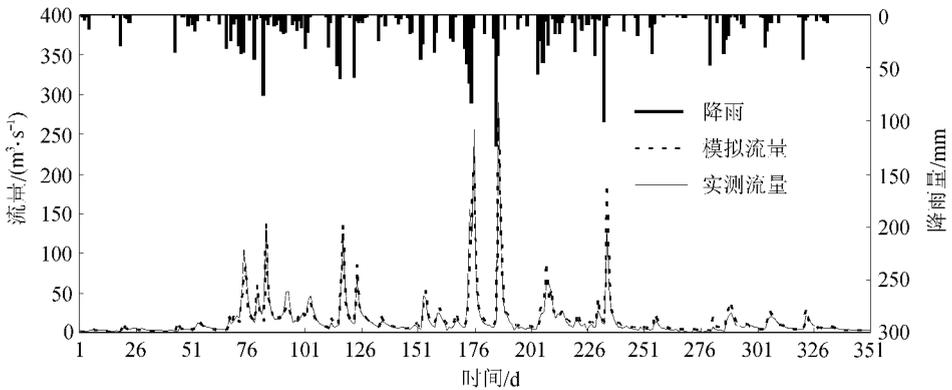


图1 率定期(1986年)模拟流量与实测流量过程对比

Fig. 1 Comparison of simulated and observed discharge in calibration period (1986)

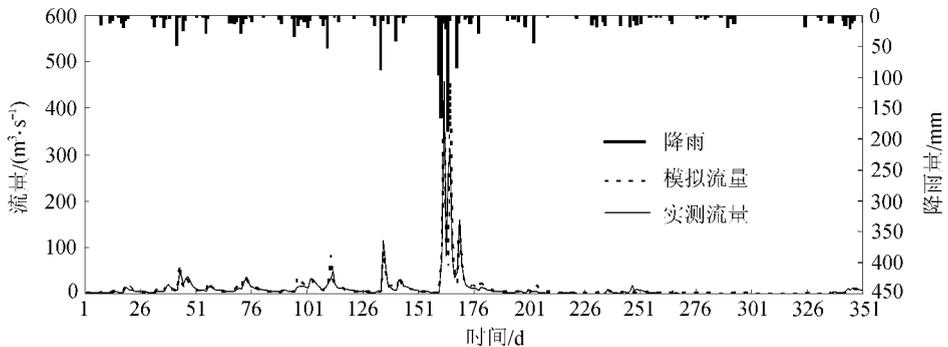


图2 检验期(1995年)模拟流量与实测流量过程对比

Fig. 2 Comparison of simulated and observed discharge in validation period (1995)

4.2 次洪模型参数优化结果

次洪模型优化参数见表 5。呈村流域次洪模型参数率定期与检验期的洪水特征值见表 6。

表 5 次洪模型优化参数

Table 5 Optimized parameters in hourly simulation

参数名称	S_m	K_g	K_i	C_g	C_i	C_s	X
最优参数	18.63	0.30	0.40	0.98	0.80	0.82	0.19

表 6 呈村流域次洪模型参数率定期与检验期的洪水特征值

Table 6 Flood characteristic values in hourly simulation during calibration and validation periods in Chengcun watershed

分期	洪号	总雨量/ mm	实测洪水量/ $10^6 m^3$	模拟洪水量/ $10^6 m^3$	洪水量相 对误差/%	实测洪峰流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	模拟洪峰流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	洪峰流量 相对误差/%	确定性 系数
率定期	1990061406	118.18	30.13	29.02	3.70	469	584.01	-24.52	0.77
	1990062621	241.26	50.71	51.05	-0.69	433	439.12	-1.41	0.86
	1991041600	147.30	48.25	41.45	14.09	428	387.22	9.53	0.77
	1991051822	268.11	64.62	59.68	7.64	611	636.10	-4.11	0.80
	1992070106	221.16	67.57	58.69	13.14	737	727.40	1.30	0.94
	1993061801	279.92	80.53	68.20	15.31	542	451.61	16.68	0.78
	1993062909	558.69	157.58	146.21	7.22	1000	1044.74	-4.47	0.93
检验期	1994060816	562.59	141.30	136.26	3.57	715	786.34	-9.98	0.91
	1995052801	262.35	80.33	72.94	9.20	600	542.35	9.61	0.89

从表 6 可以看出 率定期的洪水模拟精度较好 洪峰洪量误差均控制在比较小的范围内 率定期优化的参数用于检验期模拟时也能得到比较好的效果。从图 3 和图 4 的流量过程对比可以发现 模拟流量过程和实测流量过程拟合得很好 洪峰模拟的偏差比较小。

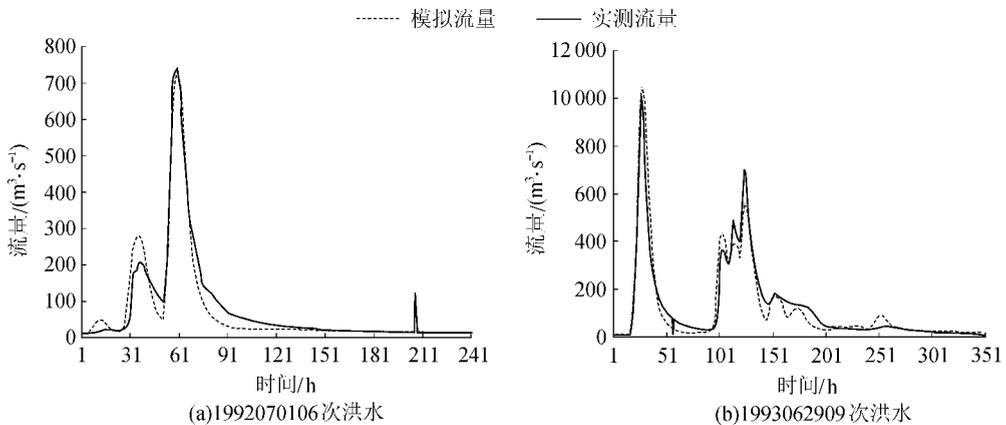


图 3 率定期模拟流量与实测流量过程对比

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

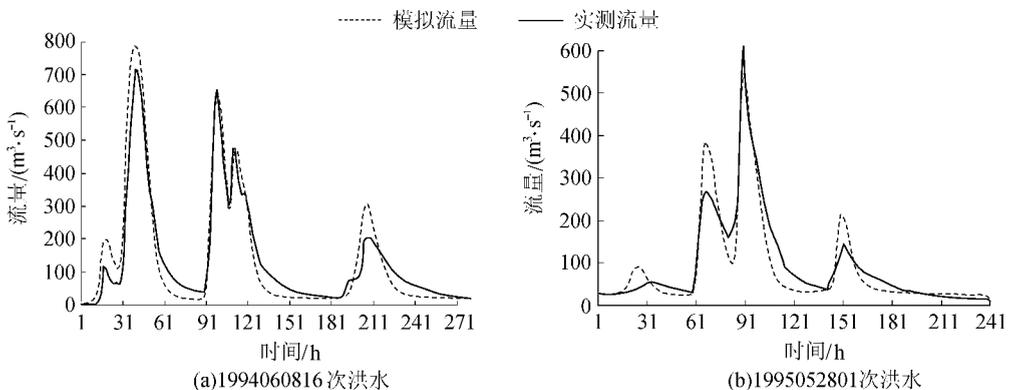


图 4 检验期模拟流量与实测流量过程对比

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

5 结 论

按照与时段长有无关系分别在日模型和次洪模型中运用 SCE-UA 算法对新安江模型进行参数优化,取得比较好的结果。优化过程中目标函数的选择对参数优化的结果有重要影响,日模型目标函数侧重于水量平衡控制,次洪模型不仅要考虑水量平衡,还要考虑洪峰模拟的好坏。另外,高质量的实测资料也是取得全局最优参数组的必要条件。由于水文模型参数多且参数之间的相关性大,并且单一的目标函数已经不能满足实际应用要求,如何避免参数的“异参同效”效应以及多目标函数的建立和选择均有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] VIJAY P S. Computer models of watershed hydrology[M]. Highlands Ranch : Water Resources Publication , 1996 : 23-68.
- [2] 赵人俊,王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6) : 2-8.(ZHAO Renjun, WANG Peilan. The parameters analysis of Xinanjiang mode[J]. Journal of China Hydrology , 1988(6) : 2-8.(in Chinese))
- [3] 宋星原,舒全英,王海波,等. SCE-UA、遗传算法和单纯性优化算法的应用[J]. 武汉大学学报 : 工学版, 2009, 42(1) : 6-9. (SONG Xingyuan, SHU Quanying, WANG Haibo, et al. Comparison and application of SCE-UA, genetic algorithm and simplex method [J]. Engineering Journal of Wuhan University , 2009, 42(1) : 6-9.(in Chinese))
- [4] 戴健男,李致家,黄鹏年,等. 新安江模型参数不确定性分析[J]. 河海大学学报 : 自然科学版, 2011, 39(6) : 618-622.(DAI Jiannan, LI Zhijia, HUANG Pengnian, et al. Uncertainty analysis of Xin'anjiang model parameters[J]. Journal of Hohai University : Natural Sciences 2011, 39(6) : 618-622.(in Chinese))
- [5] DUAN Q, SOROOSHIAN S, GUPTA V K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models[J]. Water Resource Research , 1992, 28(4) : 1015-1031.
- [6] DUAN Q Y, GUPTA V K, SOROOSHIAN S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization[J]. Journal of Optimization Theory and Application , 1993, 76(3) : 501-521.
- [7] SOROOSHIAN S, DUAN Q Y, GUPTA V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models [J]. Journal of Hydrology , 1994, 158(3/4) : 265-268.
- [8] 马海波,董增川,张文明,等. SCE-UA 算法在 TOPMODEL 参数优化中的应用[J]. 河海大学学报 : 自然科学版, 2006, 34(4) : 361-364.(MA Haibo, DONG Zengchuan, ZHANG Wenming, et al. Application of SCE-UA algorithm to optimization of TOPMODEL parameters[J]. Journal of Hohai University : Natural Sciences , 2006, 34(4) : 361-364.(in Chinese))
- [9] 徐冬梅,邱林,王文川. SCE-UA 算法有效估计马斯京根模型参数[J]. 人民黄河, 2008, 30(11) : 31-35. (XU Dongmei, QIU Lin, WANG Wenchuan. The estimation of Muskingum model parameters by SCE-UA algorithm[J]. Yellow River , 2008, 30(11) : 31-35.(in Chinese))
- [10] 雷晓辉,蒋云钟,王浩,等. 分布式水文模型 EasyDHM(II) 应用实例[J]. 水利学报, 2010, 41(8) : 893-907.(LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, WANG Hao, et al. Distributed hydrological model EasyDHM II : Application[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2010, 41(8) : 893-907.(in Chinese))
- [11] 赵人俊. 流域水文模型的比较分析研究[J]. 水文, 1989(6) : 1-5.(Zhao Renjun. The comparative analysis and research of hydrological model[J]. Journal of China Hydrology , 1989(6) : 1-5.(in Chinese))
- [12] ECKHARDT K, ARNOLD J G. Automatic calibration of a distributed catchments mode[J]. Journal of Hydrology 2001, 251(1/2) : 103-109.
- [13] 李致家. 水文模型的应用与研究[M]. 南京 : 河海大学出版社, 2008.
- [14] 李向阳,程春田,武新宇,等. 水文模型模糊多目标 SCE-UA 参数优选方法研究[J]. 中国工程科学, 2007, 9(3) : 52-56. (LI Xiangyang, CHENG Chuntian, WU Xinyu, et al. Study on fuzzy multi-objective SCE-UA optimization method for rainfall-runoff model[J]. Engineering Science , 2007, 9(3) : 52-56.(in Chinese))
- [15] 王佩兰,赵人俊. 新安江模型(三水源) 参数的客观优选方法[M]. 北京 : 中国水利水电出版社, 1989.
- [16] 李致家,周轶, HAPUARACHCHI H A P. 新安江模型参数全局优化研究[J]. 河海大学学报 : 自然科学版, 2004, 32(4) : 376-379.(LI Zhijia, ZHOU Yi, HAPUARACHCHI H A P. Application of global optimization to calibration of Xin'anjiang mode[J]. Journal of Hohai University : Natural Sciences , 2004, 32(4) : 376-379.(in Chinese))