

基于 SCE - UA 算法新安江模型在沔河流域的应用

邓元倩¹, 李致家¹, 刘甲奇², 张汉辰¹, 童冰星¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了探索人工试错法和基于 SCE - UA 算法的自动优选法这两种方法在混合产流地区的拟合效果, 选取新安江模型对半湿润半干旱地区陕西沔河流域进行参数优化。探讨基于 SCE - UA 算法的新安江模型在沔河流域的适用性, 重点分析了参数的变化情况, 发现两种方法模拟的次洪参数 SM 、 CS 变化较大。研究结果表明: 基于 SCE - UA 算法的新安江模型在沔河流域适用性较好, 相对人工试错法参数取值更加合理, 提高了优化速度与模拟精度, 具有简便、高效的特点。

关键词: SCE - UA 算法; 人工试错法; 新安江模型; 半湿润半干旱地区; 沔河流域

中图分类号: P334.92

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)03-0027-05

Application of Xin'anjiang model based on SCE - UA algorithm in Feng River Basin

DENG Yuanqian¹, LI Zhijia¹, LIU Jiaqi², ZHANG Hanchen¹, TONG Bingxing¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore the fitting effects of the artificial trial and error method and automatic optimization method based on SCE - UA algorithm in the mixed runoff area, the semi-humid and semi-arid Feng River Basin in Shaanxi Province was selected to optimize the parameters using Xin'anjiang model. This paper discusses the applicability of the Xin'anjiang model based on the SCE - UA algorithm in the Feng River Basin, and analyzes the variation of the parameters especially. It is found that the parameters of SM and CS simulated by the two methods were large. The results show that the Xin'anjiang model based on SCE - UA algorithm has good applicability in Feng River Basin, and it is reasonable to compare the parameters of artificial test and error method and improve the optimization speed and simulation precision, which is not only simple but also efficient.

Key words: SCE - UA algorithm; artificial trial and error method; Xin'anjiang model; semi-humid and semi-arid region; Fenghe River Basin

目前,用于洪水预报的流域水文模型较多,结构不同,根据各种方式可划分为不同的类型^[1]。其中之一是新安江模型,大量的研究表明该模型在湿润、半湿润地区是适用的^[2],模型本身的结构也已经基本得到了肯定。而模型参数的优化过程一直是一项繁琐、困难的工作,阻碍其推广应用。且在半湿润半干旱地区的产汇流特性相对于湿润地区有着较大的差异,且降水年际间变化相对较大,年内分配也通常不均匀,再加上人类活动对下垫面的影响,新安江模型运用后虽然精度有时候较高但参数常常是不合

乎实际意义的^[3]。因此有必要通过用一种快速有效的方法对新安江模型参数进行优选,搜索模型参数的全局最优解,为产汇流水文预报计算提供一套适宜的参数。

模型参数的率定方法应用较多的有人工试错法和基于计算机的自动优化法,前者缺乏客观性且需足够的经验,后者简单方便且应用广泛。国内使用较多的有遗传算法、粒子群算法、罗森布洛克法等^[4]。这些搜索方法在优化过程中易出现局部最优,而全局搜索法则弥补其中的不足。赵人俊发现

收稿日期:2017-02-20; 修回日期:2017-04-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41130639、51679061);水利部公益性行业科研项目(20155001322)

作者简介:邓元倩(1989-),女,安徽宿州人,硕士研究生,从事水文预报和流域水文模型研究工作。

参数间的最优情况不只是单纯的一个点,更多的是一个面^[5-6]。因此,参数的率定则须用全局优化方法来计算。本文以陕西沔河流域为例,通过人工试错法和基于 SCE- UA 算法的全局优化研究新安江模型参数的率定问题,重点分析了参数的变化情况、模拟精度的改变以及在全局优化中初值和目标函数的选取对参数寻优结果的影响。

1 新安江模型

三水源新安江模型是赵人俊教授提出来的^[7],对国内外的洪水预报及水文发展有重要影响。模型结构主要分为 4 个层次^[8]。其中,单元面积水文模拟常采用:(1)产流用蓄满产流概念;(2)蒸散发分为上、下、深三层蒸发模式;(3)水源分为地表、壤中及地下径流三种水源;(4)汇流有坡地和河网汇流两个阶段。而模型参数优选面临的困难主要表现为:模型自身结构的独立、有效性等引起的;参数本身也有一定的意义,取值受到限制;参数间是相互关联的,不是独立的,其取值不唯一或存在“异参同效”的效果。面对这些困难,采用传统的方法很难寻得全局最优解,本文采用 SCE- UA 算法辅之以很少的参数固定可优化得到全局最优解。

2 SCE- UA 算法

2.1 SCE- UA 算法简介

SCE- UA (Shuffled Complex Evolution Algorithm)算法是由美国亚利桑那州大学 Duan 等^[9]于 1992 年提出来的,有效地解决参数优化问题中常见的多峰值、多噪声、不连续、高维、非线性等问题。它能高效率、迅速地搜索到流域模型参数的全局最优解,其应用非常普遍,周洋洋等^[10]将该算法用于 API 模型的应用;李德龙等^[11]通过改进智能优化算法与 SCE- UA 算法对比应用于洪水评估;李小波

等^[12]利用 SCE- UA 算法构建 SCE- UA- PP 水量分配模型。本文则采用 SCE- UA 算法进行自动优化新安江三水源模型参数。

SCE- UA 参数较多^[13],大部分参数值可依据已有经验取其值,但 p 是复合形的个数,要单独考虑,本文取 $p = 2$ 。根据文献^[9]推荐 $m = 2n + 1, q = n + 1, s = pm, \alpha = 1, \beta = 2n + 1$ 。其中 m 为每个复合形顶点数, n 为待优化的参数数目, q 为每个子复合形顶点个数, s 为种群的大小, α 和 β 为父代产生子代的个数和代数,算法详细步骤如下所示^[14-15]:

(1) 初始化。假设待优化的问题是 n 维问题,选择 $p \geq 1$ 和 $m \geq n + 1$ 计算样本点的数目 s 。

(2) 产生样本点。在可行空间随机采取 s 个样本点记为 $x_1, x_2, \dots, x_s$, 计算每一点 x_i 的函数值记为 f_i 其中 $i = 1, 2, \dots, s$ 。

(3) 对样本点进行排序。把得到的 s 个样本点按升序排列,结果仍然记为 (x_i, f_i) , 其中 $i = 1, 2, \dots, s$; $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_s$, 将其存贮到数组中: $D = \{(x_i, f_i), i = 1, 2, \dots, s\}$ 。

(4) 进行复合形划分。将 D 分成 p 个复合形记为 $A_1, A_2, \dots, A_p$, 每个复合形包含 m 个点使得:

$$A_k = \{x_{k,j}, f_{k,j} \mid x_{k,j} = x_{k+p,j+1}, f_{k,j} = f_{k+p,j+1}\}$$
$$j = 1, 2, \dots, m$$

(1)

(5) 演化复合形。依据竞争的复合形演化算法 (CCE) 分别对各复合形进行演化。

(6) 混合复合形。将 $A_1, A_2, \dots, A_p$ 代替到 D 中, 并对 D 按目标函数的升序进行排序。

(7) 收敛性判断。若达到收敛条件则停止, 否则返回第 4 步。

2.2 优化过程

2.2.1 参数上下限取值 新安江日、次模型参数上下限如表 1、表 2 所列。其中,某些参数值依据日模型结果给出,故表 2 不在重复列出。

表 1 日模型参数上下限

参数	K	B	C	WUM	WLM	WDM	IM	SM	EX	KG	CG	CI	CS	X
上限	1.5	0.3	0.10	20	60	40	0.01	60	1.5	0.69	1	1	1	0.5
下限	0.5	0.2	0.05	15	60	40	0.01	10	1	0.01	0.9	0.1	0.1	0

表 2 次模型参数上下限

参数	SM	EX	KG	CG	CI	CS	X
上限	60	1.5	0.69	0.998	1	1	0.5
下限	10	1	0.01	0.9	0.1	0.1	0

2.2.2 目标函数 在参数优化的过程中目标函数的选择将会影响优化的计算结果以及计算进程。本研究在计算中用到 3 个目标函数,通过前人的研究结果表明,用最小绝对误差作目标函数获得的结果相比用最小二乘函数更加稳定。故本研究在日模型

中用年水量最小绝对误差作为目标函数^[16-17]。

第1个方程用于计算整个资料时段的预报与实测总流量间的差值,目标函数计算公式如下:

$$Obj_1 = \left| \frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs}(i) - \sum_{i=1}^n Q_{Cal}(i)}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}(i)} \right| \quad (2)$$

式中: Obj_1 为目标函数值, m^3/s ; $Q_{obs}(i)$ 为观测得出的1年中第*i*天的流量, m^3/s ; $Q_{Cal}(i)$ 为计算得出的1年中第*i*天的流量, m^3/s 。

第2个方程用来计算平均相对误差,其方程如下:

$$Obj_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{W_{obs}(i) - Q_{Cal}(i)}{Q_{Obs}(i)} \right| \quad (3)$$

式中: Obj_2 为目标函数值, m^3/s 。

第3个方程用来计算相对平均对数绝对误差,其方程如下:

$$Obj_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log \left[\left| \frac{Q_{obs}(i) - Q_{Cal}(i)}{Q_{Obs}(i)} \right| + 1 \right] \quad (4)$$

所以,最终得到的目标函数是 F ,其公式如下

$$F = \sum_{i=1}^y (Obj_1(i) + Obj_2(i) + Obj_3(i)) \quad (5)$$

式中: y 为参与率定的实测资料的年数。

2.2.3 精度指标及迭代停止准则 在水量平衡的基础上,次洪模型以洪峰、合格率以及确定性系数 DC 为精度准则。在循环过程中为了防止死循环^[16-17],符合下面情形之一则停止计算:(1)在计算过程中5次循环后目标函数仍无法提高0.01%的精度;(2)5次循环后参数值和目标函数均无显著性的改善;(3)迭代已经达到循环的最大次数。

3 应用实例

3.1 沔河流域模拟应用

沔河是渭河南岸较大的一级支流,于1934年5月设立秦渡镇水文站,其断面以上控制集水面积约为566 km^2 ,河长42 km ,比降25.7‰。年均降水量约600~800 mm ,降水年际变化大,年内分配不均,雨水主要集中在7~9月份3个月,占全年降水量的60%。多年平均气温13.3℃,年极端最高温度43.4℃,年极端最低温度-17.1℃。该流域属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候,四季气候变化明显。

根据秦渡镇水文站2002~2014年13 a的实测的日降水、蒸发、流量、时段雨量、洪水资料等,对沔河流域的新安江模型参数进行率定。本文利用 Arc-GIS 平台从 DEM 中提取流域基本信息,主要包含下

垫面特征、水系、河网等。根据沔河流域的雨量站点情况,用泰森多边形分块得到各雨量站的面积权重。通过 ArcGIS 平台建立与模型之间的联系,实现水文模型的输入输出,为模型的运行提供必要的技术平台支撑。

三水源新安江模型总共有17个参数,绝大部分参数都有一定的物理意义。若在模型运行中对全部参数都率定,则可能引起各参数存在很大的差别,且率定出的参数结果将不一定符合实际意义。在一般情形下,可针对不同的区域将参数划分为敏感参数和非敏感参数两类^[17]。在模型参数率定中,根据流域实际情况结合已有的相关经验对于不敏感的参数给定相关值不参加优选,只针对较敏感的参数进行率定即可。

本研究针对沔河流域用人工试错法和自动优化法这两种方法对三水源新安江模型进行参数率定。并在率定中对于不敏感的参数如: K 、 B 、 C 、 WM 、 IM 、 EX 、 CG 、 X 根据日模型率定的结果直接给定,针对敏感参数如: SM 、 KG 、 KI 、 CS 、 L 进行逐一率定。沔河流域共选取15场洪水,其中前10场用于率定,后5场用于验证。

模型优化的参数值如表3所列;模拟结果特征值如表4所列。

表3 沔河流域次洪水模拟参数值

序号	参数	参数意义	参数值	
			R	S
1	K	蒸散发折算系数	0.7	0.77
2	WUM	上层张力水容量 /mm	20	20
3	WLM	下层张力水容量 /mm	80	80
4	C	深层散发系数	0.09	0.09
5	WM	张力水容量 /mm	160	160
6	B	流域蓄水容量分布曲线指数	0.3	0.3
7	IM	不透水面积所占比例	0.01	0.01
8	EX	流域自由水容量分布曲线指数	1.2	1.2
9	SM	自由水容量 /mm	16	28
10	KI	壤中流出流系数	0.3	0.39
11	KG	地下水出流系数	0.4	0.31
12	CI	壤中流消退系数	0.65	0.74
13	CG	地下水消退系数	0.998	0.998
14	L	河网汇流滞时 /h	1	1
15	CS	河网水流消退系数	0.035	0.738
16	X	河道汇流的马斯京干法系数	0.35	0.35

注:表中 R 为人工试错法;S 为 SCE-UA 算法。

表 4 沔河流域次洪水模拟结果特征值

分期	洪 号	总雨量/ mm	实测 径流 深/mm	计算径流深/ mm		实测 洪峰/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	预报洪峰/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		径流深相 对误差/%		洪峰相对 误差/%		峰现时 差/h		确定性 系数	
				R	S		R	S	R	S	R	S	R	S	R	S
率 定 期	2002060709	141.51	71.53	71.22	67.06	808	661.8	702.5	-0.43	-6.25	-18.09	-13.06	-2	-3	0.88	0.92
	2003090415	76.34	73.92	71.53	68.18	314	323.6	322.9	-3.23	-7.77	3.06	2.83	0	0	0.94	0.97
	2003091715	124.83	79.01	85.91	86.14	462	431.6	448.4	8.73	9.02	-6.58	-2.94	1	1	0.87	0.93
	2005100515	31.40	27.91	27.47	25.33	155	139.3	124	-1.57	-9.24	-10.13	-20	2	2	0.66	0.84
	2007071715	85.95	48.01	48.53	53.85	180	173.2	186.4	1.08	12.16	-3.78	3.56	2	3	0.83	0.84
	2007082914	71.04	37.04	43.3	44.45	227	245.9	241.2	16.9	20	8.33	6.26	0	0	0.78	0.81
	2008071915	126.23	39.58	52.17	54.44	297	329.3	349.8	31.8	37.54	10.88	17.78	-2	-1	0.73	0.75
	2009082801	81.35	58.22	53.94	53.12	427	376.0	374.8	-7.35	-8.76	-11.94	-12.22	3	2	0.83	0.92
	2010090509	115.78	77.18	75.33	76.96	362	366.8	398.1	-2.4	-0.29	1.44	10.09	-2	-2	0.82	0.84
	2011072815	122.37	51.49	58.11	58.54	267	289.9	293.7	12.86	13.69	8.58	10	0	-1	0.83	0.87
验 证 期	2011090914	95.27	81.39	71.96	74.28	325	326.8	327.9	-11.59	-8.74	0.55	0.89	-1	-2	0.84	0.9
	2012083020	90.91	40.69	40.63	42.86	296	262.6	272.5	-0.15	5.33	-11.28	-7.94	-1	0	0.9	0.9
	2013052803	67.84	61.48	48.14	50.01	352	305.6	333.9	-21.7	-18.66	-13.18	-5.14	-1	-1	0.75	0.79
	2014082920	81.34	18.41	19.28	21.00	110	98.8	105.7	4.73	14.07	-10.18	-3.91	3	2	0.53	0.74
	2014090615	132.49	75.09	67.7	69.89	377	333.1	351.7	-9.84	-6.93	-11.64	-6.71	-3	-3	0.74	0.81
均值									8.96	11.9	8.64	8.22	1.5	1.5	0.8	0.86
合格率/%									86.70	93.30	100	100				

注:表中 R 为人工试错法;S 为 SCE- UA 算法。

3.2 结果分析

3.2.1 参数变化 由表 3 可见利用人工试错法和 SCE- UA 算法率定的三水源新安江模型参数可以看出,两种方法下参数变化较大的是 SM 、 CS 。由于沔河流域属于半湿润半干旱地区,根据经验,在半湿润半干旱地区 WM 通常约为 150 ~ 200 mm,所以两种方法取值都合理。而对于 SM 和 CS 这两个参数,由其物理意义得知参数 SM 反映的是表层土的蓄水能力,其取值受降雨被时段均化的影响,日模值偏小,在次模中需变大且重新率定; CS 则需通过模型率定来检验。根据流域实际情况得知基于 SCE- UA 算法优化的参数结果更合乎实际。

3.2.2 精度变化 由表 4 中得知,两种方法径流深相对误差均值分别为 8.96 mm、11.9 mm,相差不大,径流深合格率为 86.7%、93.3%,洪峰合格率和峰现时间误差均值都相等均为 100%、1.5 h。确定性系数均值分别为 0.80、0.86,相对提高了 7.5%,综上,根据水文预报规范评定标准基于 SCE- UA 算法优化出的结果更优,绝大部分达到了乙级或以上标准^[18]。

3.2.3 初始值和目标函数 在自动优化的过程中发现参数初始值和目标函数的选取对模型结果有着至关重要的影响。在参数优化中,对于待优化的参数初始区间的选取直接影响到模拟的结果、优化进

程的快慢以及率定出的参数是否合理,故需要根据流域实际情况给出合适的区间值。同时,目标函数选取也至关重要,以往根据单目标率定的结果精度较差,本文在次洪模型中以洪峰、洪量合格率以及确定性系数 DC 为目标函数进行多目标优选。

具体该流域实测与模拟洪水过程线如图 1 和图 2 所示。其中,图 1 为率定期、图 2 为验证期。

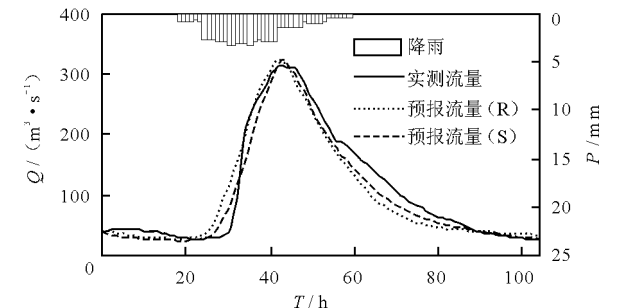


图 1 2003090415 场洪水对比过程

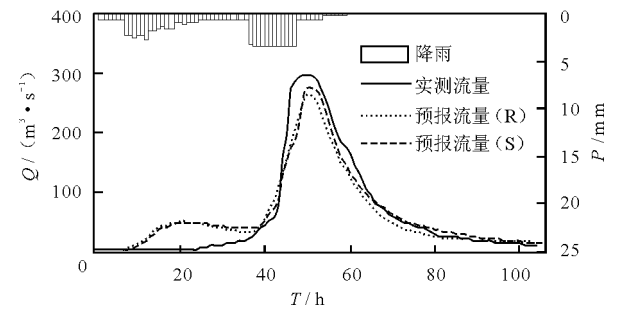


图 2 2012083020 场洪水对比过程

从图1中可以看出模拟和实测流量过程线吻合良好,峰现时间的偏差也较小,洪水的起涨过程基本一致。但从图2中可以看出用两种方法的模拟的过程线基本一致但和实测的过程线在起始阶段相差较大,原因可能与模型自身的结构有关或者实测资料本身的误差。

4 结 论

针对半湿润半干旱地区的产汇流特性差异较大、降水年际间变化相对较大,且年内分配不均匀等特点,新安江模型在精度指标较高的同时常会出现参数不合理。本文以沔河流域为例,通过用一种快速有效的方法对三水源新安江模型进行参数率定,搜索其参数的全局最优解。得到以下几点结论:

(1)三水源新安江模型在沔河流域适用良好,优化参数值比较合理,在模型运行中基于 SCE-UA 算法的自动优化法相对人工试错法更加简单、迅速的寻得参数全局最优解,节省了大量的时间,其中洪峰合格率提高了 7%,确定性系数也相对提高了 7.5%,精度得到提高,模拟结果更优。

(2)在两种不同的方法中发现参数 SM 、 CS 变化较大,可能是参数间的相互关联及随机性导致的。

(3)优化中发现参数初始值和目标函数的选取对于参数优化结果非常关键,日模中重点是水量平衡的控制,次洪模拟在保证水量平衡的前提下,还要考虑洪量合格率、洪峰合格率等综合指标模拟的好坏。

对于如何避免在参数优化中“异参同效”现象的出现,则需要对模型参数的优化技术、参数间的相互关系以及水文过程的物理规律作进一步探讨。

参考文献:

- [1] 包为民. 水文预报(第3版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [2] 华舒愉,顾圣平,贺军,等. 三水源新安江模型参数优化及其应用[J]. 水电能源科学,2013,31(2):23-26+242.
- [3] 张梦婕,刘晋,李致家,等. 新安江-海河模型在阜平流

- 域的应用[J]. 人民黄河,2014,36(11):30-32+140.
- [4] 唐运忆,栾承梅. SCE-UA 算法在新安江模型及 TOP-MODEL 参数优化应用中的研究[J]. 水文,2007,27(6):33-35.
- [5] 赵人俊,王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文,1988,8(6):2-9.
- [6] 董洁平,李致家,戴健男. 基于 SCE-UA 算法的新安江模型参数优化及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(5):485-490.
- [7] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利水电出版社,1984.
- [8] 赵坤,傅海燕,李薇,等. 流域水文模型研究进展[J]. 现代农业科技,2009(23):267-270.
- [9] 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.
- [10] 周洋洋,李致家,姚成,等. 基于 SCE-UA 算法的 API 模型应用研究[J]. 水力发电,2014,40(4):13-16.
- [11] 李德龙,许小华,黄萍,等. 基于改进智能优化算法的投影寻踪模型在洪水评估中的应用研究[J]. 水利水电技术,2015,46(12):124-128+132.
- [12] 李小波,杨霄,陈刚. SCE-UA-PP 水量分配模型及应用[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(4):93-97.
- [13] 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),2006,36(4):361-365.
- [14] Duan Qingyun, Sorooshian S, Gupta V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models[J]. Journal of Hydrology, 1994, 158(3-4):265-284.
- [15] Eckhardt K, Arnold J G. Automatic calibration of a distributed catchments model[J]. Journal of hydrology,2001,251(1-2):103-109.
- [16] Zhao Renjun. The Xinanjiang model applied in China[J]. Journal of Hydrology, 1992, 135(1-4):371-381.
- [17] 张利茹,管仪庆,王君,等. GLUE 法分析水文模型参数不确定性的研究[J]. 水力发电,2010,36(5):14-16.
- [18] 中华人民共和国水利部. SL 250-2000 水文情报预报规范[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.