

## 新安江模型参数全局优化——以月潭流域为例\*

辛朋磊<sup>1</sup>, 李致家<sup>2</sup>, 汤嘉辉<sup>3</sup>, 吴勇拓<sup>2</sup>

(1: 江苏省水文水资源勘测局南通分局, 南通 226006)

(2: 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

(3: 中华人民共和国南通海事局, 南通 226006)

**摘要:** 采用全局优化算法 SCE-UA, 以月潭流域为例对新安江模型参数优化进行研究. 结果表明: 采用理想资料时, SCE-UA 算法可以搜索到稳定的最优参数组; 采用实际水文资料时, 该算法不能保证得到唯一和稳定的最优参数组; 对模型优化的目标函数进行探讨, 发现对于新安江日模型, 目标函数选取水量平衡误差函数或确定性系数函数较好, 对于次洪模型选取对数绝对值误差函数较好; 对参加优化资料长度进行了研究, 发现为了得到相对稳定的参数组, 参加优化的实测资料长度应在 12 年以上; 最后将 SCE-UA 结合赵人俊提出的客观优化理论进行分层优化, 发现可以得到稳定、唯一参数组.

**关键词:** 全局优化方法; 新安江模型; 参数优化; 客观优化方法; 月潭流域

### Parameter global optimization of the Xinanjiang model: A case of Yuetan Basin

XIN Penglei<sup>1</sup>, LI Zhijia<sup>2</sup>, TANG Jiahui<sup>3</sup> & WU Yongtuo<sup>2</sup>

(1: *Nantong Substation, Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Jiangsu Province, Nantong 226006, P. R. China*)

(2: *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China*)

(3: *Nantong Maritime Safety Administration of the People's Republic of China, Nantong 226006, P. R. China*)

**Abstract:** The SCE-UA global optimization method was used for the Xinanjiang model parameter calibration on the Yuetan basin. The results reveal that the parameter optimization results are stable when using the ideal calibration data. However, for the observed calibration data, SCE-UA method can't get the only and stable parameter set for sure; In the Xinanjiang watershed model for daily simulation, the Water Quantity Balance Error and Deterministic Coefficient are two best objective functions and in the Xinanjiang watershed model for hourly simulation, the Absolute Logarithm Error is the best objective function; In order to get the stability parameter set, more than 12 years' actual data is needed; then the objective optimization theory which advanced by ZHAO Renjun has been introduced and combined with the SCE-UA method, and the results reveal that the parameter optimization results are more stable than the way that didn't use this theory.

**Keywords:** Global optimization method; Xinanjiang watershed model; Parameter optimization; Objective optimization theory; Yuetan Basin

降雨-径流水文模型参数率定有人工试错法和数学优化法. 目前生产部门在进行洪水预报时主要还是采用人工试错法率定水文模型参数. 对于初学者来说采用人工试错法比较费时且对于参数组的优劣评价较为主观, 不太容易找到客观的最优参数组. 数学优化方法有局部和全局优化方法. 1990s 之前在水文模型参数优化中应用较多的是局部优化方法, 这类方法的局限是当水文模型为非线性函数时, 参数优化结果会受到初始值的影响, 可能搜索到不同的参数结果. SCE-UA (Shuffle Complex Evolution method) 算法是 Duan 等和 Sorooshian 等<sup>[1-2]</sup> 在复合形直接算法<sup>[3]</sup> 的基础上, 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

\* 国家自然科学基金项目(50479017)、博士点基金项目(2009009411005)和教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0717)联合资助. 2010-10-27 收稿; 2010-11-29 收修改稿. 辛朋磊, 女, 1982 年生, 硕士; E-mail: pl\_xin@yahoo.com.cn.

综合而成,是一种可以应用于流域水文模型参数优化的全局优化算法,应用十分广泛.李致家等<sup>[4-6]</sup>将 SCE-UA 算法用于中国的密赛,万家埠以及斯里兰卡的 Kalu 等流域的新安江日模型参数优化中,并对参数的稳定性做了进一步的探讨,指出参数的稳定性和唯一性与参加优化的资料长短有关,有时并不能保证得到稳定的最优参数组;Hapuarachchi 等<sup>[5-6]</sup>在用 SCE-UA 算法对新安江模型参数进行优化研究时发现当设定参数初始值范围过大时,用实测的流域资料并不能搜索到稳定的参数组;Patrice 等<sup>[7]</sup>曾于 1995 年将 SCE-UA 算法用于概念性降雨径流模型 NWSRFS-SMA 中,提出要获得相对稳定的参数需要大约 8 年的实测资料;宋星原等<sup>[8]</sup>分别将 SCE-UA 算法、遗传算法和单纯形优化算法用于新安江模型中并对三种算法的有效性进行比较,发现 SCE-UA 算法综合了遗传算法和单纯形算法的优点,能够全局一致、快速地收敛到全局最优解;马海波等<sup>[9]</sup>将 SCE-UA 算法用于 TOPMODEL 模型参数优化中,表明 SCE-UA 算法可以用于半分布式水文模型 TOPMODEL;李向阳等<sup>[10]</sup>在 SCE-UA 算法的基础上融合多目标模糊优选理论,提出了水文模型参数模糊多目标 SCE-UA 优选方法.以上研究表明 SCE-UA 算法可以较好地用于水文模型参数优化中,但参数优化结果还受到资料长度、目标函数等的影响.

新安江模型是赵人俊教授<sup>[11]</sup>提出的概念性的分布式水文模型,该模型在我国洪水预报中得到普及性的应用.本文采用 SCE-UA 算法对新安江模型参数优化进行系统深入的研究,希望为该模型的参数优化提供一种标准化的方法.

## 1 参数优化方案设计

### 1.1 SCE-UA 参数设置

SCE-UA 参数主要包括:复合形的顶点数  $m(m \geq n + 1)$ ;子复合形的顶点数  $q(2 \leq q \leq m)$ ;参与进化的复合形个数  $p(p \geq 1)$ ;样本数目  $s(s = p \times m)$ ;子复合形连续繁殖后代的个数  $y(y = 1)$ ;子复合形进化的步数  $z(z = 2n + 1)$ 以及需要优化的参数个数  $n$ .新安江模型有 15 个参数,根据流域实际情况并结合前人<sup>[5-6]</sup>研究对其中的 13 个参数进行优选(固定参数  $IM = 0.01, KG + KI = 0.7$ ),选取  $n = 13, m = 2n + 1, q = n + 1, p = 16$ .

### 1.2 目标函数选择

本次研究选取 6 个常用的目标函数.

(1) 水量平衡误差函数( $W_{QBE}$ ),表示为:

$$F_1(\theta) = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N [q_{obs,i} - q_{sim,i}(\theta)] \right| \quad (1)$$

(2) 实测与模拟流量过程线的吻合程度函数( $R_{MSE}$ ),表示为:

$$F_2(\theta) = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [q_{obs,i} - q_{sim,i}(\theta)]^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

(3) 实测与模拟洪峰流量过程的吻合程度函数( $R_{MSEP}$ ),表示为:

$$F_3(\theta) = \frac{1}{M_p} \sum_{j=1}^{M_j} \left[ \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} [q_{obs,i} - q_{sim,i}(\theta)]^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

(4) 实测与模拟枯水流量过程的吻合程度函数( $R_{MSEL}$ ),表示为:

$$F_4(\theta) = \frac{1}{M_l} \sum_{k=1}^{M_l} \left[ \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} [q_{obs,i} - q_{sim,i}(\theta)]^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

(5) 确定性系数( $D_C$ ),表示为:

$$F_5(\theta) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [q_{obs,i} - q_{sim,i}(\theta)]^2}{\sum_{i=1}^N [q_{obs,i} - \bar{q}_{obs}]^2} \quad (5)$$

(6) 对数的绝对值误差函数( $A_{LOGE}$ ),表示为:

$$F_6(\theta) = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N \left| \lg \left( \frac{q_{obs,i}}{q_{sim,i}(\theta)} \right) \right|}{\sum_{i=1}^N | \lg(q_{obs,i}) |} \tag{6}$$

式中： $q_{obs,i}$ 为实测流量过程； $q_{sim,i}$ 为模拟流量过程； $N$ 为流量序列个数； $M_p$ 为洪峰过程个数； $M_l$ 为枯水过程个数； $n_j$ 为第  $j$  个洪峰过程； $n_k$ 为第  $k$  个枯水过程； $\theta$  为优选的参数。上式中洪峰流量过程以实测流量大于某一个给定的流量值来确定，枯水流量过程以实测流量小于某一个给定的流量值来确定。

以上各指标在整体上存在一个平衡约束关系，在模型参数优化中要综合考虑，否则可能出现诸如洪峰模拟较好，而枯水及水量平衡模拟较差的情况。故给出一个总体目标函数：

$$F(\theta) = F_1(\theta) \times A_1 + F_2(\theta) \times A_2 + \dots + F_6(\theta) \times A_6 \tag{7}$$

式中， $A_i$ 为对应每一个目标函数给定的一个常数，通过它来调整各个目标函数在总体目标函数中的权重。为了综合评价，对不同的目标函数赋予不同的  $A_i$  值进行参数优选。 $A_i$  值的确定以上式中各项  $F_i \times A_i$  的结果都近似相等为准。

### 1.3 研究方案

利用概念性水文模型进行流域降雨-径流模拟时的误差主要来自水文资料、模型结构以及模型参数，模型参数优化误差主要来自水文资料、模型结构以及参数优化方法。由水文资料及模型结构误差引起模型参数优化问题不在本论文研究之内。为避免实测资料误差对优化结果产生影响，而引入理想资料，即假定参数上下限，随机生成一组参数作为理想参数，然后根据实测降雨系列用该套参数模拟计算出流域相应的流量系列。具体研究时根据情况需要采用理想资料和实测资料进行研究。

## 2 实例应用

月潭流域位于安徽省黄山市，是屯溪流域的子流域之一（图 1），流域面积 950km<sup>2</sup>。该流域共有 5 个雨量站（分别是左龙、汉口、呈村、上溪口和大连站）；1 个流量站（月潭站）和 1 个蒸发站（月潭站），采用泰森多边形进行子流域划分。该地多年平均最高、最低气温分别为 25℃ 和 0℃。夏天最高气温可达 37℃，冰点温度一般发生在 12-2 月。多年平均降雨量 1762mm/a，蒸发量 677.5mm/a。本次研究利用该流域 1972 年到 1999 年共 28 年的实测日降雨、径流资料以及 1982-1988 年的 16 场实测洪水资料。

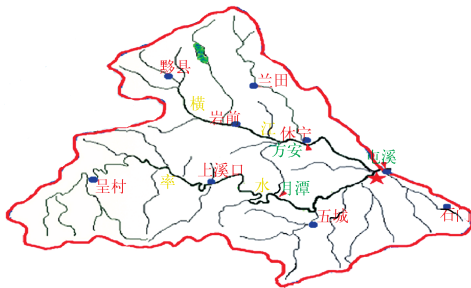


图 1 月潭流域水系图

Fig. 1 Water drainage of Yuetan Basin

### 2.1 目标函数研究

前面提出了 6 个常用的目标函数，本部分采用理想资料研究目标函数对参数优化结果的影响，参数搜索区间及上下限见表 1。

2.1.1 日模型目标函数 对于新安江日模型选用  $W_{QBE}$ ， $R_{MSE}$  以及  $D_c$  三个目标函数。首先假定一组理想参数，然后

利用月潭流域 1989-1999 年实测日降雨量的生成理想流量资料系列进行研究。参数优化结果表明，对于日模型目标函数应用较好的有  $W_{QBE}$  和  $D_c$ （表 2）。对于函数组合， $R_{MSE}$  参与的几个函数组合均没有搜索到全局最优函数组，究其原因除权重系数的选择误差外，很可能是因为该函数不适用于日模型。因此对于新安江日模型，可以认为利用  $W_{QBE}$  和  $D_c$  或两者组合作为目标函数是较好的选择。

2.1.2 次洪模型目标函数 假定次洪水理想参数，利用月潭流域 1982-1988 年间 10 次实测洪水生成的理想洪水资料，以  $W_{QBE}$ 、 $R_{MSEP}$ 、 $R_{MSEL}$ 、 $A_{LOCE}$  和  $D_c$  作为研究对象。参数优化结果表明，对于次洪水过程的参数优化，目标函数选取以  $A_{LOCE}$  函数最为理想，其次是  $W_{QBE}$  函数（表 3）。 $R_{MSEL}$  函数与  $R_{MSEP}$  函数没有搜索到较为理想的结果，主要原因是这两个函数受具体洪水形状影响较大，而且这两个函数仅考虑低于低水线或高于高水线部分模拟的精度，未考虑整体模拟精度，因此在具体应用时最好与其他函数组合使用。

表1 参数搜索区间与初始值的设定  
Tab.1 Parameter boundaries and initial points

序号	参数	下限	上限	初始值	序号	参数	下限	上限	初始值
1	<i>K</i>	0.600	1.900	1.5	8	<i>EX</i>	0.010	2.000	1.3
2	<i>B</i>	0.001	0.900	0.5	9	<i>KG</i>	0.010	0.600	0.2
3	<i>C</i>	0.010	0.500	0.3	10	<i>CG</i>	0.010	0.990	0.8
4	<i>WUM</i>	10.000	60.000	20	11	<i>CI</i>	0.010	0.990	0.7
5	<i>WLM</i>	10.000	70.000	30	12	<i>XE</i>	0.010	0.490	0.3
6	<i>WDM</i>	10.000	70.000	60	13	<i>CS</i>	0.010	0.600	0.4
7	<i>SM</i>	1.000	35.000	10	-	-	-	-	-

表2 不同目标函数及其组合参数优化结果\*

Tab.2 Results of the parameter optimization using different objection functions

参数	理想参数	$D_C$	$W_{QBE}$	$R_{MSE}$	$A_1 \times D_C + W_{QBE}$	$A_2 \times D_C + R_{MSE}$	$A_3 \times W_{QBE} + R_{MSE}$	$A_4 \times D_C + A_5 \times W_{QBE} + R_{MSE}$
<i>K</i>	1.125	1.126	1.125	1.126	1.125	1.126	1.126	1.126
<i>B</i>	0.080	0.070	0.080	0.071	0.080	0.071	0.071	0.071
<i>C</i>	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120
<i>WUM</i>	38.000	37.756	38.000	37.800	38.000	37.802	37.815	37.814
<i>WLM</i>	46.000	46.000	46.000	45.924	46.000	45.920	45.925	45.925
<i>WDM</i>	25.000	25.012	24.999	44.931	24.999	44.935	44.957	44.956
<i>SM</i>	44.000	43.926	44.000	43.941	44.000	43.938	43.972	43.971
<i>EX</i>	1.700	1.691	1.700	1.691	1.700	1.690	1.695	1.695
<i>KG</i>	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350
<i>CG</i>	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970
<i>CI</i>	0.090	0.089	0.090	0.089	0.090	0.089	0.090	0.090
<i>XE</i>	0.370	0.370	0.370	0.370	0.370	0.370	0.370	0.370
<i>CS</i>	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200

\*  $A_1 = 10$ ,  $A_2 = 100$ ,  $A_3 = 10$ ,  $A_4 = 500$ ,  $A_5 = 3$  为权重系数.

表3 次洪模型不同目标函数所得参数优化结果\*

Tab.3 Results of the parameter optimization using different objection functions

参数	理想参数	$D_C$	$W_{QBE}$	$A_{LOGE}$	$R_{MSE}$	$R_{MSEP250}$	$R_{MSEP200}$	$R_{MSEL70}$	$R_{MSEL50}$
<i>K</i>	1.5	1.47	1.50	1.50	1.45	1.49	1.44	1.49	1.30
<i>B</i>	0.5	0.58	0.50	0.50	0.58	0.42	0.47	0.60	0.44
<i>C</i>	0.3	0.53	0.34	0.31	0.56	0.44	0.52	0.37	0.26
<i>WUM</i>	20	24.54	20.00	20.00	24.50	25.76	25.68	25.15	26.52
<i>WLM</i>	30	10.00	29.80	29.98	10.00	10.24	10.08	22.29	32.60
<i>WDM</i>	60	64.25	60.04	60.00	64.44	63.74	62.95	60.26	53.46
<i>SM</i>	10	8.56	10.00	10.00	8.65	9.68	9.96	10.35	8.87
<i>EX</i>	1.3	0.85	1.30	1.30	0.87	1.15	1.19	0.99	1.28
<i>KG</i>	0.2	0.11	0.20	0.20	0.11	0.10	0.10	0.25	0.30
<i>CG</i>	0.8	0.85	0.80	0.80	0.85	0.92	0.93	0.80	0.80
<i>CI</i>	0.7	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.68	0.65
<i>XE</i>	0.3	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.33	0.30
<i>CS</i>	0.4	0.41	0.40	0.40	0.41	0.40	0.40	0.39	0.45

\*  $R_{MSEP}$ 及 $R_{MSEL}$ 后的数字分别表示设置的高水线和低水线.

2.2 资料长度对参数优化结果的影响

为了研究在优化过程中资料长度对参数优化结果的影响,选取月潭流域 1972 - 1991 年共 20 年日实测水文资料,分别研究理想资料和实测资料情况下资料长度对参数优化结果的影响. 参数搜索区间及初始值设置同表 1.

2.2.1 利用理想资料系列 利用连续随机数生成器,在参数搜索区间内随机生成一组参数,然后模拟计算理想流量资料. 在参数优化计算中,选用水量平衡误差为目标函数,资料长度从 1 年开始逐渐递增直到 20 年. 部分资料长度下参数优化结果可以看出,新安江模型参数中 *C*、*WUM*、*WLM*、*WDM* 和 *SM* 五个参数的值较不容易达到稳定(表 4).

表 4 利用理想资料进行参数优化部分结果

Tab. 4 Part of the parameter optimization results using synthetic data set

序号	参数	理想参数	不同资料长度参数优化结果						
			1 年	2 年	3 年	5 年	9 年	15 年	20 年
1	<i>K</i>	0.670	0.670	0.670	0.670	0.670	0.670	0.670	0.670
2	<i>B</i>	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350
3	<i>C</i>	0.240	0.100	0.238	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240
4	<i>WUM</i>	22.770	22.771	22.769	22.771	22.770	22.770	22.770	22.770
5	<i>WLM</i>	46.560	46.559	46.566	46.558	46.559	46.560	46.560	46.560
6	<i>WDM</i>	10.670	10.670	10.647	10.674	10.672	10.671	10.670	10.670
7	<i>SM</i>	40.570	40.570	40.564	40.570	40.570	40.570	40.570	40.570
8	<i>EX</i>	0.930	0.930	0.930	0.930	0.930	0.930	0.930	0.930
9	<i>KG</i>	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
10	<i>CG</i>	0.730	0.730	0.730	0.730	0.730	0.730	0.730	0.730
11	<i>CI</i>	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460	0.460
12	<i>XE</i>	0.470	0.470	0.470	0.470	0.470	0.470	0.470	0.470
13	<i>CS</i>	0.530	0.530	0.530	0.530	0.530	0.530	0.530	0.530

五个参数的标准化参数值随资料长度变化曲线可以看出,参数 *C* 和参数 *WDM* 在资料长度较短时波动很大,即受资料长度影响比较大;参数组在 2 年资料长度以后就逐渐趋于稳定,并随着参加优化资料长度的增加参数组越来越接近于全局最优参数组,当资料长度达到 12 年后可以搜索到完全稳定的全局最优参数组(图 2a).

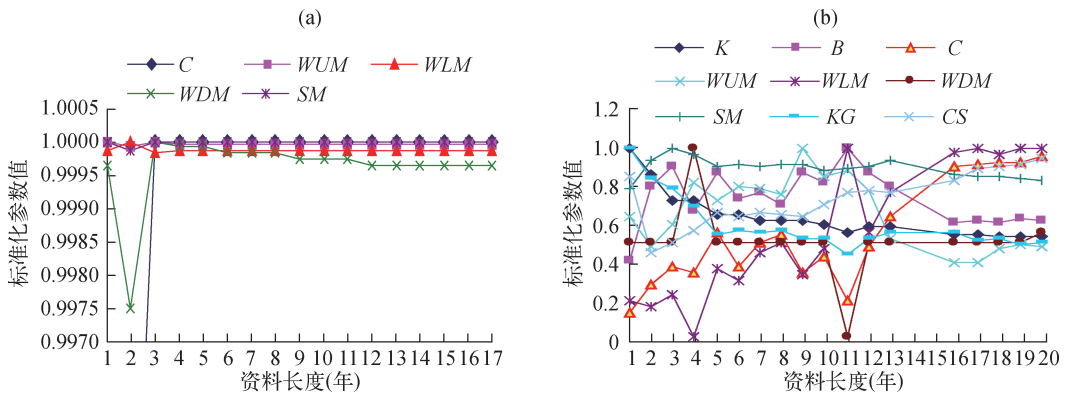


图 2 部分参数随理想优化资料长度(a)和实测优化资料长度(b)变化曲线图

Fig. 2 Variation of parameter optimization results as the ideal(a) and real(b) data length changes

2.2.2 利用实测资料 在现有资料精度下,考虑资料误差的影响,利用实测资料研究资料长度对参数优化结果的影响.参数初始值和上下限见表5.优化结果的部分标准化参数值随资料长度变化曲线可以看出,利用实测资料时参数优化结果波动更大,大部分参数在实测资料长度超过12年后才逐渐趋于稳定,而且很难利用增加资料长度的方法改进参数优化结果(图2b).目标函数随优化次数的变化曲线可以看出,目标函数在算法搜索5000次以后逐渐达到稳定,且随着优化资料长度的不同,最优目标函数值有差异(图3a).参数优化结果可以看出,有些参数如WUM和WLM并没有搜索到合理的最优值,而且不同长度的优化资料得到的参数结果差别很大,即参数结果具有较大的不稳定性(表5).从参数K和参数C在优化过程中的取值可以看出,两参数在初期具有强烈的波动,在算法搜索到10000次以后逐渐趋于稳定,但稳定后的参数仍随资料长度的不同而有较大差异(图3b,图3c).不同资料长度下优化结果的水量平衡误差函数表明,参加优化的资料长度不同,优化结果的水量平衡误差也不同(图3d).

表5 日模型参数设置与优化结果

Tab.5 Parameter setting and optimization results in the Xinanjiang model for daily simulation

序号	参数	初始值	下限	上限	不同资料长度参数优化结果			
					5年	10年	13年	14年
1	<i>K</i>	0.65	0.30	1.40	0.917	0.886	0.882	0.882
2	<i>B</i>	0.12	0.01	0.90	0.350	0.469	0.462	0.456
3	<i>WUM</i>	10	10	100	21.012	73.112	81.389	93.771
4	<i>WLM</i>	50	10	100	99.998	55.725	33.136	27.804
5	<i>WDM</i>	20	10	100	10.001	10.000	10.001	10.002
6	<i>C</i>	0.15	0.01	0.60	0.019	0.080	0.055	0.053
7	<i>SM</i>	15	1	100	10.343	10.370	10.829	11.047
8	<i>EX</i>	1.50	0.01	2.00	0.088	0.111	0.199	0.221
9	<i>CG</i>	0.980	0.500	0.999	0.961	0.993	0.994	0.994
10	<i>CI</i>	0.81	0.70	0.99	0.742	0.792	0.798	0.801
11	<i>CS</i>	0.400	0.001	0.600	0.088	0.159	0.166	0.168
12	<i>KG</i>	0.35	0.01	0.60	0.168	0.099	0.114	0.001
13	<i>XE</i>	0.35	-0.49	0.49	0.412	0.470	0.486	0.487

以上研究可以看出,在新安江模型参数优化中,利用理想资料只要2年以上的资料长度就可以使参数趋于稳定,12年以上的资料长度可以搜索到稳定的全局最优参数组;利用实测资料,参数组虽然可以在12年以上的资料长度下整体趋于稳定,但仍然难以利用增加资料长度的方法得到最优的参数组.

### 2.3 客观优化理论与SCE-UA结合进行参数优化研究

由于新安江模型参数之间存在相关性<sup>[12]</sup>,导致在参数优化过程中容易产生参数不稳定现象.根据赵人俊的研究<sup>[13]</sup>,新安江模型参数可按4层分类,不同层次之间的独立性较好,而同层次中的各参数由于目标相同,相互之间的相关性就大一些.为解决参数之间相关性对优化结果的影响,赵人俊教授提出参数客观优化理论<sup>[14]</sup>,即从第1层到第4层,其层次也从低到高,参数调试应按顺序从低层到高层逐层进行,由于同层参数之间的独立性较好,所以可以将确定后的低层次参数直接移到高层.

本文将赵人俊的客观优化理论与SCE-UA算法相结合,利用月潭流域1978-1991年共14年的实测降雨、径流资料以及1982-1988年16场实测洪水资料进行研究.具体步骤如下:(1)根据月潭流域状况以及参数的物理意义固定 $WUM=20$ , $WLM=60$ , $WDM=40$ , $B=0.35$ , $EX=1.5$ , $XE=0.35$ ,对剩余参数用日模型进行优化;(2)固定日模型优化后与时段无关的参数,对与时段有关的 $SM$ , $CI$ , $CG$ , $KG$ , $KI$ , $CS$ 等参数用次洪模型进行优化.

对比表5和表6以及图3和图4可以发现,利用赵人俊的参数客观优化理论后,不仅参数优化速度有明显提高而且参数优化结果的稳定性也有了较大提高.



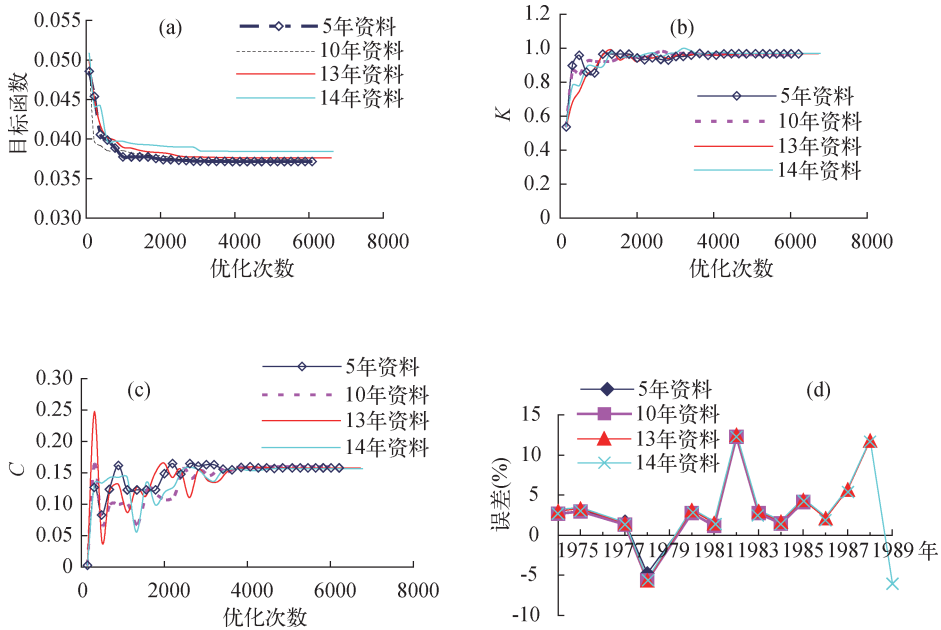


图4 目标函数(a)、K值(b)、C值(c)与优化次数相关曲线及优化结果水量误差图(d)

Fig. 4 Relevant curve between objective function(a), parameter K(b), parameter C(c) and trials; figure of the water quantity balance error(d)

对次洪模型进行优化,参数SM、CG、CI、CS、KG优化结果分别为6.559、0.839、0.275、0.045、0.395。至此,得到SCE-UA算法与客观优化理论结合后的参数优化结果,为了进一步观察该方法的适用性,对参数优化结果进行验证。率定期和检验期的洪水模拟结果特征值可以看到,检验期的模拟结果方案有效性达到了乙等要求,合格率达到甲等要求(表7),说明该优化方法可以用于实际应用中。

表7 洪水资料优化计算结果特征值

Tab. 7 Statistical characteristic value of parameter optimization results

	起始时间	结束时间	面平均降雨 (mm)	实测洪峰 流量(m <sup>3</sup> /s)	计算洪峰 流量(m <sup>3</sup> /s)	洪量 误差	确定性 系数
率定期	1986-05-19 08:00	1986-05-27 20:00	156.09	104.30	108.48	-4.01	0.96
	1986-07-04 08:00	1986-07-12 08:00	77.97	49.48	45.20	8.65	0.77
	1987-04-25 08:00	1987-05-01 20:00	69.60	44.30	49.72	-12.23	0.76
	1987-05-26 08:00	1987-05-30 20:00	63.11	38.44	40.35	-4.98	0.75
	1987-06-20 06:00	1987-06-28 20:00	307.42	286.93	274.34	4.39	0.89
	1988-06-21 00:00	1988-06-27 00:00	141.59	154.09	152.03	1.34	0.84
均值						5.93	0.83
合格率						100%	
检验期	1982-06-19 08:00	1982-06-27 08:00	235.18	197.51	214.57	-8.64	0.95
	1982-07-17 10:00	1982-07-24 08:00	77.86	37.53	38.61	-2.87	0.89
	1983-05-29 00:00	1983-06-02 02:00	194.11	168.46	126.24	25.06	0.78
	1983-06-14 00:00	1983-06-19 20:00	96.31	77.68	65.49	15.69	0.87
	1983-06-20 00:00	1983-06-26 20:00	217.34	175.23	191.20	-9.11	0.90
	1984-04-02 16:00	1984-04-08 04:00	142.41	132.58	131.62	0.72	0.85
	1984-05-12 08:00	1984-05-23 20:00	105.47	75.84	75.96	-0.16	0.85
	1984-06-07 08:00	1984-06-12 20:00	74.43	43.58	47.60	-9.23	0.81
	1985-05-04 08:00	1985-05-11 20:00	101.75	63.80	72.21	-13.19	0.90
	1985-07-03 08:00	1985-07-09 20:00	80.66	62.36	67.22	-7.80	0.92
	均值						9.25
合格率						90%	



### 3 结论

本文采用全局优化算法 SCE-UA 对新安江模型参数优化进行了研究,取得了以下几个主要的结论:(1) 利用理想资料时,SCE-UA 算法可以搜索到稳定的最优参数组,但利用实际水文资料时单纯采用 SCE-UA 算法不能保证搜索到唯一、稳定的最优参数组;(2) 对于新安江日模型,目标函数选取水量平衡误差函数或确定性系数函数较好,对于次洪模型选取对数绝对值误差函数较好;(3) 为了得到相对稳定的参数组,参加优化的实测资料长度应在 12 年以上;(4) 将赵人俊教授的客观优化理论与 SCE-UA 算法相结合后,可以快速搜索到稳定的全局最优参数组。

### 4 参考文献

- [ 1 ] Duan Q, Gupta VK, Sorooshian S. A shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1993, **76**(3): 501-521.
- [ 2 ] Sorooshian S, Duan Q, Gupta VK. Optimal use of the SEC-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 1994, **158**(1): 265-284.
- [ 3 ] Nelder JA, Mead R. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, 1965, **7**: 308-313.
- [ 4 ] 李致家,周 轶,哈布·哈其. 新安江模型参数全局优化研究. 河海大学学报, 2004, **32**(4): 376-379.
- [ 5 ] Hapuarachchi HAP, 李致家,王寿辉. SCE-UA 方法在新安江模型参数优化中的应用. 湖泊科学, 2001, **12**(4): 304-314.
- [ 6 ] Hapuarachchi HAP. Improved calibration conceptual hydrologic models via GIS aided approach(dissertation). Nanjing: Hohai University, 2003.
- [ 7 ] Patrice OY, Hoshin VG, Soroosh S. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology*, 1996, **181**: 23-48.
- [ 8 ] 宋星原,舒全英,王海波等. SCE-UA、遗传算法和单纯形优化算法的应用. 武汉大学学报(工学版), 2009, **42**(1): 6-15.
- [ 9 ] 马海波,董增川,张文明等. SCE-UA 算法在 TOPMODEL 参数优化中的应用. 河海大学学报, 2006, **34**(4): 361-365.
- [ 10 ] 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. 中国工程科学, 2007, **9**(3): 52-57.
- [ 11 ] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型和陕北模型. 北京:水利电力出版社, 1984.
- [ 12 ] 赵人俊. 新安江模型参数的分析. 赵人俊水文预报文集. 北京:水利电力出版社, 1994: 125-134.
- [ 13 ] 赵人俊,王佩兰,胡凤彬. 新安江模型的根据及模型参数与自然条件的关系. 河海大学学报, 1992, **20**(1): 52-59.
- [ 14 ] 赵人俊,王佩兰. 流域水文模型参数的客观优化方法. 赵人俊水文预报文集. 北京:水利电力出版社, 1994: 163-167.