

刘志萍, 杨华, 周雨, 等, 2020. 基于遗传算法的江西七一水库来水流量新安江预报模型参数优化[J]. 气象与减灾研究, 43(2): 149-154.

Liu Zhiping, Yang Hua, Zhou Yu, et al, 2020. Forecasting parameter optimization of Xin'an Jiang model for water inflow in Qiyi Reservoir by using Genetic Algorithm[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 43(2): 149-154.

基于遗传算法的江西七一水库来水流量 新安江预报模型参数优化

刘志萍¹, 杨 华², 周 雨², 詹华斌², 曹 瑜²

1. 吉安市气象局, 江西 吉安 343000
2. 江西省气象服务中心, 江西 南昌 330096

摘 要: 利用江西七一水库水电站 2016—2017 年水文资料, 基于遗传算法对七一水库来水流量新安江模型进行了参数优化率定, 并采用参数率定前后 2 种来水流量模型对七一水库 2018 年的预报结果进行检验, 重点分析了水库来水流量预报结果的日误差、月误差和年误差以及强降水过程流量预报误差等。结果表明: 1) 遗传算法参数优化后的模型流量预报误差减小; 2) 日误差在 7 月中旬以后明显减小; 3) 月误差在 7 月之前以正偏差为主, 7 月以后以负偏差为主; 4) 参数优化后的年误差整体好于优化前; 5) 在强降水过程实例流量预报误差分析中, 参数优化后的误差明显减小, 但不同强降水过程误差程度相差较大, 可能与降水空间分布的不连续性、面雨量计算方法的局限性以及降水的天气类型有关。

关键词: 新安江模型, 遗传算法, 参数优化, 来水流量, 误差分析

中图分类号: P338

文献标识码: B

文章编号: 1007-9033(2020)02-0149-06

doi: 10.12013/qxyjzyj2020-020

Forecasting Parameter Optimization of Xin'an Jiang Model for Water Inflow in Qiyi Reservoir by Using Genetic Algorithm

Liu Zhiping¹, Yang Hua², Zhou Yu², Zhan Huabin², Cao Yu²

1. Ji'an Meteorological Bureau, Ji'an 343000, China

2. Jiangxi Meteorological Service Center, Nanchang 330096, China

Abstract: Based on the data of Jiangxi Qiyi Reservoir Power Station at 2016 and 2017, the parameters of Xin'an Jiang model were optimized for the water inflow in Qiyi Reservoir using the genetic algorithm, and the predicted results of the optimized Xin'an Jiang model were compared with those of the original one. The daily error, monthly error, annual error of the predicted water inflow and the error of predicted results during heavy precipitation processes were emphatically discussed. The results indicated that: 1) The prediction error was reduced after the parameter was optimized. 2) The daily error was significantly reduced after mid-July. 3) The monthly error presented positive deviation before July, and the negative deviation mainly appeared after July. 4) The annual error obtained from the optimized model was less than that of the original model. 5) The forecast errors of water income during the heavy precipitation processes were significantly reduced using the optimized model, but the errors presented great difference during different heavy precipitation processes, which might be owing to the uneven distribution of precipitation, the limitation of the calculation method of surface rainfall and the weather type.

收稿日期: 2020-04-06; 修订日期: 2020-05-20.

基金项目: 2020 年江西省气象局面上项目“中小型水库来水增量预报方法研究”。

作者简介: 刘志萍, 高级工程师, 主要从事应用气象服务研究, E-mail: 513424734@qq.com.

杨 华(通信作者), 高级工程师, 主要从事专业气象服务研究, E-mail: 19558512@qq.com.

Key words: Xin'an Jiang model; genetic algorithm; parameter optimization; water inflow; error analysis

0 引言

近年来江西降水偏多,防汛形势严峻,雨季(3—6月)时间长,降水过程集中、局地性强,全省各主要江河发生暴洪风险等级高(肖安等,2013;陈娟,2018)。为减少洪涝灾害损失,合理利用和保护水资源,科学开展库区来水量预报十分必要。新安江模型作为概念性降雨径流模型的典范,在我国湿润与半湿润地区取得了良好的效果,因而被广泛应用。模型在流域空间范围内,基于数理知识和水文学产汇流原理,对降水造成的径流过程进行局部或整体模拟,以适应流域地貌的水文响应(余胜男等,2019)。由于水文模型结构复杂,水文资料差异,不同尺度、不同地貌特征流域的模型参数往往各不相同,对适应流域选取率定合适的参数一直是水文模型研究的热点(欧阳硕等,2014)。模型参数优化率定是通过假设和简化,将水文模型参数率定问题转化为单纯的数理问题,旨在最大程度上降低模型参数的不确定性,以提高模型预报准确度(王欣,2018)。传统的参数率定方法有人工试错法、函数最大最小值法、梯度下降法等(Wang et al, 1991; Vijay et al, 1996; Liu et al, 2005; 杜富慧等, 2013; 邓元倩等, 2017),上述方法虽然直观,但耗时严重,主观性较强,且大多只是对局部进行优化,缺乏一套整体有效的客观标准。随着计算机技术的发展,各类自动率定法,如粒子群优化算法、贝叶斯算法、多目标 GLUE 算法、遗传算法、SCE-UA 算法被用来在水文模型中进行参数优化率定,取得了不错的效果(Dorigo et al, 2000; 杨晓华等, 2002; Kannan et al, 2004; 董洁平等, 2012; 张永勇等, 2013; 任政等, 2016; Tang et al, 2016)。其中,遗传算法是一种全局优化算法,因其简单通用、鲁棒性强、优化精度高、收敛速度快等特点被广泛应用于大气科学、污染预测、水文预报等领域。Cheng 等(2006)将遗传算法与 TOPSIS 技术相结合,提出了一种新的多准则参数校准问题的方法,简化了模型校准和验证的过程。武新宇等(2004)为得到较为稳定的新安江模型参数,提出了参数率定的并行遗传算法,大大缩短了优化时间。周瑜佳(2018)等针对传统手工调试参数的不足,构建了一种复合形遗传算法,用于解决浙江朱溪下回头站以上流域的参数率定问题。金晶等(2005)提出了改进自适应遗传算法完善了遗传算法的收敛速度。

基于江西七一水库用电站 2016—2018 年水文资

料,采用遗传算法对水库新安江预报模型进行参数优化率定,以提高模型对流域来水增量预报的准确性。

1 资料和方法

1.1 资料

文中使用数据为江西省七一水库 2016—2018 年的日水位、每日库容、日均入库流量、日均出库流量以及降雨量等数据。七一水库位于鄱阳湖水系信江支流金沙溪中游棠梨山西侧,距玉山县城 16 km。坝址以上控制流域面积 324 km²,总库容 2.49 × 10⁹ m³。水库灌溉面积约 7 000 hm²。七一水库建立了水情自动测报系统,共设了中心站 1 个,中继站 1 个,遥测站 7 个。中心站设在管理局办公楼 3 楼,中继站设在大坝东山头的鹰背岗上,建有 1 座 25 m 高的通讯铁塔。遥测站分别设在坝首、坝下、八仙洞、大树坞、金沙、长坂,其中坝首为水位雨量站,其他为雨量站。站点的降雨量观测采用翻斗式自记雨量计进行雨量采集,站点的水位观测采用浮子式水位计自动测记。

1.2 方法

来水量预报模型采用新安江模型,模型参数率定采用遗传算法。新安江水文模型是多参数的概念性水文模型,在湿润与半湿润地区应用比较多。该模型在水文模拟时,将流域下垫面分成若干子流域(或若干单元),将每个子流域流量过程模拟验算到流域出口,再将各个子流域进行叠加就得到了整个流域的径流量。文中将 3 个子流域分为饱和地面径流、壤中水径流和地下水径流,共 15 个参数,具体取值范围和含义如表 1 所示。遗传算法是一类借鉴生物界适者生存、优胜劣汰的进化规律演化而来的自适应迭代算法。遗传算法借用了自然选择和生物遗传机理,通过自然选择、遗传、变异等作用机制,提高个体适应性,通过多次迭代达到最适合环境值。遗传算法包含参数编码、初始群体设定、适应度函数设计、遗传操作设计、控制参数设定(图 1)。

染色体的适应度越高,被选择的机会就越多, Srinivas M 提出某个体适应度值大于平局适应度,则优良程度赋予该个体对应的变异率(P_m)和交换率(P_c),最后适应度越来越接近最大适应度(关旭等, 2003; 金晶和苏勇, 2005; 陈明杰和刘胜, 2007)。 P_m 和 P_c 计算公式为:

$$P_c = \begin{cases} k_1 \frac{f_{\max} - f_{\text{sec}}}{f_{\max} - f_{\text{ave}}}, & f_{\text{sec}} \geq f_{\max} \\ k_3, & f_{\text{sec}} < f_{\text{ave}} \end{cases} \quad (1)$$

$$P_m = \begin{cases} k_2 \frac{f_{\max} - f_{\text{sec}}}{f_{\max} - f_{\text{ave}}}, f_{\text{sec}} \geq f_{\max} \\ k_4, f_{\text{sec}} < f_{\text{ave}} \end{cases} \quad (2)$$

其中, f_{ave} 为种群适应度; f_{\max} 为种群最大适应度; f_{sec} 为交换双方适应度较大者的适应度; f 为个体适应度; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为常数, 均小于 1 且大于 0。

从式(1)、(2)可以得出, 适应度越接近最大适应度, 个体的 P_m 和 P_c 越小, 当出现最大适应度时, P_m 和 P_c 为 0。文中通过遗传算法迭代, 选出适应度最

大的个体进行解码, 得到率定参数的值。文中将新安江模型的 1 个参数设为 1 个染色体, 15 个染色体即 15 个参数构成 1 个体, 选取 500 个个体构成 1 个种群。遗传算法对参数率定步骤为, 第一步随机初始化, 进行适应度分析, 淘汰低适应度, 选择高适应度个体进行交换和变异形成新种群, 再对新种群进行淘汰选择交换变异, 通过不断循环, 最终在种群中产生适应度最高的个体, 这个个体作为最终优选出的 15 个参数。

表 1 新安江(三水源)水文模型参数
Table 1 Parameters of Xin'an Jiang (three water sources) hydrological model

参数	含义	取值范围
K	蒸发能力折算系数	0.1—3
WDM	深层蓄水量	1—100
WUM	上层蓄水量	1—30
WLM	下层蓄水量	1—100
C	深层蒸散发系数	0.05—0.5
IMP	不透水面积占全流域面积之比	0.005—0.2
B	蓄水量曲线指数	0.05—2
SM	流域自由水蓄水量	2—80
EX	自由水蓄水量曲线指数	0.1—3
KSS	壤中水径流出流系数	0.1—0.55
KG	地下水径流出流系数	0.7—KSS
CS	地面径流消退系数	0.1—0.9
KKSS	壤中水径流消退系数	0.1—0.99
KKG	地下水径流消退系数	0.9—0.999
L	滞时	0—20

2 模型参数优化分析

2.1 模型参数率定

基于遗传算法, 将 2016、2017 年七一水库的日入库流量作为真实值, 并作为入库来水流量模拟计算的参考, 以过去 10 d 雨量进行线性回归模拟, 计算日入库来水流量, 并对七一水库来水流量新安江模型进行参数调优和建模, 表 2 为参数率定后的结果。

通过遗传算法进行参数率定后, 敏感性强的 WDM、WUM、C、KSS 等参数的值增大, 说明对于七一水库, 深层蓄水量、深层蒸散发系数、上层蓄水量、壤中水径流出流系数等参数对模型的影响较大, 对径流量的贡献较大。而 WLM、IMP 等参数的值减小, 说明对于七一水库, 下层蓄水量和不透水面积比例等参数对模型的影响较小, 对径流量的贡献较小。七一水库特殊的水文气象环境通过遗传算法反映到参数中, 进而融入到新安江预报模型, 建立适用于七一水库的流量预报模型。

2.2 流量模拟

基于 2018 年七一水库全年日流量、降雨等资料, 运用率定参数后的七一水库新安江模型、输入日雨量和蒸发量, 分别计算得到参数优化前后 2018 年流量预报模拟值, 并与实况流量进行对比(图 2), 参数率定前后流量预报趋势一致, 均与实况较为接近。

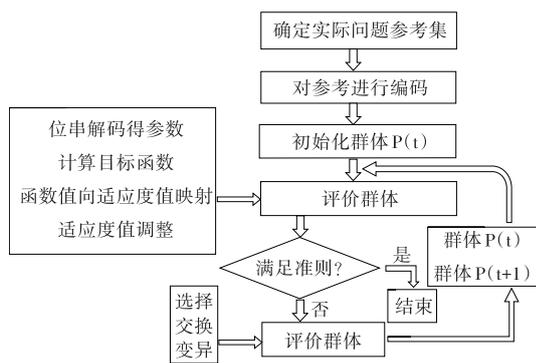


图 1 遗传算法基本流程

Fig. 1 The basic process of genetic algorithm

3 检验分析

针对 2018 年七一水库新安江模型参数率定前后全年日流量预报误差进行对比检验, 通过计算水库全

表 2 七一水库来水流量新安江模型遗传算法参数率定结果
Table 2 Parameters calibration of the Xin'an Jiang model

率定次数	K	WDM	WUM	WLM	C	IMP	B	SM	EX	KSS	KG	KKG
1	0.665	26.548	15.242	56.568	0.065	0.122	0.843	14.597	2.062	0.229	0.305	0.968
2	0.325	58.475	21.696	17.811	0.410	0.064	0.602	42.817	2.747	0.434	0.295	0.930
3	0.961	45.039	26.029	7.750	0.310	0.074	0.851	15.937	0.542	0.493	0.410	0.980
平均值	0.650	43.354	20.989	27.376	0.262	0.087	0.765	24.450	1.784	0.385	0.337	0.959
标准差	0.260	13.090	4.430	21.050	0.140	0.030	0.120	13.000	0.920	0.110	0.050	0.020

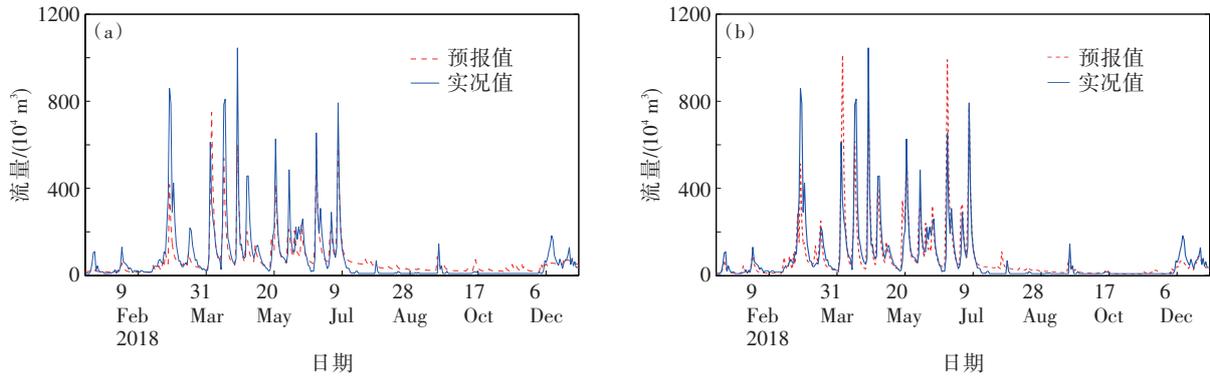


图2 2018年率定参数前(a)、后(b)模型日流量预报与实况对比

Fig. 2 Comparison of predicted daily flow and the observations between the original model (a) and optimized model (b) in 2018

年的模拟入库日流量和实际入库日流量的误差,进而分析全年的日误差、月误差和年误差等。

对2018年参数率定前后模型的全年日流量预报结果与实况结果进行误差对比分析。并对每日的相对误差进行了对比分析(图3a),发现,率定参数前后日流量的误差起伏都比较大,7月中旬前两者的误差相差不大,但是7月中旬以后率定参数后的模型预报误差明显减小。从全年月误差结果检验分析(图3b)来看,7月份之前,率定参数前后模型预报的误差以负偏差为主,率定后的模型预报负偏差较小,预报的效果较好;7月份之后率定参数前后模型预报的误差以正偏差为主,率定后的模型预报正偏差小,预报的效果好。从月预报误差检验来看,率定参数后的模型预报误差明显减少。

对2008年率定参数前后模型预报流量结果年平均误差检验对比(表3)可见,率定参数后确定性系数增加,平均相对误差明显减少,平均绝对误差和均方根误差有所下降。从全年平均各项误差分析指标来

看,率定参数后模型的预报效果优于率定参数前。

选取2018年7个强降水过程实例来检验七一水库新安江模型率定参数后的预报效果。表4、5给出了7个强降水过程率定参数前后的观测累积流量、模拟累积流量、流量误差和流量相对误差的数值对比。图4为率定前后强降水过程模型预报月流量相对误差对比结果,分析可见,率定参数后模型预报误差明显减小,其中5个过程预报误差明显减小,1个过程预报误差略有减小,另外一个过程预报误差比较接近。从强降水过程实例模型预报效果检验来看,率定

表3 2008年率定参数前后模型预报流量结果年平均误差检验对比分析

Table 3 Comparison and analysis of the annual average error test of the model flow forecast results before and after the calibration parameters in 2008

误差分析指标	确定性系数	平均相对误差/%	平均绝对误差/(10 ⁴ m ³)	均方根误差/(10 ⁴ m ³)
率定参数前	0.663	93.82	40.58	81.18
率定参数后	0.686	46.77	34.72	78.46

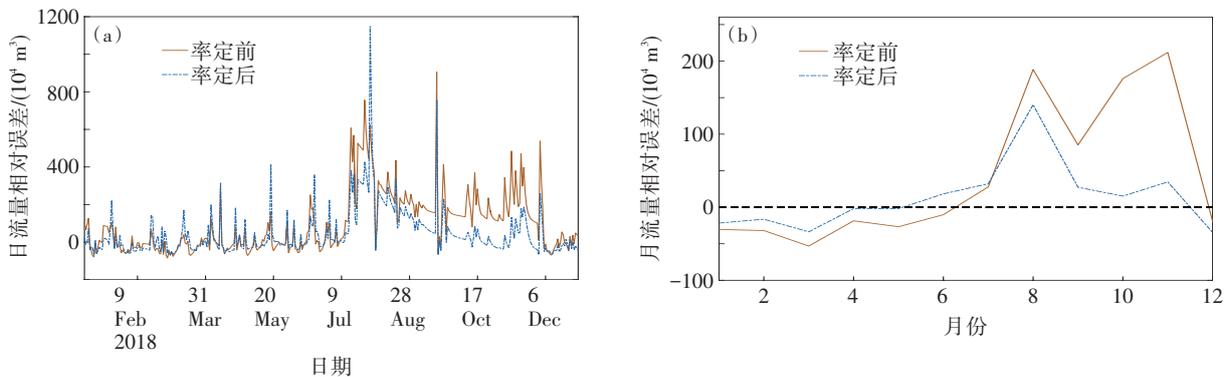


图3 2018年率定前后模型预报日(a)、月(b)流量相对误差对比

Fig. 3 The relative errors of predicted daily (a) and monthly (b) flow by the model before and after calibration in 2018

表4 2018年未率定参数前模型预报强降水过程入库流量误差

Table 4 Error of the model's predicted inflow for the heavy precipitation process before calibration in 2018

强降水过程	观测累积流量/(10 ⁴ m ³)	模拟累积流量/(10 ⁴ m ³)	流量误差/(10 ⁴ m ³)	流量相对误差/%
3月1日—3月7日(过程1)	3 046.46	1 126.41	-1 920.05	-63.03
3月19日—3月22日(过程2)	665.28	232.63	-432.65	-65.03
4月11日—4月14日(过程3)	1 857.60	1 138.34	-719.26	-38.72
4月20日—4月23日(过程4)	1 233.79	840.53	-393.26	-31.87
5月21日—5月24日(过程5)	1 238.11	931.53	-306.58	-24.76
5月31日—6月2日(过程6)	835.50	455.98	-379.52	45.42
7月7日—7月9日(过程7)	692.06	704.01	11.95	1.73

表5 2018年率定参数后模型预报强降水过程入库流量误差

Table 5 Error of the model's predicted inflow for the heavy precipitation process after calibration in 2018

强降水过程	观测累积流量/(10 ⁴ m ³)	模拟累积流量/(10 ⁴ m ³)	流量误差/(10 ⁴ m ³)	流量相对误差/%
过程1	3 046.46	1 652.74	-1 393.72	-45.75
过程2	665.28	527.01	-138.27	-20.78
过程3	1 857.60	1 260.15	-597.45	-32.16
过程4	1 233.79	1 091.45	-142.34	-11.54
过程5	1 238.11	1 242.14	4.03	0.33
过程6	835.50	625.82	-209.68	-25.10
过程7	692.06	722.09	30.03	4.34

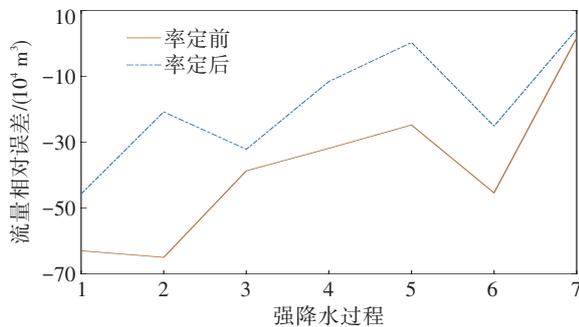


图4 2018年率定前后强降水过程模型预报流量相对误差
Fig. 4 The relative error of flow forecasted by the model for heavy precipitation process before and after the calibration in 2018

参数后的模型预报能力明显优于率定参数前。从误差的分析结果来看,每一个过程的误差不尽相同,这可能是由于降水空间分布的不连续性,七一水库周边复杂的地形地貌以及面雨量算法的局限性引起,因此模型模拟的面雨量很难完全反映实际情况,从而导致了误差大小的差异。另外,季节性降水对误差也有影响,表4可见3月份的误差较大,可能是由于3月份对流性天气较多,降水的局地性导致的。

4 结论与讨论

文中采用遗传算法对七一水库来水流量新安江模型进行了参数化率定,该算法主要对模型的蓄水

容量、深层蒸散发系数、壤中水径流出流系数和不透水面比例等敏感性参数进行优化,进而建立了本地化的七一水库新安江模型。并对七一水库来水流量新安江预报模型参数优化前后流量预报的日误差、月误差、年误差和强降水过程实例流量预报误差进行分析,发现该模型日误差在7月中旬以后明显减小;月误差在7月份之前误差以正偏差为主,7月份以后以负偏差为主;年误差整体上是优化后好于优化前;强降水过程流量预报中,参数优化后的误差明显减小,不同强降水过程误差程度相差较大,这可能与降水空间分布不连续性、面雨量计算方法的局限性以及降水天气类型有关。

上述模型参数率定还有进一步优化的空间,比如考虑分不同季节、分区进行率定参数,可使得结果进一步提高。另外,模型计算时没有考虑前一天实际的入库流量,如果加入实际流量,在流量预报上可以得到更好的结果。

参考文献 (References)

陈明杰,刘胜,2007. 改进自适应遗传算法在函数优化中的应用研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,27(8):875-9. Chen M J, Liu S, 2007. Application research of improved adaptive genetic algorithm in function optimization[J]. J Harbin Eng Univ, 27(8): 875-879. (in Chinese)

陈娟,2018. 重要天气过程概述[J]. 气象与减灾研究,41(4). Chen J, 2018. Overview of important weather processes[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 41(4). (in Chinese)

Cheng C T, Ming Y Z, Chau K W, Wu X Y, 2006. Using genetic algorithm and TOPSIS for Xinjiang Model calibration with a single procedure[J]. J Hydrol, 316(1):22-28.

邓元倩,李致家,刘甲奇,等,2017. 基于SCE-UA算法新安江模型在沔河流域的应用[J]. 水资源与水工程学报,28(3):27-31. Deng Y Q, Li Z J, Liu J Q, et al, 2017. Application of Xinjiang Model based on SCE-UA algorithm in Fenghe river basin [J]. J Water Resources Eng, 28(3):27-31. (in Chinese)

董洁平,李致家,戴健男,2012. 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),40(5):485-490. Dong J P, Li Z J, Dai J N, 2012. Parameter optimiza-

- tion and application of Xinanjiang model based on SCE-UA algorithm [J]. *J Hohai Univ (Nat Sci)*, 40(5):485-490. (in Chinese)
- Dorigo M, Bonabeau E, Theraulaz G, 2000. Ant algorithms and stigmergy[J]. *Future Gen Comp Sys*, 16(8):851-871.
- 杜富慧, 2013. 随机梯度法在新安江模型参数优选中的应用[J]. *水利水电技术*, 44(7):17-20, 24. Du F H, 2013. Application of stochastic gradient method in parameter optimization of Xin'anjiang model[J]. *Water Resources Hydropower Eng*, 44(7):17-20, 24. (in Chinese)
- 关旭, 张春梅, 王尚锦, 2003. 一种改进的自适应遗传算法[J]. *微机发展*, 13(11):41-42, 44. Guan X, Zhang C M, Wang S J, 2003. An improved adaptive genetic algorithm[J]. *Micro Development*, 13(11):41-42, 44. (in Chinese)
- 金晶, 苏勇, 2005. 一种改进的自适应遗传算法[J]. *计算机工程与应用*, 41(18):64-69. Jin J, Su Y, 2005. An improved adaptive genetic algorithm[J]. *Computer Eng App*, 41(18):64-69. (in Chinese)
- Kannan S, Slochanal S M R, Subbaraj P, et al, 2004. Application of particle swarm optimization technique and its variants to generation expansion planning problem[J]. *EPS Res*, 70(3):203-210.
- Liu F, Zhou J Z, Fang R C, et al, 2005. An improved particle swarm optimization and its application in long-term streamflow forecast[C]//Guangzhou: International Conference on Machine Learning & Cybernetics.
- 欧阳硕, 徐高洪, 戴明龙, 等, 2014. 概念性水文模型参数多目标率定及参数组合预报[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 46(6):63-70. Ou Y S, Xu G H, Dai M L, et al, 2014. Conceptual hydrological model parameter multi-target calibration and parameter combination forecast[J]. *J Sichuan Univ(Eng Sci)*, 46(6):63-70. (in Chinese)
- 任政, 盛东, 2016. 基于多目标 GLUE 算法的新安江模型参数不确定性研究[J]. *水电能源科学*, 34(3):15-18, 43. Ren Z, Sheng D, 2016. Research on parameter uncertainty of Xin'anjiang model based on multi-objective GLUE algorithm[J]. *Water Resource Power*, 34(3):15-18, 43. (in Chinese)
- Tang Y, Reed P, Wagener T, 2006. How effective and efficient are multiobjective evolutionary algorithms at hydrologic model calibration[J]. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*, 10(2):289-307.
- Vijay P S, 1996. Computer models of watershed hydrology[M]. Highlands Ranch: Water Resources Pub:23-68.
- Wang Q J, 1991. The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models[J]. *Water Resources Res*, 27(9):2467-2471
- 王欣, 2018. 水文模型参数率定方法及异参同效特征研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学. Wang X, 2018. Study on the parameter calibration method of hydrological model and the characteristics of the same effect with different parameters[D]. Haerbin: Northeast Agri Univ. (in Chinese)
- 武新宇, 程春田, 赵鸣雁, 2004. 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*, 35(11):85-90. Wu X Y, Cheng C T, Zhao M Y, 2004. Parameter optimization method of Xinanjiang model based on parallel genetic algorithm[J]. *J Water Resources*, 35(11):85-90. (in Chinese)
- 肖安, 陈云辉, 薛湛彬, 2013. 江西 2012 年 5 月 12 日大暴雨过程水汽输送分析[J]. *气象与减灾研究*, 36(1):39-46. Xiao A, Chen Y H, Xue C B, 2013. Analysis of water vapor transport during heavy rain in Jiangxi on May 12, 2012[J]. *Meteor Disaster Reduction Res*, 36(1):39-46. (in Chinese)
- 杨晓华, 陆桂华, 酆建强, 等, 2002. 混合加速遗传算法在流域模型参数优化中的应用[J]. *水科学进展*, 13(3):340-344. Yang X H, Lu G H, Li J Q, et al, 2002. Application of hybrid accelerated genetic algorithm in parameter optimization of watershed models[J]. *Adv Water Sci*, 13(3):340-344. (in Chinese)
- 余胜男, 张雪, 邵年华, 等, 2019. PA-DDS 算法在新安江模型参数优化中的应用[J]. *人民珠江*, 40(12):62-69. Yu S N, Zhang X, Shao N H, et al, 2019. Application of PA-DDS algorithm in parameter optimization of Xin'anjiang model[J]. *People's P R*, 40(12):62-69. (in Chinese)
- 张永勇, 张士锋, 翟晓燕, 等, 2013. 气候变化下石羊河流域径流模拟与影响量化[J]. *资源科学*, 35(3):143-151. Zhang Y Y, Zhang S F, Zhai X Y, et al, 2013. Runoff simulation and impact quantification of Shiyang River Basin under climate change[J]. *Resources Sci*, 35(3):143-151. (in Chinese)
- 周瑜佳, 陈一帆, 淡娇娇, 刘立军, 2018. 基于复合形遗传算法的新安江模型参数优化率定研究[J]. *中国农村水利水电*, (5):114-118. Zhou Y J, Chen Y F, Dan J J, Liu L J, 2018. Research on parameter optimization of Xin'anjiang model based on complex genetic algorithm[J]. *China Rural Water Hydropower* (5):114-118. (in Chinese)