

新安江模型参数有效优化及不确定性评估

王文川^{1,2}, 程春田¹, 邱林², 杨斌斌¹

(1. 大连理工大学水电与水信息研究所, 辽宁大连 116085; 2. 华北水利水电学院, 郑州 450011)

[摘要] 应用新安江模型进行水文模拟时,由于模型本身的不足及参数多、信息量少等原因,会出现率定的最优参数组不唯一、不稳定等问题。考虑到以往的参数优选,都只得出一个参数组,不能反映出其不确定性状况。提出应用基于马尔可夫链蒙特卡罗(MCMC)理论的 SCEM-UA 算法,通过双牌流域以 1 h 为时段间隔的 36 场典型洪水数据对新安江模型参数进行优选和不确定性评估。结果表明,该算法能很好地推出新安江模型参数的后验概率分布;率定和检验结果分析也表明,应用 SCEM-UA 算法对新安江模型进行优选和不确定性评估是有效和可行的。

[关键词] 新安江模型;参数率定;不确定性评估;SCEM-UA

[中图分类号] P338+.9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)03-0100-08

1 前言

概念流域水文模型是以流域为系统,模拟流域上降雨径流形成过程,在进行水文规律研究和解决生产实际问题时起着重要作用,除要求其结构合理外,模型模拟效果的好坏很大程度上依赖于模型参数的选择。由于水文现象具有高度的复杂性和随机性,水文模型在使用过程中,参数多,信息量少,就会产生参数的相关性和不稳定性等问题。正是因为模型各参数之间可能存在相依性,以及所构造的目标函数的非单峰(谷)性,按最优化方法求得的最优参数组可能不是唯一的,令参数优选成为十分复杂和困难的问题。新安江模型作为一个通过长期实践和对水文规律认识基础上建立起来的具有分散性参数的概念性水文模型^[1],目前对其参数的优选取得了许多可喜进展,主要有遗传算法(GAs)^[2,3],SCE-UA^[4],粒子群优化算法^[5-7]等。这些方法的目的是为了找到一个最好的参数组,无法对模型参数的不确定性进行评估。事实上,模型参数通常会有误差倾向,主要由于模型是在假设、概化和判断的基础

上建立起来的,加上率定模型的数据包含的测量误差,因此模型不可能真正模拟现实的系统。Kuczera 和 Parent 指出^[8]:没有对参数不确定性的评估,无法评定模型参数值和流域特征之间的相互关系及对将来水文事件响应的置信度。即使对模型应用有熟练的技巧和想象力,也不应仅依靠唯一确定的模型参数。

近年来,水文模型参数的不确定性评估和水文预报的不确定性分析成为国际上一个活跃的研究方向。研究方法主要包括 GLUE (generalized likelihood uncertainty estimation) 方法^[9],BaRE (bayesian recursive estimation) 方法^[10],马尔可夫链蒙特卡罗(MCMC, markov chain monte carlo)方法^[11],SCEM-UA (shuffled complex evolution metropolis algorithm) 方法^[12,13]等。相对来说,对我国应用得非常广泛的新安江模型,其模型参数不确定性分析方面研究还较少见,还没有开展其参数不确定性范围的有效性评估研究。

近些年来,随着水情测报系统的广泛深入应用,特别是 1998 年大洪水后国家防总进行全国水库洪

[收稿日期] 2008-09-17; **修回日期** 2008-12-03

[基金项目] 国家自然科学基金(50679011);水利部公益性行业科研专项(200801015);华北水利水电学院高层次人才科研启动资助项目(200821)

[作者简介] 王文川(1976-),男,河南鹿邑县人,博士,主要从事水电系统不确定因素分析及优化建模;E-mail: wangwen1621@163.com

水预报调度系统工程试点以来,我国大中型水库已经积累了丰富的水情自动测报系统资料,为开展短期洪水预报方案及其模型研究打下了坚实基础。因此,以相对准确和连续序列的水情自动测报系统为基础,开展短期洪水预报模型参数及其不确定性问题研究是非常有意义的重要工作。

以湖南省双牌水库 2000—2006 年积累的水情自动测报系统资料为基础,经过洪水过程分割与还原计算,分析整理了 48 场 1 h 洪水过程资料。预报模型采用三水源新安江模型,应用 SCEM - UA 方法,对新安江模型参数进行了优化和不确定性评估,取得了有价值的研究成果。

2 新安江模型简介

新安江模型^[1]是具有分散性的模型,它把流域分成许多单元,对每个单元流域作产汇流计算,得出单元流域的出口流量过程;再进行出口以下的河道洪水演算,求得流域出口的流量过程;最后把每个单元流域的出流过程相加,求出流域出口的总出流过程。笔者用蓄满产流计算产流量;径流成分分为地面、地下和壤中流 3 种;采用三层蒸散发计算模型,3 种水源均按线性水库计算河网总入流,河网汇流采用分段马斯京根连续演算法。模型共有 16 个参数,包括 7 个产流参数:上层张力水容量 UM ,下层张力水容量 LM ,深层张力水容量 DM ,张力水蓄水容量曲线方次 B ,不透水面积比例 IM ,蒸发能力折算系数 KC ,深层蒸散发系数 C ;9 个汇流参数:表土自由水蓄水容量 SM ,表土自由水蓄水容量曲线方次 EX ,自由水蓄水水库对地下水的出流系数 KG ,自由水蓄水水库对壤中流的出流系数 KI ,壤中流的消退系数 CI ,地下水水库的消退系数 CG ,河网蓄水量的消退系数 CS ,马斯京干法的单元河段的两个参数 KE, XE 。

3 SCEM - UA 算法评估新安江模型参数不确定性

SCEM - UA 算法由 Vrugt 等人为优化和评估模型参数而提出的模拟搜索优化算法^[12]。SCEM - UA 算法是在 SCE - UA 算法^[14]的基础上,根据马尔可夫链蒙特卡罗 (MCMC) 理论,以 Metropolis - Hastings 算法取代 SCE - UA 中的坡降算法 (Downhill Simplex Method) 能估计出最有可能的参数集及后验概率分布,使算法陷入局部极点得以避免。当用 SCEM - UA 算法估计模型参数后验概率分布时,需

要计算每个参数集的似然估计。下面简要介绍其计算方法。

新安江模型作为概念性水文模型,可以概化为由输入产生输出非线性模型

$$\hat{y} = \eta(\xi | \theta) \quad (1)$$

式(1)中: \hat{y} 为模型估计出的 $N \times 1$ 维输出向量; ξ 为 $N \times r$ 维的模型输入变量矩阵; $\theta = (\theta^1, \theta^2, \dots, \theta^n)$ 为包含 n 个未知参数的向量, η 为水文模型非线性映射。假定模型预报的残差系列互相独立、同方差、正态分布。则其似然估计可通过下式计算^[15]:

$$L(\theta | y) = \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left| \frac{y_j - \hat{y}_j(\theta)}{\sigma} \right|^2 \right] \quad (2)$$

式(2)中: y 为样本观测数据(本例中为流域出口的流量过程); σ 为残差序列方差。

应用 SCEM - UA 算法优化和评估模型参数的步骤如图 1 所示。

4 应用实例

根据上述的原理和步骤,以双牌水库为应用实例,对新安江模型参数进行优化和评估。双牌水库流域处在亚热带季风气候区,流域面积 $10\,594 \text{ km}^2$,多年平均降雨量 $1\,500 \text{ mm}$,多年平均流量 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 。流域的洪水主要由暴雨形成。全流域分成 12 个单元流域,采用的资料为双牌水库 2000—2004 年的 36 场完整的典型洪水(间隔时段 1 h)对参数进行优化和不确定性评估。并以 2005—2006 年 12 场洪水对结果进行校核。表 1 给出了新安江模型参数范围。SCEM - UA 采用的参数为:复合形个数 $q = 10$,样本群大小 $s = 260$,为了达到较好的收敛效果,设最大模拟次数为 20 000 次。图 2 给出了由 SCEM - UA 算法生成的每个新安江模型参数的后验概率分布。从图 2 可以看出参数 K, UM, LM 很好地近似于正态分布以最优参数值为中心,其后验均值接近最优参数值。 B, SM, CI 近似对数正态分布。剩余的参数显示两个或多个众数,说明有多个峰值区域,这会给参数优化带来很大的困难;同时也说明尽管用了 36 场的洪水资料,仍不能提供足够的信息为模型参数优选,或者先前的经验范围需要修改。也得出了一些参数的比先前的经验参数范围更集中的区域,见表 2 参数的最小值 (Min) 和参数的最大值 (Max),同时,表 2 也给出了由 SCEM - UA 所获得的新安江模型 16 个参数的均值、标准差、变异系数、模型各参数间的相关系数及模型最优参数值。从

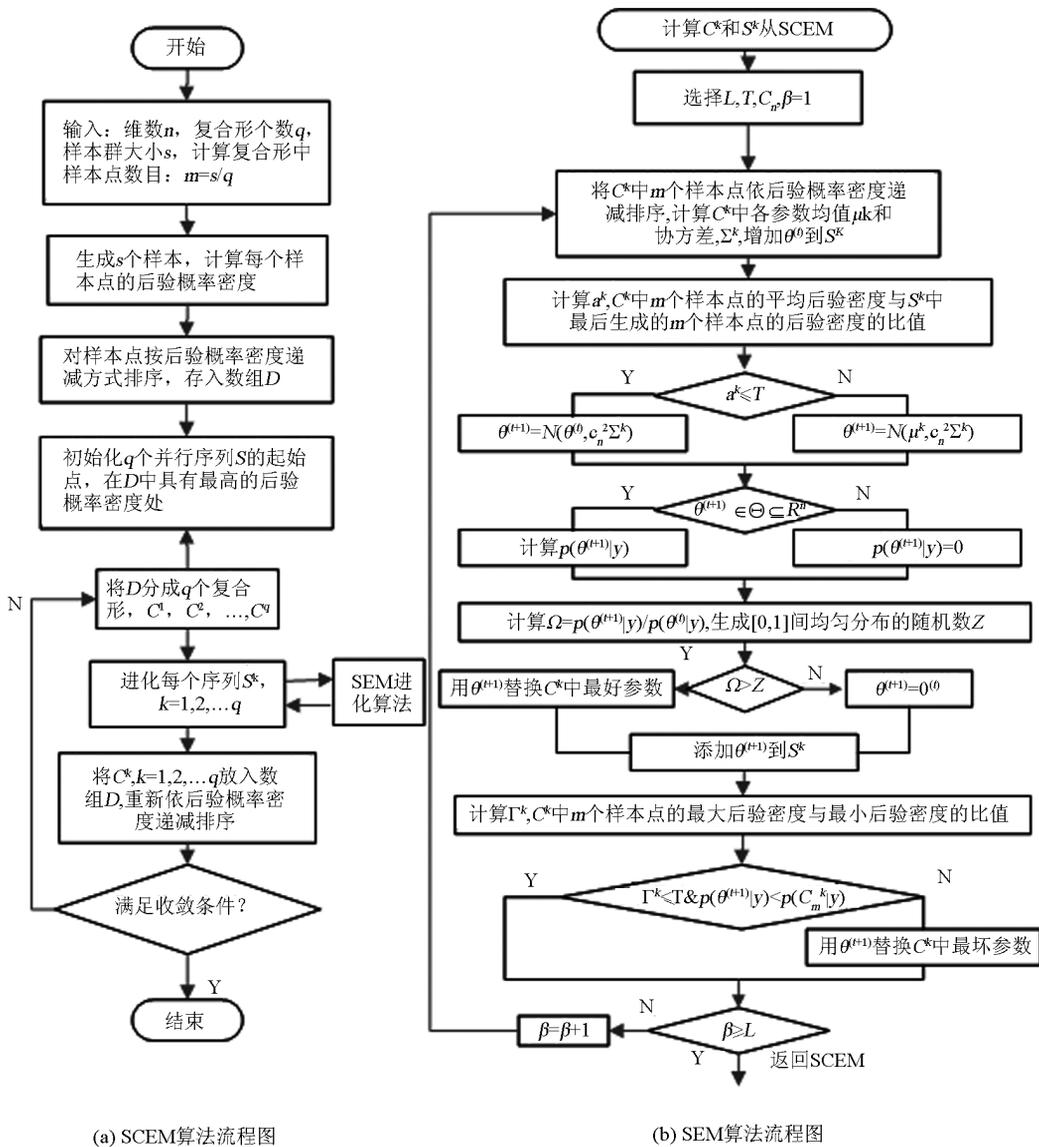


图1 SCEM-UA 算法流程图
Fig. 1 The flowchart of SCEM-UA

表2中可以看出,参数 DM, IM, XE 变异系数较大,说明这些参数的值的分布较为离散,其均值的代表性就较差,不确定性较大,没有一个更好范围的值域。 IM 是不透水面积比例因子, XE 是用马斯京根进行河道演算的流量比重因子,主要与洪水波的坦化变形程度有关,由 XE 的物理意义可知它是恒定流量的常数,双牌流域被分成12个单元流域,用统一的常数值 IM 和 XE 是不够严密的,其不确定性也较大。从表2中各个参数的相关性系数也可以看出,其间有些参数的相关性系数的绝对值是大于0.5的,进一步说明了率定新安江模型参数时,其解具有不稳定性。表3和表4分别给出了由SCEM-UA优选的最优模型参数,率定2000—2004年的36场

完整的典型洪水的性能指标与检验2005—2006年12场典型洪水的性能指标。从表3中可以得出率定洪水时,其峰值相对误差合格31次,合格率为86.11%;峰现时间合格33次,合格率为91.67%;场次洪水总量相对误差合格31次,合格率为86.11%。从表4可以得出检验洪水时,峰值相对误差合格12次,合格率为100%;峰现时间合格11次,合格率为91.67%;场次洪水总量相对误差合格11次,合格率为91.67%。说明优选的参数效果较好,完全可以用于洪水预报。为更好地验证SCEM-UA方法的性能,一个由SCEM-UA算法得出的模型参数结果也被给出(见表2)。算法参数设为: $m=2n+1, q=n+1, y=1, z=2n+1$ 作为默认值,复

合形的个数 $p = 10$ 。其与 SCEM - UA 结果对比见表 5, 可以看出它们几乎具有相同的效果, 但其优选的参数值并不相同, 说明了新安江模型参数具有异参同效现象, 也进一步说明了新安江模型及其参数存在很大的不确定性。为了更好地解释这种现象, 图 3 和图 4 分别给出了在率定和验证阶段的降雨、95% 的模型预测不确定区域来自模型和测量误差、参数预测不确定区域来自 SCEM - UA 算法取得的

最有可能参数集、观测值和用 SCEM - UA 算法取得的有最高后验概率密度参数的模拟值。从图 3 和图 4 可以看出, 模型不确定区域几乎完整地包含了观测流量, 但有些时期范围相当大, 这表示对于目前的模型结构和输入数据, 其不确定性是非常值得考虑的。而且, 参数不确定区域较窄, 不总是包含观测值, 这说明对输入的数据、模型结构都有待进一步研究和提高。

表 1 模型参数范围

Table 1 The range of model parameters

参数	KC	UM	LM	DM	C	B	IM	SM	EX	KG	KI	CI	CG	CS	KE	XE
最小值	0.1	10	50	10	0.1	0.1	0.001	10	1.1	0.1	0.2	0.1	0.7	0.01	0.5	0.01
最大值	1.2	40	90	50	0.3	0.9	0.1	40	1.4	0.4	0.6	0.99	0.99	0.4	2	0.5

表 2 双牌流域新安江模型参数优选的后验概率分布参数及最优参数值计算成果表

Table 2 The posterior probability parameters and the optimal parameter set found with highest posterior probability using the SCEM - UA and SCE - UA in Shuangpai basin of Xin'anjiang model

参数	KC	UM	LM	DM	C	B	IM	SM	EX	KG	KI	CI	CG	CS	KE	XE
Mean	0.647	20.899	69.093	60.561	0.142	0.963	0.039	38.859	1.200	0.297	0.376	0.106	0.983	0.208	1.997	0.169
SD	0.014	1.219	3.609	7.119	0.021	0.029	0.014	0.792	0.081	0.008	0.010	0.005	0.004	0.005	0.003	0.024
CV	2.170	5.831	5.223	50.685	14.817	2.975	34.501	2.038	6.721	2.823	2.708	4.617	0.412	2.527	0.145	14.138
KC	1.000															
UM	-0.038	1.000														
LM	-0.291	-0.425	1.000													
DM	0.022	-0.433	0.238	1.000												
C	0.071	-0.274	0.105	0.159	1.000											
B	-0.191	0.295	-0.316	-0.631	-0.073	1.000										
IM	0.199	0.318	-0.316	-0.666	-0.284	0.123	1.000									
SM	-0.024	-0.073	-0.063	0.060	0.127	-0.155	0.086	1.000								
EX	0.065	-0.200	0.230	0.666	0.235	-0.340	-0.798	0.164	1.000							
KG	-0.613	0.040	0.081	-0.107	-0.231	0.286	-0.245	-0.218	-0.122	1.000						
KI	0.633	0.117	-0.261	-0.231	0.039	-0.035	0.448	0.301	-0.193	-0.345	1.000					
CI	0.026	0.010	-0.053	0.021	0.035	0.090	-0.010	-0.141	0.057	0.070	0.232	1.000				
CG	0.059	-0.158	-0.003	0.133	0.307	-0.160	0.040	-0.009	0.215	-0.533	-0.012	0.092	1.000			
CS	-0.373	-0.080	0.283	0.143	-0.046	0.089	-0.392	-0.582	0.169	0.278	-0.535	-0.196	0.184	1.000		
KE	0.074	0.016	-0.019	-0.094	-0.054	0.077	0.009	0.028	-0.015	-0.046	0.031	-0.025	-0.024	-0.145	1.000	
XE	-0.102	-0.010	0.285	-0.242	-0.437	0.071	0.112	-0.087	-0.092	0.122	-0.109	-0.059	-0.053	0.245	0.105	1.000
Min	0.605	16.610	56.508	40.051	0.1	0.84	0.003	35.168	1.1	0.271	0.339	0.1	0.966	0.183	1.979	0.092
Max	0.703	26.047	81.461	79.986	0.213	0.999	0.071	39.999	1.4	0.326	0.410	0.131	0.99	0.227	2	0.246
SCE	0.646	20.926	67.410	48.920	0.159	0.890	0.1	41.266	1.179	0.285	0.385	0.1	0.988	0.198	2	0.174
SCEM	0.641	21.219	66.508	54.811	0.134	0.989	0.05	38.971	1.117	0.297	0.376	0.103	0.986	0.207	1.998	0.179

注: 均值 (Mean), 标准差 (SD), 变异系数 (CV), 参数间的相关系数, 最小值 (Min), 最大值 (Max)

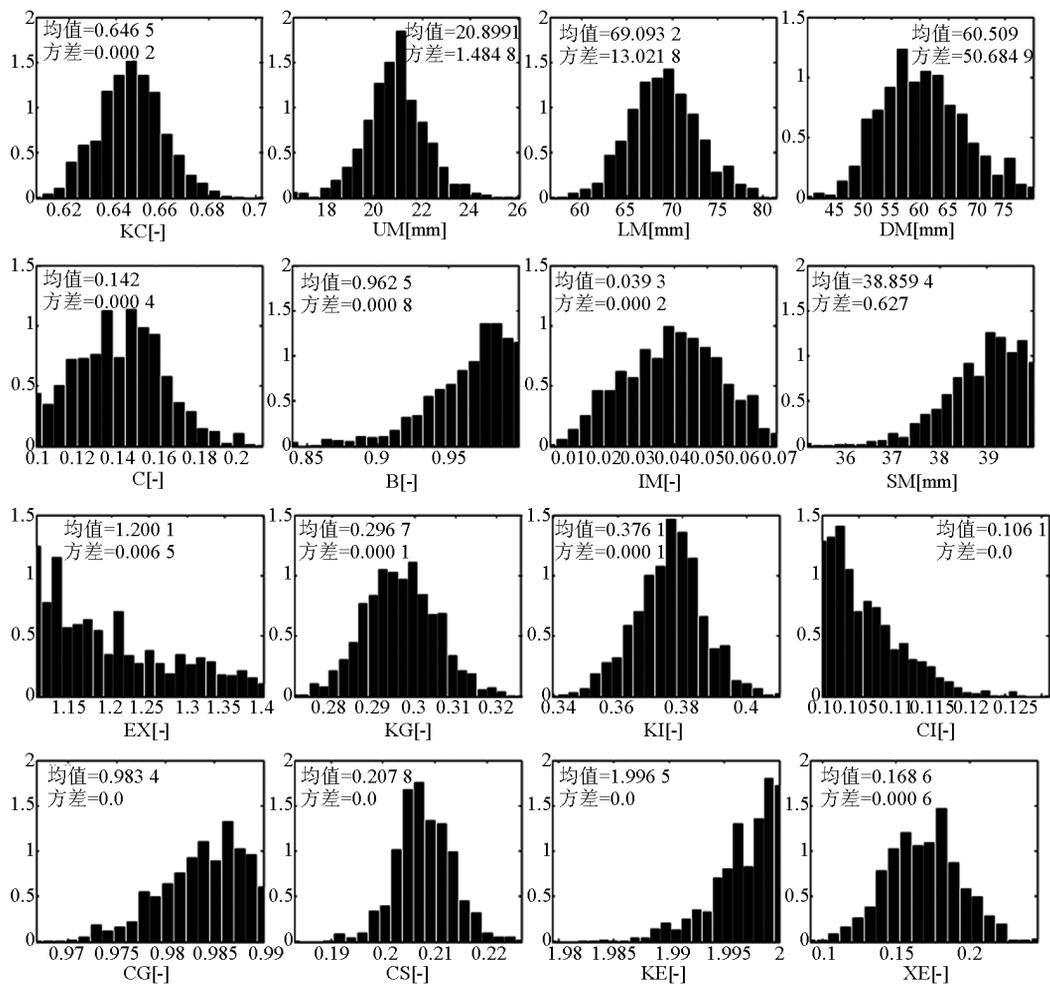


图2 新安江模型参数后验概率分布图

Fig. 2 Marginal posterior probability distribution of the Xin'anjiang model parameters

表3 参数优选率定洪水性能指标

Table 3 The performance index of flood using the calibrated parameters

洪号	实际峰值 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	模拟峰值 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	峰值相对 误差/(%)	实际峰现时间 年-月-日时	模拟峰现时间 年-月-日时	峰现时间误差 小时数	洪水总量相对 误差/(%)
20000426	718.5	666.1	-7.29	2000-04-26 22	2000-04-26 23	1	35.14
20000430	737.7	746.6	1.20	2000-04-30 12	2000-04-30 09	-3	6.41
20000510	691.3	736.7	6.56	2000-05-10 07	2000-05-10 07	0	19.93
20000527	1 343.4	1 274.0	-5.17	2000-05-27 07	2000-05-27 08	1	2.64
20000528	2 445.3	2 514.1	2.81	2000-05-28 16	2000-05-28 18	2	17.45
20001022	1 569.4	1 384.6	-11.78	2000-10-22 09	2000-10-23 16	31	18.79
20010406	1 494.3	1 124.3	-24.76	2001-04-06 17	2001-04-06 16	-1	-8.1
20010417	732.7	552.9	-24.54	2001-04-17 00	2001-04-16 23	-1	14.66
20010418	899.8	739.9	-17.77	2001-04-19 01	2001-04-18 23	-2	-13.44
20010421	1 298.1	1 121.6	-13.60	2001-04-20 21	2001-04-20 23	2	10.43
20010509	1 249.6	1 165.6	-6.72	2001-05-09 23	2001-05-09 22	-1	4.48
20010613	4 976.6	4 554.7	-8.48	2001-06-13 20	2001-06-13 17	-3	19.98
20010707	1 896.2	1 303.9	-31.24	2001-07-07 19	2001-07-07 23	4	-2.67
20020313	2 347.1	2 056.6	-12.38	2002-03-13 21	2002-03-13 21	0	12.79
20020411	1 656.6	1 203.0	-27.38	2002-04-11 02	2002-04-11 02	0	-9.68

洪号	实际峰值 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟峰值 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	峰值相对 误差/(%)	实际峰现时间 年-月-日时	模拟峰现时间 年-月-日时	峰现时间误差 小时数	洪水总量相对 误差/(%)
20020426	1 556.6	1 451.6	-6.74	2002-04-26 04	2002-04-26 03	-1	7.28
20020510	1 222.6	1 080.6	-11.61	2002-05-10 06	2002-05-10 04	-2	43.21
20020514	2 615.5	2 074.0	-20.70	2002-05-14 20	2002-05-14 20	0	9.5
20020618	3 184.9	2 718.2	-14.65	2002-06-18 12	2002-06-18 10	-2	-5.85
20020701	6 245.8	6 172.7	-1.17	2002-07-01 23	2002-07-01 21	-2	-3.14
20020721	1 132.1	1 071.6	-5.34	2002-07-21 06	2002-07-21 07	1	17.12
20020726	3 532.1	2 980.2	-15.63	2002-07-26 13	2002-07-26 14	1	-3.15
20020807	5 230.2	5 443.2	4.07	2002-08-08 00	2002-08-08 00	0	10.28
20020819	3 365.2	2 864.7	-14.87	2002-08-19 21	2002-08-19 21	0	17.72
20021030	3 226.5	3 077.5	-4.62	2002-10-30 08	2002-10-30 06	-3	5.45
20030420	2 196.2	2 229.6	1.52	2003-04-20 16	2003-04-20 17	1	10.16
20030513	1 650.9	1 762.7	6.77	2003-05-13 22	2003-05-13 23	1	20.21
20030515	4 490.6	4 464.0	-0.59	2003-05-15 22	2003-05-15 21	-1	16.74
20030607	3 171.1	2 892.9	-8.77	2003-06-07 04	2003-06-07 00	-4	17.16
20030629	1 079.3	905.7	-16.08	2003-06-29 03	2003-06-29 01	-2	7.32
20040508	1 267.9	1 266.9	-0.08	2004-05-08 07	2004-05-08 07	0	26.02
20040513	1 783.0	1 555.4	-12.77	2004-05-13 04	2004-05-13 03	-1	-11.11
20040517	2 879.7	2 707.9	-5.97	2004-05-16 18	2004-05-16 17	-1	18.52
20040531	1 101.9	1 132.3	2.76	2004-05-31 19	2004-05-31 17	-2	16.87
20040616	2 710.3	3 249.6	19.90	2004-06-16 21	2004-06-16 21	0	37.09
20040712	2 364.2	1 973.5	-16.52	2004-07-12 17	2004-07-12 16	-1	9.31

注:共计率定洪水 36 场,峰值相对误差合格 31 次,合格率为 86.11%;峰现时间合格 33 次,合格率为 91.67%;场次洪水总量相对误差合格 31 次,合格率为 86.11%

表 4 参数优选检验洪水性能指标

Table 4 The performance index of flood using the validated parameters

洪号	实际峰值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟峰值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	峰值相对 误差/(%)	实际峰现时间 年-月-日时	模拟峰现时间 年-月-日时	峰现时间误差 小时数	洪水总量相对 误差/(%)
20050215	1 775.5	1 900.3	7.03	2005-02-15 18	2005-02-15 18	0	13.88
20050420	627.4	581.7	-7.28	2005-04-20 06	2005-04-20 05	-1	33.83
20050506	1 041.5	897.4	-13.83	2005-05-06 08	2005-05-06 06	-2	13.03
20050527	1 552.4	1 436.7	-7.45	2005-05-27 22	2005-05-27 20	-2	12.48
20050606	1 579.1	1 532.7	-2.94	2005-06-06 04	2005-06-06 03	-1	18.35
20050622	2 776.0	2 796.6	0.74	2005-06-22 02	2005-06-22 01	-2	16.27
20060527	2 366.0	2 360.9	-0.22	2006-05-27 05	2006-05-27 05	-1	8.81
20060601	971.9	942.2	-3.05	2006-06-01 09	2006-06-01 09	-1	8.12
20060608	2 641.5	2 637.2	-0.16	2006-06-08 01	2006-06-08 01	0	15.12
20060615	2 329.1	2 133.1	-8.41	2006-06-15 02	2006-06-15 02	-1	18.09
20060716	5 020.2	4 295.5	-14.44	2006-07-16 05	2006-07-15 13	16	-4.03
20060805	1 877.4	1 567.3	-16.52	2006-08-05 01	2006-08-05 01	0	11.71

注:共计检验洪水 12 场,峰值相对误差合格 12 次,合格率为 100%;峰现时间合格 11 次,合格率为 91.67%;场次洪水总量相对误差合格 11 次,合格率为 91.67%

表 5 SCEM-UA 算法和 SCE-UA 结果对比表

Table 5 Comparison results of the SCEM-UA and SCE-UA

算法	率定合格率/(%)			检验合格率/(%)		
	峰差	峰现时间	洪量	峰差	峰现时间	洪量
SCE-UA	86.11	91.67	83.33	91.67	91.67	83.33
SCEM-UA	86.11	91.67	86.11	100	91.67	91.67

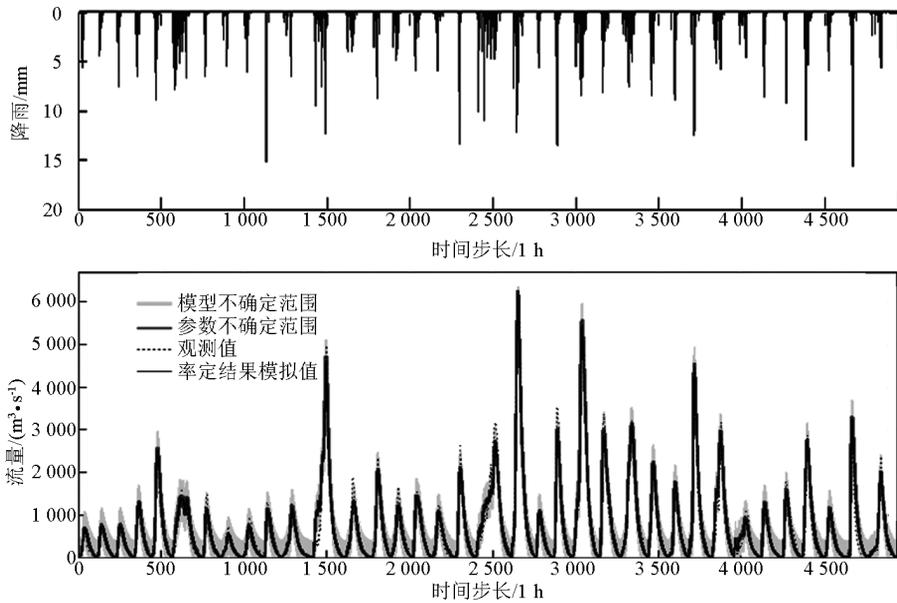


图3 降雨、模型预测不确定区域来自模型和测量误差、参数预测不确定区域来自 SCEM - UA 算法取得的最有可能参数集、观测值和用 SCEM - UA 算法取得的有最高后验概率密度参数的模拟值在率定阶段

Fig. 3 The rain, model prediction uncertainty that results from model and measurement uncertainty, discharge prediction uncertainty associated with the most probable parameter set derived using the SCEM algorithm, observed hydrographs and simulated hydrographs during calibration

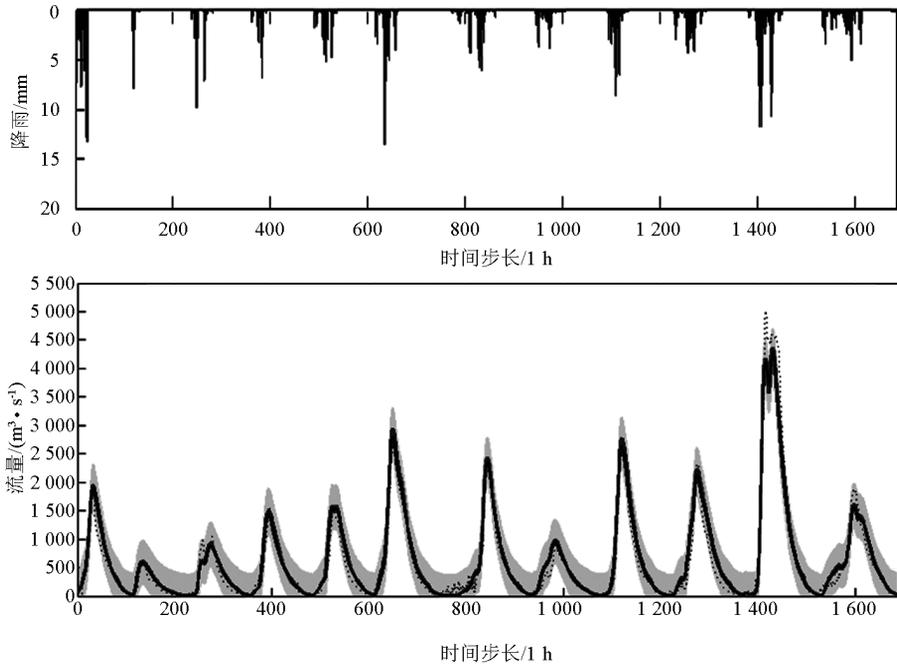


图4 降雨、模型预测不确定区域来自模型和测量误差、参数预测不确定区域来自 SCEM - UA 算法取得的最有可能参数集、观测值和用 SCEM - UA 算法取得的有最高后验概率密度参数的模拟值在验证阶段

Fig. 4 The rain, model prediction uncertainty that results from model and measurement uncertainty, discharge prediction uncertainty associated with the most probable parameter set derived using the SCEM - UA algorithm, observed hydrographs and simulated hydrographs during validation

5 结语

应用概念性模型进行水文模拟时,由于模型本身的不足及参数多、信息量少等原因,会出现最优参数组不唯一,不稳定等问题。以往的参数优选,都只得出一个参数组,无法对模型参数的不确定性进行评估,不能有效地考虑模型固有不确定性的影响,存在一定的片面性和局限性,使模型的实际应用受到限制。针对这一问题,提出应用基于马尔可夫链蒙特卡罗(MCMC)理论的 SCEM-UA 算法,通过双牌流域 36 场 1 h 典型洪水数据对新安江模型参数进行优选和不确定性评估。结果表明,该算法能够有效地优化和鉴定新安江模型参数,并能对其参数分布状况及不确定范围进行有效的评估,能够给出模型和参数集的不确定范围区域。这对洞察模型参数的分布规律及统计特性,进一步改善模型结构有一定的价值,对提高采取抗洪措施,最大限度地减少洪灾损失以及预报调度的风险分析具有特别重要的意义。

参考文献

- [1] 赵人俊. 流域水文模拟 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1984
- [2] 武新宇, 程春田, 赵鸣雁. 基于并行遗传算法的新安江模型参数优化率定方法 [J]. 水利学报, 2004, (11): 85-90
- [3] Cheng C T, Zhao M Y, Chau K W, et al. Using genetic algorithm and TOPSIS for Xinanjiang model calibration with a single procedure [J]. Journal of Hydrology, 2006, 316 (1-4): 129-140
- [4] Hapualrachchi H A P, Li Z-j, Wang S. Application of SCE-UA method for calibrating the Xin'anjiang watershed model [J]. Journal of Lake Sciences, 2001, 12 (4): 304-314
- [5] 江 燕, 胡铁松, 桂发亮, 等. 粒子群算法在新安江模型参数优选中的应用 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, (4): 14-18
- [6] 江 燕, 刘昌明, 胡铁松, 等. 新安江模型参数优选的改进粒子群算法 [J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1200-1206
- [7] 刘 力, 周建中, 杨俊杰, 等. 基于改进粒子群优化算法的新安江模型参数优选 [J]. 水力发电, 2007, 33 (7): 16-19
- [8] Kuczera G, Parent E. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm [J]. Journal of Hydrology, 1998, 211 (1-4): 69-85
- [9] Beven K J, Binley A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction [J]. Hydrological processes, 1992, 6 (3): 279-298
- [10] Thiemann M, Trosset M, Gupta H. Bayesian recursive parameter estimation for hydrologic models [J]. Water Resources Research, 2001, 37 (10): 2521-2535
- [11] Bates B C, Campbell E P. A Markov chain Monte Carlo scheme for parameter estimation and inference in conceptual rainfall-runoff modeling [J]. Water Resources Research, 2001, 37 (4): 937-947
- [12] Vrugt J A, Gupta H V, Bouten W, et al. A shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters [J]. Water Resources Research, 2003, 39 (8): 1201
- [13] Vrugt J A, Gupta Hoshin V, Dekker Stefan C, et al. Application of stochastic parameter optimization to the sacramento soil moisture accounting model [J]. Journal of Hydrology, 2006, 325 (1-4): 288-307
- [14] 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
- [15] Box G E P, Tiao G C. Bayesian Inference in Statistical Analysis [M]. Addison-Wesley-Longman, Reading, Mass, 1973

(下转 112 页)