

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtj.20180011

刘欣蔚, 王浩, 雷晓辉, 等. 粒子群算法参数设置对新安江模型模拟结果的影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 69-74, 208. LIU X W, WANG H, LEI X H, et al. Influence of parameter settings in PSO Algorithm on simulation results of Xin'anjiang model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 69-74, 208. (in Chinese)

粒子群算法参数设置对新安江模型模拟结果的影响研究

刘欣蔚¹, 王浩¹, 雷晓辉², 廖卫红², 王明娜², 王维平², 张革革²

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 合理的粒子群算法(Particle Swarm Optimization Algorithm, PSO)的参数设置, 可以提高算法的优化效率、避免陷入局部最优值, 但常用参数设置对于特定优化问题, 如新安江模型模拟, 不具普适性。为分析种群规模 pop、惯性权重 w、学习因子 c_1 和 c_2 以及速度位置相关系数 m 这 5 个粒子群参数对新安江模型模拟结果的影响, 对每个参数取 5 个不同水平, 应用 $L_{25}(5^6)$ 正交表, 设计了正交试验。通过对试验结果进行分析, 得出了参数对 PSO 算法性能的影响能力和最优的参数组合方案(pop = 80, w = 1.3~0.4 线性递减, $c_1 = 1.85$, $c_2 = 2.5$, $m = 0.05$)。通过极差分析和方差分析, 得出参数 pop 和 w 对模型模拟结果具有高显著性, 其他三个参数对模型模拟结果不显著。将不同 PSO 参数组合应用于新安江模型模拟, 证明了合理的 PSO 算法参数设置可以有效提高新安江模型模拟精度。通过对各因素分别进行趋势分析, 得到了因素取值变化趋势与模型结果变化趋势的相关关系。本文提出的方法为如何寻找某一特定应用情景下的 PSO 算法参数组合提供了一种借鉴。

关键词: 粒子群算法; 新安江模型; 参数优化; 参数设置; 正交试验

中图分类号: TV 213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0069-06

Influence of parameter settings in PSO Algorithm on simulation results of Xin'anjiang model

LIU Xinwei¹, WANG Hao¹, LEI Xiaohui², LIAO Weihong², WANG Mingna², WANG Weiping², ZHANG Pingping²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The reasonable parameter settings in the particle swarm optimization algorithm can improve the optimization efficiency and avoid falling into the local optimum. However, common parameter settings are not universally applicable to specific optimization problems, such as the simulation of Xin'anjiang model. In this study, we conducted orthogonal tests to study the influence of 5 particle swarm parameters on the simulation results of Xin'anjiang model. Through the analysis of the test results, we revealed the influence of parameters on the performance of PSO algorithm and obtained the optimum parameters (pop = 80, w = linear regression from 1.3 to 0.4, $c_1 = 1.85$, $c_2 = 2.5$, $m = 0.05$). Through range analysis and variance analysis, we found that the parameters pop and w are highly significant to the simulation results, and the other three parameters are not significant to the simulation results. The different PSO parameter sets were applied to Xin'anjiang model simulation, and proved that the reasonable PSO algorithm parameter setting can effectively improve the simulation accuracy of Xin'anjiang model. Through the trend analysis of each factor, we obtained the relationship between the change trend of the factor value and the change trend of the model result. The method presented in this paper can provide reference for finding the parameters of PSO algorithm in a specific application scenario.

Key words: particle swarm optimization algorithm; Xin'anjiang model; parameter optimization; parameter setting; orthogonal test

收稿日期: 2017-08-01 修回日期: 2017-10-22 网络出版时间: 2018-01-11
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180106.0904.010.html>
基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0402204)

Fund: "13th Five Year" National Key Development Program (2016YFC0402204)

作者简介: 刘欣蔚(1993), 女, 河北承德人, 主要从事水文学与水资源研究。E-mail: 522611975@qq.com

通讯作者: 雷晓辉(1974), 男, 北京人, 教授级高级工程师, 主要从事水文学与水资源研究。E-mail: rain_fields@qq.com

新安江模型^[1]是广泛应用于我国湿润及半湿润地区的降雨径流模型,主要应用于洪水预报,还常被应用于水资源评价规划、洪水管理和水文站网规划等方面。在实际应用中常用人工试错法或自动优化法对新安江模型参数进行优化^[2]。人工试错法虽然操作简便且易于实施,但是对时间和人力消耗大,且操作者的主观性可能会对模型模拟结果产生影响^[3]。水文模型参数自动优化技术得益于计算机自动优化算法的发展,常用的算法有罗森布洛克法^[4]、单纯形法^[5]和遗传算法^[6]。这些算法在新安江模型参数优化中虽然应用方便、不费人力,但是存在着易陷入局部最优、计算结果精度相对不高等缺点。

粒子群优化算法^[7] (Particle Swarm Optimization Algorithm, PSO) 是 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的智能集群优化算法,其模型原理相对简单,不要求目标函数可微^[8-10],非常适宜求解新安江模型参数优化这样的大规模、高度离散的非线性优化问题^[11]。PSO 算法存在着易陷入局部最优、收敛速度受惯性权重影响等缺点^[12],但是这些缺点可以通过多次重复试验和调整 PSO 算法参数的方法尽量避免。

当前有大量学者对 PSO 算法进行改进,并将这些算法应用于新安江模型参数优化中^[13-15]。此类研究的重点多在于修改 PSO 算法的结构,或提出新的粒子速度与位置更新方法,使其更适于新安江模型参数优化,而对 PSO 算法本身的参数设置关注较少^[16-17]。此类研究中,通常根据经验将参数设置为:种群规模 pop = 20、惯性权重 w 为 0.9 至 0.4 线性递减、学习因子 $c_1 = c_2 = 2$ 、速度位置相关系数 m = 1(粒子速度和位置取值范围相等)。同时,有很多研究表明^[18-22],合理的 PSO 参数的选择,可以提高算法的优化效率、避免陷入局部最优值,且 PSO 算法常用的参数设置,对于特定优化问题不具普适性。针对于新安江模型参数优化问题,刘苏宁等人^[23]研究了 PSO 算法参数设置的影响,指出根据经验设置的 PSO 算法参数在新安江模型等特定问题中不一定能得到较好的优化结果。但是该研究中应用的单因子分析法,只能分析单一因子变化对算法的性能影响,没有分析不同参数组合对算法的影响。

因此,本文提出了设计正交试验的方法,对应用于新安江模型参数优化问题的 PSO 算法的参数设置进行更加全面的分析。一方面可以为如何寻找某一特定应用情景下的 PSO 算法参数提供借鉴,另一方面可以提高新安江模型参数优化的效果与效率。

1 模型简介与试验设计

1.1 新安江模型

新安江模型^[1]是由赵人俊先生于 20 世纪 80 年代提出来的降雨径流模型。新安江模型的结构为分散性结构,四个层次结构分别为蒸散发计算,产流计算,分水源计算和汇流计算。计算流程见图 1。参数标注在框外,状态变量标注在框内。实测降雨量 $P(t)$ 和蒸发皿蒸发量 $EM(t)$ 作为输入;输出为流域出口断面流量过程 $Q(t)$ 和流域实际蒸散发过程 $E(t)$ 。

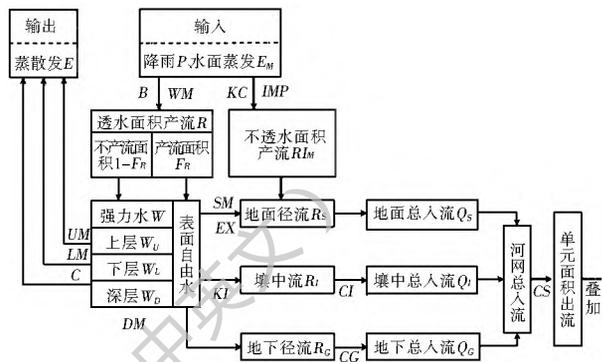


图 1 新安江模型
Fig. 1 Xin'anjiang model

1.2 粒子群算法

PSO 算法是一种智能集群优化算法^[7],模拟鸟群捕食的社会行为,粒子通过学习自身经验及群体经验,不断调整飞行策略,直至捕捉到食物。PSO 算法的流程见图 2。粒子速度和位置更新公式为:

$$V_i^{k+1} = \omega \times V_i^k + c_1 \times \text{rand}() \times (pbest_i - x_i^k) + c_2 \times \text{rand}() \times (gbest - x_i^k) \quad (1)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + V_i^k \quad (2)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, \text{pop}$, pop 为种群规模; w 为惯性权重; V_i^k 是粒子 i 在第 k 次迭代中的速度; $\text{rand}()$ 是 0 和 1 之间的随机数; x_i^k 是粒子 i 在第 k 次迭代中的位置; c_1 和 c_2 为学习因子; $pbest_i$ 为粒子 i 的个体最优值; $gbest$ 为群体最优值。

在本文中考虑的 PSO 算法的参数包括种群规模 (pop)、惯性权重 (w)、学习因子 (c_1, c_2) 以及速度位置相关系数 (m)。pop 影响着算法的稳定性,也对算法的优化效率有很大的影响^[24]。合理的 w 的选择,可以起到平衡全局搜索和局部搜索的作用^[25-26]。 c_1 影响着粒子的自我学习能力, c_2 影响着粒子的社会认知能力^[24]。 c_1 和 c_2 的取值过小,粒子会在远离目标的区域内震荡;取值过大,粒子虽然可以快速地移动向目标区域,但又易离开目标区域。新安江模型中各参数的取值范围为 $[X_{\min}, X_{\max}]$, 则

粒子的飞行速度的取值范围为 $[V_{min}, V_{max}] = m \times [-X_{max}, X_{max}]$, 若 m 取值太小, 粒子飞行速度过慢, 导致全区搜索能力过低, 算法计算效率低; m 取值范围过大, 算法则存在着粒子容易飞出边界或飞过最优解的问题。

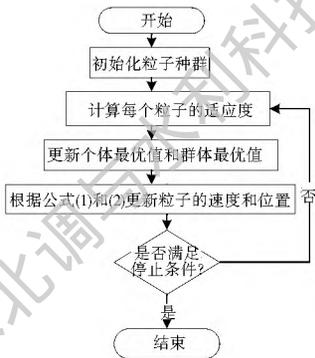


图2 PSO 算法流程

Fig. 2 Flow chart of PSO algorithm

1.3 试验方案

1.3.1 正交试验设计

本文以考察 PSO 算法参数设置对新安江模型模拟结果的影响为试验目的, 考察 pop 、 w 、 c_1 、 c_2 和 m 共 5 个试验因素, 每个因素依据经验取 5 个水平(表 1)。假设 5 个参数之间是相互独立的, 若将所有可能的参数值组合遍历, 则需 $5^5 = 3125$ 次试验, 试验规模巨大。而通过应用 $L_{25}(5^6)$ 正交表设计正交试验, 进行 25 次试验即可分析各因素的较优取值水平。

表 1 正交试验因素水平

Tab. 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	PSO 算法参数				
	pop	w	c_1	c_2	m
1	10	0.4	1.44945	1.44945	0.03
2	20	0.9	1.85	1.85	0.05
3	40	1.3	2	2	0.3
4	80	1.3~0.4	2.5	2.5	0.5
5	160	0.9~0.4	3	3	1

1.3.2 目标函数

合理的目标函数不仅可以作为新安江模型模拟效果的评判标准, 还可以作为粒子飞行策略调整的依据。本文选用纳什效率系数^[27]作为目标函数, 相比其他函数, 该函数更能直观的体现模拟值和实测值之间的差距, 展示模拟效果。纳什效率系数计算公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

式中: S_i 和 O_i 分别为模拟和实测径流值; \bar{O} 为实测径流的平均值; n 为数据系列长度。为避免模型中随机值选取对参数优化效果的影响, 每个试验中将模型重复运行 30 次, 将 30 次模拟得到的纳什效率系数的均值记作为试验计算结果。

2 实例研究

2.1 流域概况

平湖流域位于贵州省平塘县, 属珠江流域西江水系, 位于东经 $107^{\circ}03' - 107^{\circ}37'$ 北纬 $25^{\circ}51' - 26^{\circ}06'$ 之间。其位于云贵高原东南部, 属于湿润半湿润地区。平湖水文站以上流域面积 1418 km^2 , 流域内水系见图 3。本文模拟计算资料主要来自平湖水文站 2006-2008 年的逐日实测蒸发、径流资料, 及经处理的雨量资料。降雨资料取自分布于平湖流域内的 5 个雨量站, 利用泰森多边形法计算出各雨量站在流域面雨量计算中所占的权重(表 2)后加权平均。

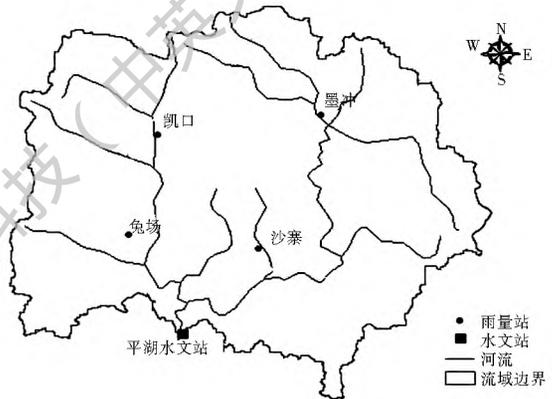


图 3 平湖流域

Fig. 3 The map of Pinghu Basin

表 2 平湖水文站各雨量站权重

Tab. 2 The weights of precipitation stations of Pinghu hydrological station

站名	墨冲	凯口	沙寨	兔场	平湖
权重	0.29	0.23	0.25	0.18	0.05

2.2 试验结果

正交试验方案及结果见表 3。将表 3 中各参数组合代入 PSO 算法, 利用平湖流域 2006-2008 年的降雨、蒸发、径流资料进行新安江模型模拟。模型重复 30 次后得到的纳什效率系数的均值为 Y_i 列。 $L_{25}(5^6)$ 正交表至多可以对 6 个因素进行试验设计, 本试验只有 5 个因素, 故有 1 个空白列, 表 3 空白列中所填数字代表水平编号, 无实际参数值。

3 结果分析

3.1 考察不同水平试验结果之和

考察不同水平试验结果之和可以用于分析某一

表 3 正交试验方案及结果

Tab.3 Orthogonal test schemes and results

试验序号	PSO 算法参数					空白	Y _i
	pop	w	c ₁	c ₂	m		
1	10	0.4	1.44945	1.44945	0.03	1	0.652
2	10	0.9	1.85	1.85	0.05	2	0.667
3	10	1.3	2	2	0.3	3	0.607
4	10	1.3~0.4	2.5	2.5	0.5	4	0.673
5	10	0.9~0.4	3	3	1	5	0.672
6	20	0.4	1.85	2	0.5	5	0.673
7	20	0.9	2	2.5	1	1	0.658
8	20	1.3	2.5	3	0.03	2	0.621
9	20	1.3~0.4	3	1.44945	0.05	3	0.673
10	20	0.9~0.4	1.44945	1.85	0.3	4	0.673
11	40	0.4	2	3	0.05	4	0.673
12	40	0.9	2.5	1.44945	0.3	5	0.665
13	40	1.3	3	1.85	0.5	1	0.621
14	40	1.3~0.4	1.44945	2	1	2	0.673
15	40	0.9~0.4	1.85	2.5	0.03	3	0.673
16	80	0.4	2.5	1.85	1	3	0.673
17	80	0.9	3	2	0.03	4	0.673
18	80	1.3	1.44945	2.5	0.05	5	0.638
19	80	1.3~0.4	1.85	3	0.3	1	0.673
20	80	0.9~0.4	2	1.44945	0.5	2	0.673
21	160	0.4	3	2.5	0.3	2	0.673
22	160	0.9	1.44945	3	0.5	3	0.662
23	160	1.3	1.85	1.44945	1	4	0.633
24	160	1.3~0.4	2	1.85	0.03	5	0.673
25	160	0.9~0.4	2.5	2	0.05	1	0.673

参数取值的最佳水平^[28]。表 4 为正交试验计算结果的分析表,展示了不同水平试验结果之和。表 4 中 K_{ij} 为参数 j 的 i 水平对应的计算结果 Y_i 之和,以 K₁₁ 和 K₂₁ 为例,计算公式如下:

$$K_{11} = Y_{11} + Y_{21} + Y_{31} + Y_{41} + Y_{51} \quad (4)$$

$$K_{21} = Y_{12} + Y_{22} + Y_{32} + Y_{42} + Y_{52} \quad (5)$$

其他 K_{ij} 计算方法同理。

由表 4 中的计算结果可知, K₁₁、K₂₁、K₃₁、K₄₁ 和 K₅₁ 之间的差别仅仅是由种群规模 pop 的不同造成的,与参数 w、c₁、c₂、m 的取值无关。所以可以通过比较 K₁₁、K₂₁、K₃₁、K₄₁ 和 K₅₁ 的大小来确定种群规模 pop 的最佳水平。因为纳什效率系数越大,新安江模型模拟效果越好,所以 K₁₁、K₂₁、K₃₁、K₄₁ 和 K₅₁ 中最大值对应的水平即为 pop 的最佳水平,因而 pop 取值的最佳水平为 80。同理可得到其他参数的最佳水平: w = 1.3~0.4 线性递减, c₁ = 1.85, c₂ = 2.5, m = 0.05。

表 4 试验结果分析

Tab.4 Analysis of test results

	pop	w	c ₁	c ₂	m	空白列
K _{1j}	3.271	3.345	3.299	3.297	3.293	3.278
K _{2j}	3.299	3.325	3.320	3.309	3.326	3.308
K _{3j}	3.307	3.120	3.285	3.300	3.292	3.289
K _{4j}	3.332	3.367	3.306	3.316	3.303	3.326
K _{5j}	3.315	3.365	3.313	3.301	3.309	3.322

3.2 极差分析与方差分析

通过对极差进行分析,可以得出参数变化对试验结果影响的大小^[28]。极差 R_j 的意义是: R_j 越大,说明该 PSO 算法参数的水平变化对新安江模型模拟效果的影响越大,该因素越重要;反之, R_j 越小,该因素越不重要^[23]。R_j 的计算公式为:

$$R = \max\{K_{ij}\} - \min\{K_{ij}\} \quad (6)$$

式中: i = 1~5, 其他符号意义同上。

由表 5 可知, w 的极差最大,故 w 对新安江模型模拟结果影响最大; c₂ 的极差最小,所以其对新安江模型模拟结果影响最小。所有因素对算法计算结果影响排序: 惯性权重 w (0.246) > 种群规模 pop (0.061) > 学习因子 c₁ (0.035) > 速度位置相关系数 m (0.034) > 学习因子 c₂ (0.019)。

若空白列极差值远大于各因素的极差值,那么各 PSO 算法参数之间可能不是相互独立的。本试验中空白列的极差为 0.048,大小介于 pop 和 c₁ 的极差之间,说明各 PSO 算法参数之间不存在无法忽视的相互作用,试验结果可用。

方差分析可以用于分析 PSO 算法参数的水平变化对新安江模型模拟结果的影响是否显著^[26]。表 5 中 S_j 行各值分别表示各列对应的试验因素的偏差平方和,计算公式为:

$$S_j = 5 \cdot \sum_{i=1}^5 \left[\frac{K_{ij}}{5} - \frac{\sum_{n=1}^{25} Y_n}{25} \right]^2 \quad (7)$$

f_j 为 j 因素的自由度,与 j 因素的试验水平数相关。

空白列的偏差平方和的计算也是十分必要的,因为该值的产生不由任何因素引起,而是由试验误差引起。所以本试验的误差平方和等于空白列的偏差平方和,即 S_e = S_{空白列} = 3.730 × 10⁻⁶,相应的自由度 f_e = 4。

参数 c₁、c₂ 和 m 的偏差平方和分别为 2.00 × 10⁻⁶、5.72 × 10⁻⁷、1.82 × 10⁻⁶,小于误差平方和,所以这三个参数对算法计算结果的影响并不显著,且可以并入误差平方和中,得

$$S_e^\Delta = S_e + S_{c1} + S_{c2} + S_k = 2.03 \times 10^6 \quad (8)$$

相应的自由度也并入 f_e , 得

$$f_e^\Delta = f_e + f_{c1} + f_{c2} + f_k = 16 \quad (9)$$

查 F 分布表得 $F_{0.999}(4, 16) = 7.94$

统计量 F_j 的计算公式如下:

$$F_j = \frac{(s_j / f_j)}{(s_e^\Delta / f_e^\Delta)} \quad (10)$$

参数 pop 和 w 的统计量分别为 11.761 和 190.930, 均大于 $F_{0.999}(4, 16) = 7.94$, 所以因素 pop 和 w 对试验结果的影响是高度显著的。

表 5 极差分析与方差分析

Tab. 5 Analysis of range and variance

参数	pop	w	c_1	c_2	m	空白列
R_j	0.061	0.246	0.035	0.019	0.034	0.048
S_j	5.97×10^6	9.69×10^5	2.00×10^6	5.72×10^7	1.82×10^6	3.73×10^6
f_j	4	4	4	4	4	4
F_j	11.761	190.930				
显著性	高度显著	高度显著	不显著	不显著	不显著	

3.3 新安江模型模拟结果

通过对表 4 的计算结果进行分析, 得到的较优 PSO 算法参数组合为 (1) $pop = 80, w = 1.3 \sim 0.4$ 线性递减, $c_1 = 1.85, c_2 = 2.5, m = 0.05$; 最差的 PSO 算法参数组合为 (2) $pop = 10, w = 1.3, c_1 = 2, c_2 = 1.44945, m = 0.3$ 。

将 PSO 参数组合 (1) 带入 PSO 算法, 模型重复 30 次后得到的纳什效率系数的均值为 0.673。径流模拟结果见图 4 所示。将 PSO 参数组合 (2) 带入 PSO 算法, 模拟结果为 0.618, 纳什效率系数显著小于较优 (2) 参数组合 (1) 得到的结果 (0.673), 说明了应用正交试验对 PSO 参数设置进行分析的必要性。

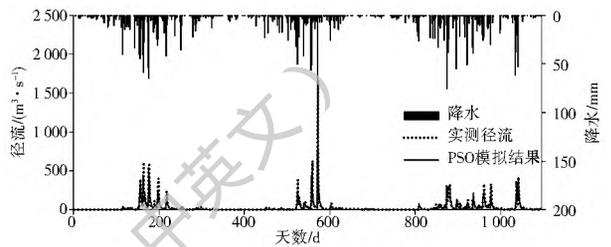


图 4 新安江模型模拟结果

Fig. 4 The simulation results of Xin'anjiang model

3.4 趋势分析

图 5 为各试验因素对应的因素-指标图, 图中纵坐标为 K_{ij} , 横坐标为因素水平。 K_{ij} 为参数 j 的 i 水平对应的目标函数值 Y 之和, 所以 K_{ij} 与 Y 正相关。 K_{ij} 越大, 说明新安江模型的模拟效果越好。

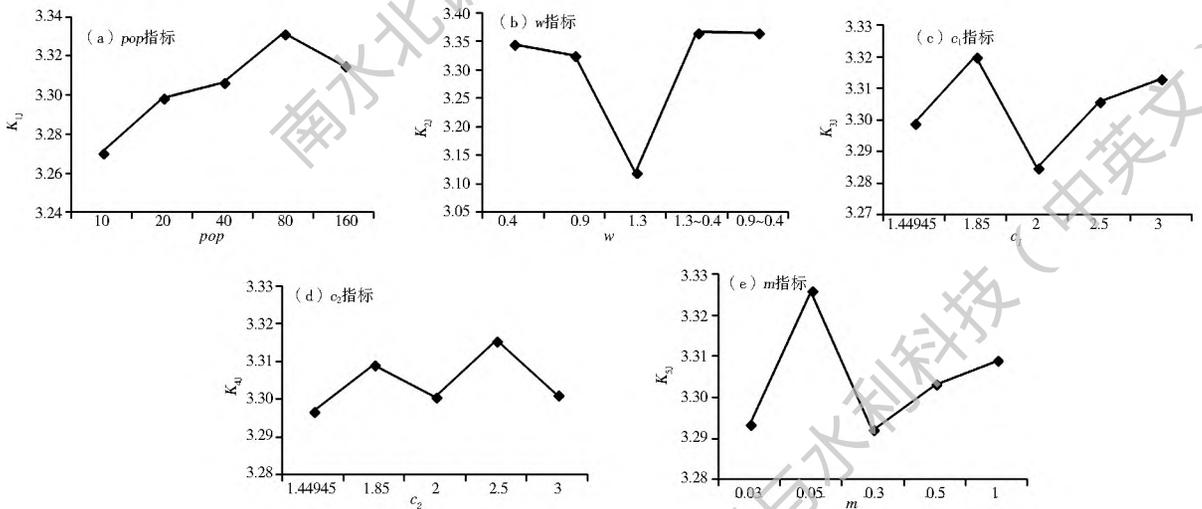


图 5 因素-指标图

Fig. 5 Factor index diagram

由图 5(a) 可知, 随着种群规模 pop 不断增大, 新安江模型模拟效果逐渐变好, 直至 $pop = 80$, 模拟效果最好, 当 pop 继续增大, 模拟效果有变差的趋势, 所以 $pop = 80$ 应为当前 5 因素水平情况下的最优选择。

由图 5(b) 可知, 当 w 的取值为 $1.3 \sim 0.4$ 线性递减时, 模型模拟效果最好。但是 $w = 1.3 \sim 0.4$ 和 $w = 0.9 \sim 0.4$ 两种因素水平下, K_{ij} 的值相差不大, 说明 w 的这两种取值方式对模型模拟效果的影响是相近的。

由图 5(c) 可知, 在 c_1 仅取本文中的 5 个值的情况下, 当 $c_1 = 1.85$ 时, 模型模拟效果最好。但当 c_1 从 2 到 3 逐渐增大的过程中, K_{ij} 值有不断增大的趋势。

由图 5(d) 可知, 当 $c_2 = 2.5$ 时, 模型的模拟效果最好。但是本文中 c_2 的五个取值所得的模拟结果并没有趋势性。

由图 5(e) 可知, 当 $m = 0.05$ 时, 模型模拟效果最好。虽然当 m 从 0.3 到 1.0 递增的过程中, K_{ij} 随之不断增大, 即模型模拟效果不断变好。但是因为 $[V_{\min}, V_{\max}] = m \times [-X_{\max}, X_{\max}]$, 当 $m = 1$ 时, $[V_{\min}, V_{\max}] = [-X_{\max}, X_{\max}]$, 即粒子飞行的速度与位置的取值范围相等, 在这种情况下, 粒子很容易飞出边界, 难以优化自身位置, 故不宜取 $m > 1$ 的值进行模型模拟。

4 结语

本文针对应用于新安江模型参数优化的 PSO 模型参数设置问题, 设计了 5 因素 5 水平的正交试验。通过对试验结果进行分析, 可知参数对 PSO 算法性能的影响能力的排序为: $w > \text{pop} > c_1 > m > c_2$, 且 w 和 pop 对试验结果的影响具有高显著性。考察了不同水平下试验结果之和, 得到了可能最优的参数组合方案为: $\text{pop} = 80, w = 1.3 \sim 0.4$ 线性递减, $c_1 = 1.85, c_2 = 2.5, m = 0.05$ 。将最优及最差参数组合带入 PSO 算法, 进行新安江模型参数优化, 并将模拟结果进行比较, 证明了合理的 PSO 算法参数设置可以有效提高新安江模型模拟精度。通过对各因素分别进行趋势分析, 得到了因素取值变化趋势与模型结果变化趋势的相关关系, 并为后续进一步优化 PSO 算法的参数设置提供了思路。本文提出的方法为如何寻找某一特定应用情景下的 PSO 算法参数组合提供了一种借鉴。

参考文献 (References):

- [1] ZHAO R J. The Xinanjiang model applied in China[J]. Journal of Hydrology, 1992, 135(1/4): 371-381. DOI: 10.1016/0022-1694(92)90096 E.
- [2] 栾承梅. 流域水文模型参数优化问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (LUAN C M. Study on automatic optimization of hydrologic models' parameters[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y716959.
- [3] 杜非. 伊洛河流域土地覆被变化水文效应的研究[D]. 河海大学, 2007. (DU F. Hydrological effects of land cover change in Yiluo River Basin[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y1128418.
- [4] ROSENBROCK H H. An automatic method for finding the greatest or least value of a function[J]. 1960, 3(3): 175-184. DOI: 10.1093/comjnl/3.3.175.
- [5] SPENDLEY W, HEXT G R, HIMSWORTH F R. Sequential application of simplex designs in optimisation and evolutionary operation[J]. Technometrics, 1962, 4(4): 441-461. DOI: 10.1080/00401706.1962.10490033.
- [6] WANG Q J. The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models[J]. Water Resources Research, 1991, 27(9): 2467-2471. DOI: 10.1029/91WR01305.
- [7] KENNEDY J, EBERHART R. Particle Swarm Optimization[C]// IEEE International Conference on Neural Networks, 1995. Proceedings. IEEE, 2002: 1942-1948 vol. 4. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [8] JAMIAN J J, ABDULLAH M N, MOKHLIS H, et al. Global particle swarm optimization for high dimension numerical functions analysis[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014(2014), 14. DOI: 10.1155/2014/329193.
- [9] 丁根宏, 曹文秀. 改进粒子群算法在水库优化调度中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2014(1): 118-121. (DING G H, CAO W X. Application of improved particle swarm optimization algorithm in optimal operation of reservoir[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014(1): 118-121. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2014.01118.
- [10] 宋健蛟, 赵红莉, 蒋云钟. 粒子群算法在密云水库供水优化配置中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2015(2): 378-381. (SONG J J, ZHAO H L, JIANG Y Z. Application of particle swarm optimization in the optimal water allocation of Miyun Reservoir[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015(2): 378-381. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.02.041.
- [11] 关圣涛, 楚纪正, 邵帅. 粒子群优化算法在非线性模型预测控制中的应用[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2007, 34(6): 653-656. (GUAN S T, CHU J Z, SHAO S. Application of nonlinear model predictive control based on particle swarm optimization[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2007, 34(6): 653-656. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-4628.2007.06.022.
- [12] 沈学利, 张红岩, 张纪锁. 一种新的改进粒子群优化算法[J]. 计算机仿真, 2011, 28(3): 246-249. (SHEN X L, ZHANG H Y, ZHANG J S. A new improved particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Simulation, 2011, 28(3): 246-249. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2011.03.060.
- [13] 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. (JIANG Y, LIU C M, HU T S, et al. Improved particle swarm optimization for parameter calibration of Xin'anjiang Model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 1200-1206. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2007.10.008.
- [14] 张文明, 董增川, 朱成涛, 等. 基于粒子群算法的水文模型参数多目标优化研究[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 20-26. (ZHANG W M, DONG Z C, ZHU C T. Automatic Calibration of hydrologic model based on multi objective particle swarm optimization method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 20-26. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2008.05.003.

(下转第 208 页)

- GIS Engine [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [17] 黄锋华. GIS 技术在小流域地区暴雨推求设计洪水的应用[J]. 广东水利水电, 2010, 10(10): 231-245. (HUANG F H. Application of GIS technology to designing flood based on rainstorm calculation in a small watershed [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2010, 10(10): 231-245. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1008-0112.2010.10.012.
- [18] 汤国安. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M]. 北京: 北京科学出版社, 2012. (TANG G A. ArcGIS geoinformation system space analysis test tutorial[M]. Beijing: Beijing Science Press, 2012. (in Chinese))
- [19] 郭建成. 小流域设计洪水计算应用程序—以江西省为例[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2014. (GUO C J. Design flood calculation application in small watershed—take jiangxi province as an example [D]. Nanchang: Nanchang University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [20] 郭邵平. 一种改进的落石冲击力计算方法[J]. 山地学报, 2014, 32(3): 345-349. (GUO S P. An improved impact force calculation method for rockfall [J]. Mountain Research, 2014, 32(3): 345-349. (in Chinese)) DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2014.03.010.
- [21] 张磊, 李诚. 无资料地区设计洪水的估算[J]. 湖南水利水电, 2008(2): 47-50. (ZHANG L, LI C. Design flood estimates in a non-data area [J]. Hunan Hydro & Power, 2008(2): 47-50. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-4229.2008.02.020.
- [22] SHERMAN L K. Streamflow from rainfall by unit graph method[J]. Engineering News Record, 1932, (108): 50F-50S.
- [23] CLARK C O. Storage and the unit hydrograph [J]. Proc. ASCE, 1945, 69: 1333-1360.
- [24] NASH J E. A unit hydrograph study, with particular reference to british catchments [J]. Proc. Inst. Civ. Eng., 1960, 17: 249-282.
- [25] Soil Conservation Service. National Engineering Handbook [M]. Section 4: Hydrology. USDA, Springfield, VA, 1993.

(上接第 74 页)

- [15] 王问宇, 袁鹏, 邵骏, 等. 改进粒子群算法在新安江模型参数优选中的应用[J]. 水力发电, 2008, 34(8): 14-16. (WANG W Y, YUAN P, SHAO J, et al. Application of improved particle swarm algorithm to the parameter selection optimization of Xin'anjiang Model [J]. Water Power, 2008, 34(8): 14-16. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2008.08.005.
- [16] REZAEE J A, JASNI J. Parameter selection in particle swarm optimization: A survey [J]. Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, 2013, 25(4): 527-542. DOI: 10.1080/0952813X.2013.782348.
- [17] NOURMOHAMMADZADEH A, HARTMANN S, MA H. A Parallel Hybrid GA-PSO Approach with Dynamic Rule based Parameter Setting [C] // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. ACM, 2017: 215-216. DOI: 10.1145/3067695.3076051.
- [18] SHI Y, EBERHART R C. Parameter selection in particle swarm optimization [C] // International Conference on Evolutionary Programming VII. Springer Verlag, 1998: 591-600. DOI: 10.1007/BFb0040810.
- [19] SHI Y, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization [J]. Frontiers of Computer Science in China, 1999, 3(1): 31-37. DOI: 10.1109/CEC.1999.785511.
- [20] TRELEA I C. The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection [J]. Information Processing Letters, 2003, 85(6): 317-325. DOI: 10.1016/S0020-0190(02)00447-7.
- [21] 王维博, 林川, 郑永康. 粒子群算法中参数的实验与分析[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2008, 27(1): 76-79. (WANG W B, LIN C, ZHENG Y K. Experiment and analysis of parameters in particle swarm optimization [J]. Journal of Xihua University (Natural Science), 2008, 27(1): 76-79. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-159X.2008.01.026.
- [22] ZHANG W, MA D, WEI J, et al. A parameter selection strategy for particle swarm optimization based on particle positions [J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(7): 3576-3584. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.10.061.
- [23] 刘苏宁, 甘泓, 魏国孝. 粒子群算法在新安江模型参数率定中的应用[J]. 水利学报, 2010, 41(5): 537-544. (LIU S N, GAN H, WEI G X. Application of PSO algorithm to calibrate the xin'anjiang hydrological model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5): 537-544. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.05.003.
- [24] 李爱国, 覃征, 鲍复民, 等. 粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(21): F3. (LI A G, QIN Z, BAO F M, et al. Particle swarm optimization algorithms [J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(21): F-3. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1002-8331.2002.21.001.
- [25] 刘志煌, 杨宜民. PSO 的惯性权重与种群大小选择[J]. 计算机与现代化, 2007, 2007(6): F3. (LIU Z H, YANG Y M. Inertia parameter and swarm size selection of PSO [J]. Computer and Modernization, 2007, 2007(6): F-3. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-2475.2007.06.001.
- [26] RATHORE A, SHARMA H. Review on inertia weight strategies for particle swarm optimization [C] // Proceedings of Sixth International Conference on Soft Computing for Problem Solving. Springer, Singapore, 2017: 76-86. DOI: 10.1007/978-981-10-3322-3_8.
- [27] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- [28] 陈仲堂. 应用数理统计[M]. 国防工业出版社, 2011. (CHEN Z T. Applied Mathematical Statistics [M]. National Defence Industry Press, 2011. (in Chinese))