

基于优化算法的新安江模型参数的估计

张 刚,解建仓,罗军刚,汪 妮

(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室,陕西 西安 710048)

【摘要】【目的】解决传统优化算法在新安江模型参数估计中存在的早熟、收敛速度慢和易陷入局部最优等问题。【方法】在标准 PSO 算法的基础上,引入小生境和交叉选择算子,对寻优过程中粒子的个体历史最好位置进行多样化处理,提出基于小生境和交叉选择算子的粒子群算法(NCSPSO),建立基于 NCSPSO 算法的新安江模型参数估计数学模型,并给出具体求解步骤。最后将该方法在具体流域的洪水预报中进行应用。【结果】NCSPSO 算法计算时间短,参数估计精度大大提高,且预报结果均达到了规范要求。【结论】NCSPSO 算法为新安江模型参数估计提供了一条新途径。

【关键词】 参数估计;新安江模型;小生境;交叉选择;粒子群算法

【中图分类号】 P333.2

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2011)01-0229-06

Application of optimization algorithm for parameter calibration with the Xin'anjiang model

ZHANG Gang, XIE Jian-cang, LUO Jun-gang, WANG Ni

(Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: **【Objective】** The study was conducted to overcome the disadvantages of classical optimization algorithm used to solve Xinanjiang model parameter estimation problems, such as premature convergence, poor convergence and liable to fall in local optima. **【Method】** Particle swarm optimization algorithm based on the niche, crossover and selection operators (NCSPSO), which carries out diversification treatment with history best position of particle in the process of optimization, was presented in this paper. The mathematical model and procedures for Xin'anjiang model parameter estimation by using NCSPSO were proposed in detail. The mathematical model was applied to specific basin. **【Result】** Study results show that this method has higher efficiency and precision in parameter estimation, and flood forecast result can meet standard of demand. **【Conclusion】** NCSPSO will be a new method for Xin'anjiang model parameter estimation.

Key words: parameter calibration; Xin'anjiang model; niche; crossover and selection; particle swarm optimization algorithm

概念性流域水文模型的参数优选是洪水预报的重要内容之一,其属于非线性优化问题。参数的准确估计对水文模型的预报精度至关重要,传统的参数估计多用人工试错法,但该方法存在耗时长、精度低等缺点。随着电子计算机技术的发展,目前出现

了多种求非线性函数解的优化算法,其中在水文模型参数优选方面得到应用的主要有 Rosenbrock^[1]、SCE-UA^[2-6]、遗传算法(GA)^[7-10]、粒子群(PSO)算法^[11-12]等。然而,一些学者研究表明,Rosenbrock和 SCE-UA 算法对模型结构、优化准则要求严格,

* [收稿日期] 2010-05-17

[基金项目] 国家“863”计划项目(2006AA01A126);国家自然科学基金项目(50979088);陕西省国际合作重点项目(2008KW-32)

[作者简介] 张 刚(1984—),男,陕西西安人,在读博士,主要从事洪水预报研究。E-mail: zhanggang3463003@163.com

[通信作者] 解建仓(1963—),男,陕西西安人,教授,博士生导师,主要从事水利信息化研究。E-mail: jexie@mail.xaut.edu.cn

受初始条件影响较大,容易陷入局部最优。遗传算法因其鲁棒性强、简单通用、可以处理非解析式的目标函数和约束等特点,已被大量应用,但其却存在“早熟”或收敛缓慢等不足。

鉴于以上情况,本研究提出一种基于小生境和交叉选择的粒子群算法(NCSPSO),通过引入小生境技术和交叉、选择算子,对寻优过程中粒子的个体历史最好位置进行多样化处理,从而提高收敛性并抑制早熟,最后通过一个具体实例验证了 NCSPSO 算法在新安江模型参数估计中的有效性,以期为新安江模型的参数估计提供技术支持。

1 NCSPSO 算法

粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)算法是由 Kennedy^[13]于 1995 年提出的。PSO 算法对低维函数的全局搜索能力强,寻优速度快,但是当函数为高维且多峰值时,容易陷入局部最优,并出现“早熟”现象^[14],使得粒子趋同化。

采用小生境技术对 PSO 算法进行改进是当前的研究方向之一。小生境是模拟生态平衡的一种仿生技术,适用于多峰函数和多目标函数的优化问题。例如在 PSO 算法中,通过构造小生境拓扑,将种群分成若干个子种群,动态地形成相对独立的搜索空间,实现对多个极值区域的同步搜索,从而可以避免 PSO 算法在求解多峰函数优化问题时出现“早熟收敛”现象。此外,在迭代计算中通过比较小生境数,确定关于多目标函数优化的非劣解集中的孤立点,并将该点作为 PSO 算法的全局最优位置,则可以改善非劣解集分布的均匀性。

交叉和选择算子是进化算法的重要组成部分,前者可以有效增加种群的多样性,后者则可以保留较好的个体进入子代群体;而差分进化(Differential evolution, DE)算法^[15]中关于这 2 个算子的定义适用于各种类型的参数,因此可以在进行相关算法设计时灵活地加以运用。

1.1 标准 PSO 算法

在 PSO 算法中,待求问题的解为搜索空间中的粒子。假设在 D 维空间中投放了 N 个粒子,其中第 i 个粒子的位置为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$,其速度为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。该粒子所经历的历史最好位置 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$,对应的函数值为 P_{best_i} ;整个粒子群所经历的历史最好位置 $G = (g_1, g_2, \dots, g_D)$,对应的函数值为 G_{best} 。

粒子群根据下面公式更新其速度和位置:

$$V_i^{t+1} = \omega \cdot V_i^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_i^t - X_i^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (G - X_i^t), \quad (1)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1}. \quad (2)$$

式中: V_i^{t+1} 是第 i 个粒子更新后的速度, ω 是惯性权重, V_i^t 是第 i 个粒子未更新时的速度, r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 之间的随机数, c_1 和 c_2 是加速常数, P_i^t 是第 i 个粒子未更新时的历史最好位置, X_i^t 是第 i 个粒子未更新时的位置, X_i^{t+1} 是第 i 个粒子更新后的位置。式(1)右侧的第 1 项为粒子先前的速度,表示粒子当前的状态;第 2 项为“认知”部分,表示粒子自身的思考;第 3 项为“社会”部分,表示粒子之间的信息共享与相互合作。

此外,为使粒子速度不致过大,可以设定其速度上限为 V_{max} ,下限为 V_{min} 。当 $V > V_{max}$ 时, $V = V_{max}$; 当 $V < V_{min}$ 时, $V = V_{min}$ 。

1.2 基于小生境和交叉选择的 NCSPSO 算法

由式(1)可知,在标准 PSO 算法中,粒子主要依靠 2 个最优位置(即个体历史最好位置和全局历史最好位置)指导其在搜索空间的飞行。在搜索过程中,如果个体历史最好位置聚集在搜索空间的局部最优解区域时,就会导致群体多样性缺失,从而使所有粒子迅速地靠近该区域,并陷入局部最优,出现“早熟收敛”或“搜索停滞”现象。为了克服上述缺点,本研究引入了 NCSPSO 算法,通过引入小生境技术和交叉选择算子,对寻优过程中粒子的个体历史最好位置进行多样化处理。

首先,根据小生境数确立孤立点。假设当前代个体历史最好的集合为 $CP = \{P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}) \mid i=1, 2, \dots, N\}$,计算该集合所有元素之间的距离,有:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^D (p_{ik} - p_{jk})^2}. \quad (3)$$

式中: d_{ij} 是集合 CP 内所有元素之间的距离, $i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, N$, 且 $i \neq j; k=1, 2, \dots, D$ 。相应的共享函数值为:

$$S(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - \frac{d_{ij}}{\sigma_{share}}, & d_{ij} < \sigma_{share} \\ 0, & d_{ij} \geq \sigma_{share} \end{cases}. \quad (4)$$

式中: $S(d_{ij})$ 为共享函数值, σ_{share} 为给定的小生境半径。在此基础上计算每个元素的小生境数,有:

$$niche(i) = \sum_{j=1}^N S(d_{ij}). \quad (5)$$

式中: $niche(i)$ 为第 i 个元素的小生境数, $i=1, 2, \dots, N$, 且 $i \neq j$ 。经过比较,小生境数最小的元素就是迭代个体历史最好位置中的孤立点 $Q = (q_1,$

q_2, \dots, q_D 。

然后,将所有个体历史最好值劣于孤立点值的粒子分别与孤立点进行交叉操作,产生临时位置 $PL_l = (pl_{l1}, pl_{l2}, \dots, pl_{lD})$,

$$pl_{lk} = \begin{cases} q_k, \text{rand}(k) \leq CR \\ x_{lk}, \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: pl_{lk} 为产生的临时位置,且其历史最好值劣于孤立点值的粒子数为 l ; k 为维数, $k=1, 2, \dots, D$; $l=1, 2, \dots, M$, M 为个体历史最好值劣于孤立点值的粒子数,显然 $M < N$; $\text{rand}(k)$ 为 $[0, 1]$ 内的随机数; CR 为交叉概率,且 $CR \in [0, 1]$ 。

最后,对所有的临时位置 PL_l 及相应的个体历史最好位置 P_l 进行选择操作。关于最小化问题,选择算子的定义如下:

$$P_l = \begin{cases} PL_l, F(PL_l) \leq F(P_l) \\ P_l, \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_l 为选择算子, $l=1, 2, \dots, M$; F 为求解问题的目标函数。

NCSPSO 算法在每一步迭代过程中,通过与相对孤立的个体历史最好位置的交叉选择操作,有效地实现了关于当前迭代个体历史最好位置的多样性分布。在设定群体规模 $N=40$, 维数 $D=20$, 最大迭代次数为 2 000, 惯性权重因子 $\omega=0.8$, 加速常数 $c_1=c_2=2$, 交叉概率 $CR=0.8$ 的情况下, Quadric 函数多样化处理的效果如图 1 所示。

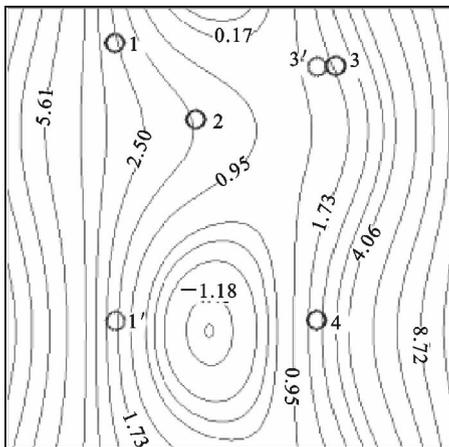


图 1 NCSPSO 算法多样化处理效果

Fig.1 Diversified treatment effect of NCSPSO

图 1 中的函数等值线分布说明,该搜索空间至少存在 2 个极值区域;1, 2, 3, 4 号 4 个圆形粒子显示了当前迭代个体历史最好位置的空间分布,其中粒子 2 同时也代表全局历史最好位置。可以看出,由于粒子 1~3 比较靠近搜索空间上方的局部极值

区域,如果使用标准 PSO 算法,就可能出现“早熟收敛”现象。然而,NCSPSO 算法却能够充分利用粒子 4 这个孤立点的信息,并采用交叉选择算子对粒子 1 和 3 分别进行更新,使得当前代个体历史最好位置的分布更趋合理。

综上所述,NCSPSO 算法的具体步骤如下:

Step1:在搜索空间内,初始化粒子的位置和速度,令计数器 $t=0$;

Step2:计数器 $t=t+1$;

Step3:计算所有粒子的目标函数值;

Step4:更新个体历史最好位置 $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})$ 和全局最优位置 $G = (g_1, g_2, \dots, g_D)$;

Step5:根据式(1)和(2)更新粒子的速度和位置;

Step6:根据式(3)~(5)确定个体历史最好位置中的孤立点 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_D)$;

Step7:根据式(6)和(7)进行交叉选择;

Step8:如果计数器 t 大于某一给定值,则停止计算,否则返回 Step2。

2 新安江模型

2.1 新安江模型的参数

新安江模型是一个分散性的多参数模型,是赵人俊^[16]于 1973 年提出的,主要适用于我国湿润与半湿润地区。该模型将大流域划分为多个单元流域,对每个单元流域作产汇流计算,得出单元流域的出口流量;再进行出口以下的河道洪水演算,得到该单元的出流过程;将所有单元流域的出流过程相加,即可得到流域出口的总出流过程。

本研究采用其三层蒸散发三水模型,产流量采用蓄满产流模型,径流分为地面径流、壤中流和地下径流 3 种;3 种水源按线性水库计算河网总入流,河网汇流采用滞后演算法计算。模型共有 15 个参数,其中 K 为蒸散发折算系数; SM 为自由水需水容量; KG 为地下径流出流系数; KSS 为壤中流出流系数; KKG 为地下水消退系数; $KKSS$ 为壤中流消退系数; CS 为河网蓄水消退系数;蓄水容量 $WM = WUM + WLM + WDM$,其中 WUM 、 WLM 和 WDM 分别为上层蓄水容量、下层蓄水容量和深层蓄水容量; IMP 为不透水面积比例; B 为蓄水容量曲线系数; C 为深层蒸散发系数; EX 为自由水容量分布指数; L 为洪水滞时。

上述各参数的取值范围见表 1。

表 1 新安江模型的参数取值范围

Table 1 Range of numerical value in extraction of parameter of Xin'anjiang model

参数 Parameter	K	SM	KG	KSS	KKG	KKSS	CS	WUM	WLM	WDM	IMP	B	C	EX	L
最小值 Minimum	0.2	10	0.01	0.01	0.950	0.5	0.2	5	60	15	0.01	0.1	0.08	0.5	0
最大值 Maximum	1.5	50	0.7	0.7	0.998	0.9	0.6	20	90	80	0.05	0.4	0.18	2	12

2.2 目标函数

常用目标函数评价实测流量与模拟流量过程的吻合程度,用不同的目标函数可以评价水文过程的不同特征。本研究在综合考虑总体水量平衡和流量过程吻合程度的基础上,尤其是将大洪水与小洪水加以区分,选用的目标函数为:

$$f_1 = \sum_{i=1}^{n_1} [Q_0(i) - Q_c(i)]^2 \left(1 + \frac{|\bar{Q}_0 - \bar{Q}_c|}{Q_0} \right), Q_0 > Q_r;$$

$$f_2 = \sum_{j=1}^{n_2} [Q_0(j) - Q_c(j)]^2 \left(1 + \frac{|\bar{Q}_0 - \bar{Q}_c|}{Q_0} \right), Q_0 \leq Q_r;$$

$$f = \min \left\{ \frac{\alpha f_1}{n_1} + \frac{(1-\alpha) f_2}{n_2} \right\}. \quad (8)$$

式中: f_1 为 $Q_0 > Q_r$ 时的目标函数; n_1 为 $Q_0 > Q_r$ 的

资料数; Q_0 为实测流量; Q_c 为根据模型得到的计算流量; \bar{Q}_0 为实测流量平均值; \bar{Q}_c 为计算流量平均值; Q_r 为控制流量量级参数,相当于一个门槛值; f_2 为 $Q_0 \leq Q_r$ 时的目标函数; n_2 为 $Q_0 \leq Q_r$ 的资料数; $n = n_1 + n_2$, 为资料的长度; f 为总目标函数; α 为不同目标函数的权重系数。从式(8)可以看出,对于不同的应用要求,可取不同的 Q_r 和 α 值。

3 应用实例

选用河南省伊河谭头站以上流域作为研究对象,该流域如图 2 所示。

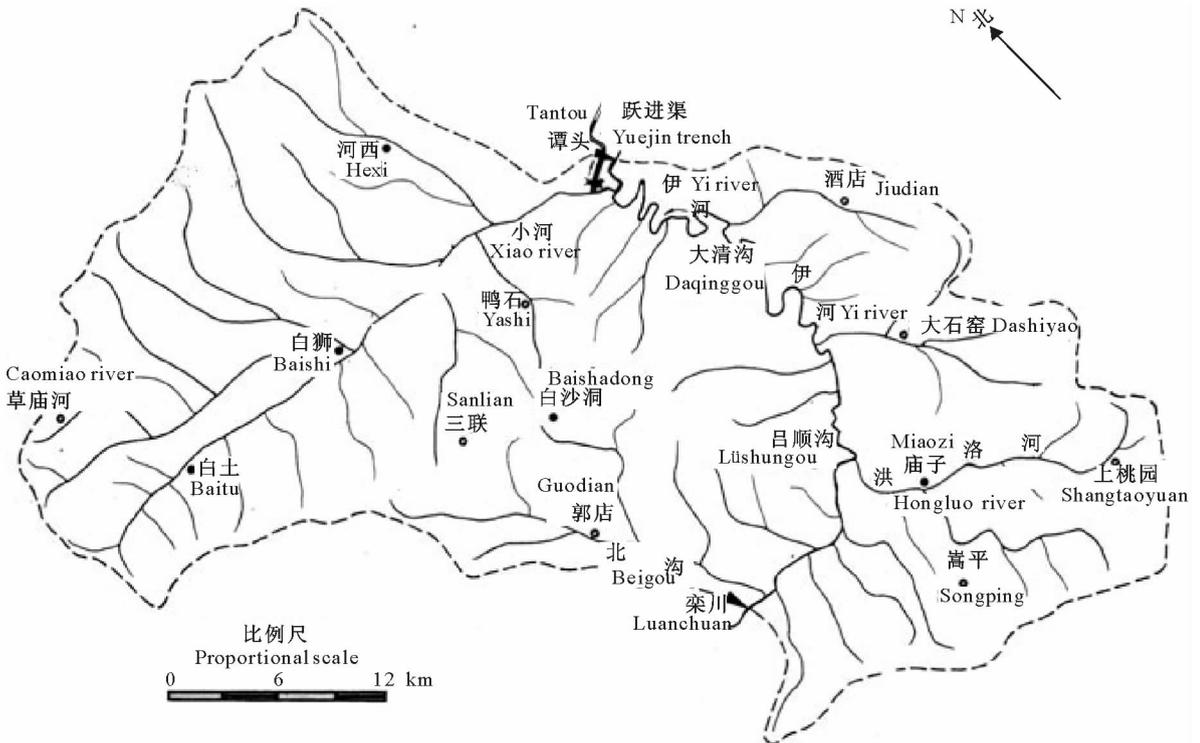


图 2 河南省伊河谭头站以上流域分布图

Fig. 2 Tantau station of Yihe River basin in Henan Province

伊河谭头站以上流域面积 1 695 km², 年平均降雨量 550 mm 左右,属于半湿润半干旱地区,内有陶湾、庙子、白土、谭头等重要雨量站。本研究以这四个站的降雨量平均值作为流域平均降雨量,以谭头站的流量作为流域的出流量,选用伊河谭头站以上

流域 1979—1990 年的 32 场洪水进行研究,用 NC-SPSO 算法对 1979—1987 年的 25 场洪水进行参数优选,并以 1987—1990 年的 7 场洪水对优选结果进行验证。其中,初始种群规模为 n ,迭代次数为 k , Q_r 和 α 的值与人工生成资料一致,谭头站以上流域参

数估计结果见表 2。由于篇幅所限,每场洪水的流 结果列于表 3。
量过程不一列出,而将次洪水的模拟及精度统计

表 2 伊河谭头站以上流域洪水参数的优选结果

Table 2 Result of calibrating parameters in Tantou station of Yihe River basin

参数 Parameter	K	SM	KG	KSS	KKG	KKSS	CS	WUM	WLM	WDM	IMP	B	C	EX	L
率定值 Value	0.784 3	16.517	0.281 7	0.513 4	0.697 9	0.615 7	0.200 1	17.860 5	72.261 2	78.259 4	0.01	0.272	0.137	0.999 1	2

表 3 伊河谭头站以上流域的洪水模拟结果及精度统计

Table 3 Result of flood simulation and accuracy statistics in Tantou station of Yihe River basin

洪号 Number	降雨量/ mm Precipitation	径流量 Runoff				洪峰流量 Peak discharge				洪峰滞 时/h Flood peak delay time	确定性 系数 Determinacy coefficient
		计算值/ mm Calculated value	实测值/ mm Measured value	绝对误 差/mm Absolute error	相对误 差/% Relative value	计算值/ (m ³ ·s ⁻¹) Calculated value	实测值/ (m ³ ·s ⁻¹) Measured value	绝对误差/ (m ³ ·s ⁻¹) Absolute error	相对误 差/% Relative value		
790914	51.02	19.74	20.18	0.44	-2.18	240.6	240	0.6	0.25	0	0.923 4
790922	28.21	9.08	8.79	0.29	3.30	338.4	338	0.4	0.12	0	0.910 8
800701	61.98	30.29	32.23	1.94	-6.02	495.7	485	10.7	2.21	0	0.970 6
800713	39.41	15.89	17.83	1.94	-10.88	289.9	329	39.1	-11.88	0	0.892 6
800804	44.29	20.11	21.09	0.98	-4.65	410.3	408	2.3	0.56	0	0.903 7
800823	32.93	13.48	12.37	1.11	8.97	204.7	208	3.3	-1.59	0	0.882 3
800916	29.67	11.67	11.59	0.08	0.69	295.1	294	1.1	0.37	0	0.791 6
801009	86.03	30.49	30.19	0.30	0.99	249.2	247	2.2	0.89	0	0.803 7
810714	62.23	28.64	31.47	2.83	-8.99	486.3	505	18.7	-3.70	0	0.902 6
810823	25.50	8.29	8.19	0.10	1.22	198.7	192	6.7	3.49	0	0.903 1
820706	36.89	9.56	9.67	0.11	-1.14	214.3	208	6.3	3.03	0	0.911 2
820730	182.78	121.74	120.38	1.36	1.13	2 071.4	2 090	18.6	-0.89	0	0.821 6
820812	23.28	10.20	10.24	0.04	-0.39	200.4	204	3.6	-1.76	0	0.852 4
830702	56.54	23.69	23.45	0.24	1.02	306.7	301	5.7	1.89	0	0.908 1
830730	87.55	40.69	39.82	0.87	2.18	892.1	906	13.9	-1.53	0	0.913 7
830811	42.63	19.08	19.18	0.10	-0.52	342.1	336	6.1	1.82	0	0.945 2
830902	27.91	10.11	10.31	0.20	-1.94	223.4	225	1.6	-0.71	0	0.907 3
831004	129.18	84.15	82.11	2.04	2.48	998.7	1010	11.3	-1.12	0	0.912 7
831017	26.30	9.48	9.67	0.19	-1.96	278.2	268	10.2	3.81	0	0.916 7
840511	57.90	21.87	22.16	0.29	-1.31	370.9	368	2.9	0.79	0	0.801 3
840706	75.63	23.13	22.34	0.79	3.54	378.1	379	0.9	-0.24	0	0.916 4
840908	83.78	30.49	29.81	0.68	2.28	576.2	581	4.8	-0.83	0	0.782 6
840921	100.65	58.84	58.46	0.38	0.65	762.4	748	14.4	1.93	0	0.843 7
850503	58.23	12.23	12.59	0.36	-2.86	390.5	397	6.5	-1.64	0	0.901 9
850525	46.95	10.59	10.95	0.36	-3.29	288.7	305	16.3	-5.34	0	0.923 7
* 870605	60.20	11.08	11.20	0.12	-1.07	342.8	357	14.2	-3.98	1	0.762 9
* 880809	60.45	15.62	15.11	0.51	3.38	304.9	359	54.1	-15.07	0	0.798 8
* 880815	39.03	16.90	16.84	0.06	0.36	425.6	441	15.4	-3.49	0	0.845 9
* 880818	48.28	11.06	12.38	1.32	-10.66	194.7	214	19.3	-9.02	0	0.859 4
* 890710	95.15	20.08	19.28	0.80	4.15	322.9	352	29.1	-8.27	0	0.842 2
* 890716	20.95	6.74	6.19	0.55	8.89	238.4	270	31.6	-11.70	0	0.918 9
* 890815	46.48	22.91	22.93	0.02	-0.09	280.6	330	49.4	-14.97	1	0.753 1

注: * 代表校核洪水。

Note: * represents check flood.

从表 3 可以看出,次洪水径流量绝对误差最大值为 2.83 mm,均值为 0.67 mm,相对误差最大值为 ±10.88%,均值为 3.22%;洪峰流量绝对误差最大值为 54.1 m³/s,均值为 13.17 m³/s,相对误差最大值为 ±15.07%,相对误差值超过 ±10% 的占 12.5%;峰现时间的计算值和实测值除 870605 和

890815 2 场洪水外,其余洪水均吻合较好,吻合程度为 93.75%;确定性系数最大值为 0.970 6,最小值为 0.753 1,平均为 0.875 9。

综合表 3 的计算结果,由水利部发布的《水文情报预报规范》(SL250-2000)可知,用于模拟的 32 场洪水的洪峰流量、峰现时间、径流量均小于其许可

差;根据确定性系数可知,32 场洪水中,有 17 场达到甲等水平,15 场达到乙等水平,全部合格。

上述研究结果表明,用 NCSPSO 对新安江模型进行参数估计,结果基本上是合理的,这为水文模型的参数估计提供了一种高效的优化算法。

4 结 论

NCSPSO 算法在基本 PSO 算法的基础上,引入小生境和交叉选择算子,对寻优过程中粒子的个体历史最好位置进行多样化处理,从而使其更容易寻找函数的最优解,且耗时更少。研究结果表明,用 NCSPSO 算法进行新安江模型参数估计,不仅效率高,而且精度好,为新安江模型的参数估计提供了一条新途径。

[参考文献]

- [1] Rosen Brock H H. An automatic method for finding the greatest or least value of function [J]. *Computer*, 1960, 3: 175-183.
- [2] Duan Q Y, Sorooshian S, Gupta V J. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall runoff models [J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(4): 1015-1031.
- [3] Duan Q Y, Sorooshian S, Gupta V J. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models [J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 158: 265-284.
- [4] Hapualrachchi H A P, Li Z J, Wang S H. Application of SCE-UA method for calibrating the Xin'anjiang watershed model [J]. *Journal of Lake Science*, 2001, 12(4): 304-314.
- [5] 李致家,周 轶,哈布·哈其. 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 Z J, Zhou Y, Hapuarachechi H A P. Application of global optimization to calibration of Xin'anjiang model [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition*, 2004, 32(4): 376-379. (in Chinese)
- [6] Nelder J A, Meade R A. Simplex method for function minimization [J]. *Computer Journal*, 1965, 7: 308-313.
- [7] Wang Q J. The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models [J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(9): 2467-2471.
- [8] Wang Q J. Using genetic algorithms to optimize model parameters [J]. *Environmental Modeling & Software*, 1997, 12(1): 27-34.
- [9] 陆桂华, 郇建强, 杨晓华. 水文模型参数优选遗传算法的应用 [J]. *水利学报*, 2004(2): 50-56.
Lu G H, Li J Q, Yang X H. Application of genetic algorithms to parameter optimization of hydrology model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(2): 50-56. (in Chinese)
- [10] 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.
Wu X Y, Chen C T, Zhao M Y. Parameter calibration of Xin'anjiang rainfall runoff model by using parallel genetic algorithm [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(11): 85-90. (in Chinese)
- [11] 江 燕, 胡轶松, 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, 39(4): 14-17.
Jiang Y, Hu Y S, Gui F L, et al. Application of particle swarm optimization to parameter calibration of Xin'anjiang model [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2006, 39(4): 14-17. (in Chinese)
- [12] 江 燕, 刘昌明, 胡轶松, 等. 新安江模型参数优选的改进粒子群算法 [J]. *水利学报*, 2007, 39(10): 1200-1206.
Jiang Y, Liu C M, Hu Y S, et al. Improved particle swarm optimization for parameter calibration of Xin'anjiang model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 39(10): 1200-1206. (in Chinese)
- [13] Kennedy J A. The particle swarm [J]. *Swarm Intelligence*, 1995, 12(1): 287-325.
- [14] 黄辉先, 陈资槟. 一种改进的粒子群优化算法 [J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(21): 4922-4925.
Huang H X, Chen Z B. Novel arithmetic based on particle swarm optimization [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(21): 4922-4925. (in Chinese)
- [15] Storn R, Price K. Differential evolution: A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces, TR-95-012 [R]. Berkeley, USA: International Computer Science Institute, 1995.
- [16] 赵人俊. 流域水文模拟: 新安江模型与陕北模型 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
Zhao R J. Hydrological simulation: Xin'anjiang model and Shaanbei model [M]. Beijing: China Waterpower Press, 1984. (in Chinese)