

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.022

Free Search算法率定的Sacramento模型在东北寒旱区的应用

王 斌^{1,2} 黄金柏³ 宫兴龙¹ 朱士江⁴ 王贵作⁵

(1. 东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;
3. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225009; 4. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002;
5. 水利部发展研究中心, 北京 100038)

摘要: 采用模型对比研究方法,以萨克拉门托(Sacramento,SAC)模型为研究对象,以新安江模型为参考,采用基于动物群体的自由搜索(Free search,FS)算法作为率定水文模型的优化算法,选取松花江水系和辽河水系的3个集水区为实证流域,通过对比FS算法率定的SAC模型和新安江模型在3个流域的模拟效果,验证SAC模型在东北寒旱区流域的适用性。研究表明,FS算法迭代计算过程简单,需要设置的算法参数较少,在率定SAC模型和新安江模型时效率较高;在相同的模拟条件下,FS算法率定的SAC模型模拟效果更好,其Nash模型效率系数高于新安江模型,表明SAC模型适用于东北寒旱区流域;但SAC模型在东北寒旱区的模拟精度还有待提升,模型尚需进一步发展和完善。

关键词: Sacramento模型; 新安江模型; Free search算法; 东北寒旱区

中图分类号: P333.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0171-07

Application of Sacramento Model Calibrated by Free Search Algorithm in Cold and Arid Region of Northeast China

Wang Bin^{1,2} Huang Jinbai³ Gong Xinglong¹ Zhu Shijiang⁴ Wang Guizuo⁵

(1. College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China

3. College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

4. College of Hydraulic and Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China

5. Development Research Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Free search (FS), which was set up based on the group of animal behavior, was adopted as an optimization algorithm to calibrate the Sacramento (SAC) model and the Xin'anjiang (XAJ) model. Calculation of the calibrated SAC model and XAJ model were conducted for the three watersheds of Songhua River System and Liao River System. Applicability of the SAC model was validated in cold and arid regions of Northeast China via comparison of the simulation results between the SAC model and XAJ model. The results indicated that the iterative calculation process of FS was simple and needed a few settings of the algorithm parameters, and it exhibited relatively high efficiency in the process of SAC model and XAJ model calibration; the simulation result of the SAC model was better than that of the XAJ model under the same conditions and its Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient was higher than that of XAJ model. Whereas, the simulation accuracy of the SAC model needed to be improved in the case of application to the cold and arid region of Northeast China, and the performance of the SAC model needed

收稿日期: 2015-11-30 修回日期: 2016-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51009026,41271046)、黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12531024)和农业部农业水资源高效利用重点实验室开放课题项目(2015002)

作者简介: 王斌(1976—),男,副教授,博士,主要从事水文过程模拟研究,E-mail: wangbin@neau.edu.cn

通信作者: 宫兴龙(1978—),男,副教授,博士,主要从事水文模型预报研究,E-mail: gongxinglong5188@126.com

further development and improvement.

Key words: Sacramento model; Xin'anjiang model; Free search algorithm; cold and arid region of Northeast China

引言

目前,虽然国内外研发的流域水文模型众多,但在水文学科领域研究时间最长、影响最大、发展最快、实用性较强的主要还是概念性模型^[1]。在国内典型的概念性流域水文模型中,新安江(Xin'anjiang, XAJ)模型已在我国湿润、半湿润地区得到广泛应用,陕北模型也在黄土高原部分小流域取得成功^[2]。我国东北大部分地区处于寒区^[3]和旱区^[4](以下简称寒旱区),受地理、气候等条件限制,关于我国东北寒旱区水文模型的研究相对较少。根据“湿润地区以蓄满产流为主,干旱地区以超渗产流为主”的基本产流模式共识^[2,5-7],蓄满产流模型并不完全适用于东北寒旱区;我国各类水文站网布设密度偏低,水文数据时空分辨率不高,在较大尺度流域,当前的水文数据条件也很难支撑超渗产流模型^[8]。此外,东北地区冬季寒冷漫长,降雪、积雪、融雪、冻土、河道冰封、河水断流等水文现象普遍,这些不利因素增加了研发水文模型的难度。因此,针对东北寒旱区自然地理特点开展流域水文模型研究是十分必要的。

萨克拉门托(Sacramento, SAC)模型是美国萨克拉门托河流预报中心研制的一个概念性流域水文模型,在我国东北地区部分流域的应用结果表明其具有一定的适用性^[9-10]。尽管SAC模型的大多数参数都具有一定的物理意义,但在实践中还不能根据其物理意义直接确定这些参数,通常根据参数的概念利用实测或实验资料,采用试错或优选方法确定较合理的参数值^[1]。近年来,优选参数已成为水文模型研究的一个重要方面,各种优化算法已经取代传统试错法被应用于水文模型的参数率定中,经常被采用的有SCE-UA算法、遗传算法、粒子群算法等^[11-16]。然而,在求解同一个优化命题时,不同算法的寻优结果往往不同^[17-21],这表明不同算法的寻优能力存在差别。自由搜索(Free search, FS)算法是PENEV等^[17]提出的一种基于群体的优化算法,与遗传算法、粒子群算法相比,FS算法具有更好的寻优能力^[17-19]。

本文将FS算法引入到流域水文模型的参数率定中,采用模型对比研究方法,以XAJ模型为参考,验证FS算法率定的SAC模型在东北寒旱区流域的适用性,为在我国东北地区选择适用的水文模型提

供借鉴。

1 FS算法率定水文模型原理

FS算法源于动物迁移行为,在FS算法的概念模型中,动物群体凭借多次的离散运动通过搜索空间。在搜索过程中,动物个体采取探查行走方式,其目的是为了发现一个自己偏好的位置,在实际寻优问题中即发现了目标函数的一个潜在解。在探查行走过程中,每个动物都会找到一些潜在解(位置),并参照这些解的质量散发出相应的信息素,动物群体再依据这些信息素更新自己位置。不同的动物对信息素的敏感性不同,它们会选择适合自己的位置开始下一次的探查行走,直至搜索行为结束^[17]。FS算法通过初始化、探查和终止3个步骤实现寻优目的,如果满足设定的终止条件,则搜索行为结束。

采用FS算法率定水文模型参数时,设动物群体数量为 m ,则动物个体每步探查行走的位置向量对应参数的一组潜在解。第 j 个动物通过 T 步探查行走得到的位置矩阵可表示为

$$P_j = \begin{bmatrix} p_{1j} \\ p_{2j} \\ \vdots \\ p_{Tj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11j} & p_{12j} & \cdots & p_{1nj} \\ p_{21j} & p_{22j} & \cdots & p_{2nj} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{t1j} & p_{t2j} & \cdots & p_{tnj} \\ p_{T1j} & p_{T2j} & \cdots & p_{Tnj} \end{bmatrix}$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, T) \quad (1)$$

式中 T ——探查步数

n ——搜索空间维数,即水文模型参数的个数

P_j ——第 j 个动物 T 步探查得到的位置矩阵

p_{ij} ——第 j 个动物第 t 步探查时的位置向量

p_{tij} ——第 j 个动物第 t 步探查时的第 i 维位置分量,即水文模型的第 i 个参数

如果采用随机化的初始策略,则

$$p_{0ij} = p_{imin} + (p_{imax} - p_{imin}) \text{rand}(0, 1) \quad (2)$$

式中 p_{0ij} ——第 i 维位置变量的初始值,即水文模型第 i 个参数的初始值

p_{imin} 、 p_{imax} ——第 i 维搜索空间的边界,即水文模型第 i 个参数值变化区间

$\text{rand}(0, 1)$ ——介于 $[0, 1]$ 之间的随机数

通过探查行走,更新动物个体位置

$$p_{ij} = p_{0ij} - \Delta p_{ij} + 2\Delta p_{ij} \text{rand}(0, 1) \quad (3)$$

其中 $\Delta p_{ij} = R_{ij}(p_{imax} - p_{imin}) \text{rand}(0, 1)$

式中 R_{ij} ——搜索邻域半径

在探查行走过程中,动物个体的行为可以表示为

$$f_j = \max(f_{ij}) \quad (4)$$

其中 $f_{ij} = f(p_{ij}) \quad (5)$

式中 f_j ——第 j 个动物 t 步探查过程中的最优值

f_{ij} ——第 j 个动物第 t 步探查所得的目标函数值

信息素 I_j 更新为

$$I_j = f_j / \max(f_j) \quad (6)$$

敏感性 S_j 更新为

$$S_j = S_{\min} + \Delta S_j \quad (7)$$

其中 $\Delta S_j = (S_{\max} - S_{\min}) \text{rand}(0, 1) \quad (8)$

式中 S_{\max} ——最大敏感性

S_{\min} ——最小敏感性

$$I_{\max} = S_{\max} \quad (9)$$

$$I_{\min} = S_{\min} \quad (10)$$

最后,选择和决策下一次探查行走的开始位置

$$p'_{0ij} = p_{ij} \quad (I_l \geq S_j, l = 1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

式中 I_l ——第 l 个动物散发的信息素

算法判断是否满足设定的终止条件,如果满足说明已经搜索到可以接受的最优解,不满足则继续探查搜索。可见,FS 算法概念清晰,需要设置的参数较少,迭代计算过程简单,算法容易编程实现。

2 SAC 模型与 XAJ 模型

2.1 SAC 模型特点及其参数

SAC 模型设计了上、下 2 土层的结构,每个土层的含水量包括张力水和自由水 2 种,下土层的自由水又被细分为快速自由水和慢速自由水 2 部分,利用张力水和自由水蓄量表达土壤水分状态并产生 5 种径流。SAC 模型特色是考虑了土壤水的下渗过程并通过下渗曲线沟通上、下 2 土层,较好地考虑了超蓄与超渗 2 种过程,一般认为适用于湿润与干旱地区^[2,22]。SAC 模型参数包括^[23]:①上土层参数:上土层张力水容量 UZTWM、上土层自由水容量 UZFWM、上土层自由水出流系数 UZK。②下土层参数:下土层张力水容量 LZTWM、下土层浅层自由水容量 LZFSM、下土层深层自由水容量 LZFPFPM、下土层浅层自由水出流系数 LZSK、下土层深层自由水出流系数 LZPK、上土层向下土层下渗水量中补给下土层自由水的比例 PFREE。③渗透参数:上土层向下土层的下渗系数 ZPERC、描述下渗曲线的指数 REXP。④控制不透水面积上产流和蒸散发的次要参数:永久不透水面积比例 PCTIM、可变不透水面积比例 ADIMP、不闭合的地下水出流量比例 SIDE、下土层自由水中不参与蒸散发的比例 RSERV、河网与

湖泊及水生植物覆盖的面积比例 SARVA。通常认为 SARVA 为 PCTIM 的 40% ~ 100%,SIDE 值为零或接近零,但在地下排水流失极大的地区,SIDE 可以达到 5^[24]。此外,SAC 模型还包括不闭合的地表水出流量比例 SSOUT 等,一般推荐 SSOUT 取零^[1,24]。SAC 模型主要参数的一般取值变化范围见表 1^[1,24]。

表 1 SAC 模型主要参数及其变化范围

Tab. 1 Main parameters and their feasible ranges of SAC model

参数	数值
UZTWM/mm	10 ~ 300
UZFWM/mm	5 ~ 150
UZK	0.1 ~ 1
LZTWM/mm	10 ~ 635
LZFSM/mm	5 ~ 400
LZFPFPM/mm	10 ~ 1 000
LZSK	0.01 ~ 0.35
LZPK	0.001 ~ 0.05
PFREE	0 ~ 0.8
ZPERC	5 ~ 350
REXP	1 ~ 5
RSERV	0 ~ 0.4

2.2 XAJ 模型特点及其参数

XAJ 模型采用蓄满结构和 3 层蒸散发计算模式,自 1973 年提出以来获得很大发展,最初的 XAJ 模型仅划分 2 种水源,后改进为 3 水源 XAJ 模型。3 水源 XAJ 模型一般包括 4 大类 16 个参数^[25]:①蒸散发参数:蒸散发能力折算系数 K 、上层张力水容量 WUM 、下层张力水容量 WLM 、深层蒸散发系数 C 。②产流参数:张力水容量 WM 、张力水蓄水容量曲线的方次 B 、不透水面积的比例 IMP 。③水源划分参数:表层土自由水蓄水容量 SM 、表层土自由水蓄水容量曲线的方次 EX 、自由水对壤中流的出流系数 KSS 、地下水从自由水库中的出流系数 KG 。④汇流计算参数:壤中流日退水系数 $KKSS$ 、地下水日退水系数 KKG 、河网单位线 UH 、马斯京根法参数 KE 与 XE 。当采用 E601 型蒸发器时, K 一般小于 1^[1];对于 1 000 km² 左右的流域,当退水历时为 3 d 左右时, KSS 与 KG 之和为 0.7, UH 、 KE 和 XE 一般可采用经验方法或根据河道的水力学特性推求^[25]; KE 一般等于计算时段,而 XE 小于 0.5^[1]。表 2 为根据多篇文献整理的 XAJ 模型主要参数取值范围^[1-2,25]。

2.3 FS 算法率定水文模型时涉及的问题

本研究主要验证基于 FS 算法的 SAC 模型在东北寒旱区流域的适用性,为进一步发展 SAC 模型奠定基础,因此,对 2 个水文模型均不做任何修正或改进,暂不考虑积雪融雪、土壤冻结等寒区水文现象对

表2 XAJ模型主要参数变化范围

Tab.2 Main parameters and their feasible ranges of XAJ model

参数	数值
WUM/mm	5~20
WLM/mm	60~90
C	0.08~0.20
WM/mm	100~200
B	0.1~0.4
IMP	0.01~0.04
SM/mm	10~50
EX	1~1.5
KSS	0~0.7
KG	0~0.7
KKSS	0~0.9
KKG	0.950~0.998

模型的影响。2个模型输入相同的日降水量与日水面蒸发量数据,采取相同的汇流计算方案输出流域出口断面的日流量数据,参数均采用FS算法率定,其不同只在产流、蒸散发、分水源计算部分。采用Matlab语言编制FS算法和2个水文模型的源程序,将水文模型编写为可与FS算法程序传递参数的函数文件,并利用Nash模型效率系数(NS)评价水文模型的模拟效果,其计算式为

$$N_s = 1 - \frac{\sum_{k=1}^D (Q_{obs}(k) - Q_{sim}(k))^2}{\sum_{k=1}^D (Q_{obs}(k) - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (12)$$

式中 N_s ——Nash效率系数

D ——流量系列长度

$Q_{obs}(k)$ ——第 k 日实测流量, m^3/s

$Q_{sim}(k)$ ——第 k 日模拟流量, m^3/s

\bar{Q}_{obs} ——实测流量系列的均值, m^3/s

3 实例应用

3.1 实证流域概况

在松花江水系和辽河水系收集了欧根河发展站、呼兰河铁力站、老哈河甸子站以上的3处集水区作为实证流域,参照文献[3-4]给出的中国寒区、旱区范围,这3个流域均处于东北寒旱区,具体如下:欧根河为松花江水系呼兰河上游支流,其发展站地理坐标为东经 $127^{\circ}34'$ 、北纬 $47^{\circ}06'$,该站以上集水面积为 1704 km^2 ,收集1974—1981年4个雨量站和1个蒸发站数据;铁力站为松花江水系呼兰河上游水文站,地理坐标为东经 $128^{\circ}01'$ 、北纬 $46^{\circ}58'$,该站以上集水面积为 1838 km^2 ,收集1991—1998年8个雨量站和1个蒸发站数据;老哈河为辽河水系

西辽河上游支流,甸子站位于老哈河上游,地理坐标为东经 $118^{\circ}50'$ 、北纬 $41^{\circ}25'$,该站以上集水面积为 1643 km^2 ,收集1972—1979年7个雨量站和1个蒸发站数据。这3个流域面积接近,收集到的数据系列长度相等,每个流域内均设有1个蒸发站,且均采用 20 cm 蒸发器观测水面蒸发量。由于冬季河道冰封、断流等原因,发展站每年11月初至翌年4月前存在实测流量数据缺失现象,缺测的数据按零值处理。

3.2 FS算法率定水文模型

对于3个流量站,采用FS算法率定水文模型时,均取数据收集年限的前4a为率定期,后4a为检验期。设定FS算法动物个数 $m=20$,探查步数 $T=5$,迭代1000次,算法程序启动后可自动完成模型参数率定,避免人为因素对参数的影响。FS算法率定2个水文模型的过程如图1~3所示,参数率定结果如表3、4所示。

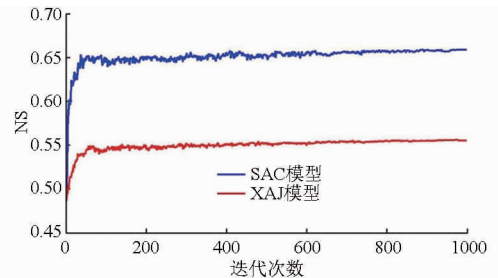


图1 发展站FS算法率定水文模型过程
Fig.1 Process of model calibration by FS algorithm at Fazhan Station

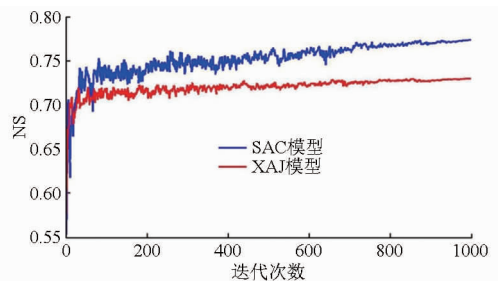


图2 铁力站FS算法率定水文模型过程
Fig.2 Process of model calibration by FS algorithm at Tieli Station

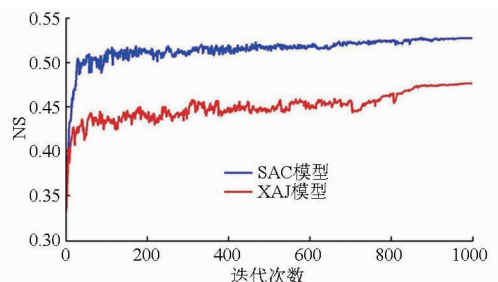


图3 甸子站FS算法率定水文模型过程
Fig.3 Process of model calibration by FS algorithm at Dianzi Station

由图 1 ~ 3 可知,FS 算法在率定 2 个水文模型时表现良好,其迭代过程近似一种震荡的“渐近线”状态,FS 算法率定的 SAC 模型对流量的模拟效果更好,表现为 3 个流域的 NS 寻优曲线均高于 XAJ 模型。由于 SAC 模型结构比 XAJ 模型复杂,程序语句更多,在相同条件下,FS 算法率定 SAC 模型的耗

时约为 XAJ 模型的 1.6 倍,但在当前的计算条件下,这种耗时差别可以忽略。

由于实证流域有限,仅从 3 个流域的参数率定结果(表 3、4)看,2 个模型的参数并没有表现出明显的地区规律。

表 3 FS 算法率定的 SAC 模型主要参数

Tab.3 Main parameters of SAC model calibrated by FS algorithm

水文站	UZTWM/ mm	UZFWM/ mm	UZK	LZTWM/ mm	LZFSM/ mm	LZFPM/ mm	LZSK	LZPK	PFREE	ZPERC	REXP	RSERV
发展站	10.15	74.82	0.58	484.09	160.19	210.83	0.33	0.05	0.37	97.30	2.59	0.23
铁力站	32.28	121.65	1.00	620.68	301.47	406.82	0.07	0.04	0.56	63.00	3.70	0.21
甸子站	83.96	130.87	1.00	208.75	208.31	116.65	0.11	0.01	0.53	29.03	1.51	0.13

表 4 FS 算法率定的 XAJ 模型主要参数

Tab.4 Main parameters of XAJ model calibrated by FS algorithm

水文站	WUM/ mm	WLM/ mm	C	WM/ mm	B	IMP	SM/ mm	EX	KSS	KG	KKSS	KKG
发展站	14.32	62.22	0.08	199.99	0.40	0.01	33.80	1.12	0.53	0.17	0.71	0.95
铁力站	9.62	68.47	0.14	199.20	0.40	0.01	10.02	1.22	0.04	0.66	0.62	0.95
甸子站	5.49	89.31	0.10	100.71	0.37	0.01	13.70	1.35	0.37	0.33	0.89	0.99

3.3 水文模型模拟结果

采用表 3、4 参数的 SAC 模型和 XAJ 模型对 3 个流域流量的模拟结果如图 4 ~ 6 所示,统计后的模拟结果如表 5、6 所示。

从图 4 ~ 6 可以看出,在数据收集年份间,无论年内或年际间,3 个流域的实测日流量过程变化剧烈。各水文站日流量变化范围分别为:发展站(缺

测数据除外) 0.01 ~ 186 m³/s,铁力站 0.06 ~ 916 m³/s,甸子站 0.01 ~ 166 m³/s;各水文站年径流极值比分别为:发展站 4.7,铁力站 9.5,甸子站 3.3。即便如此,2 个模型模拟的流量与实测流量变化过程能基本保持一致,但与文献[12 - 13,15]相比,2 个模型在东北寒旱区很难达到湿润地区的模拟精度。模拟精度不高除与东北寒旱区的自然地理条件

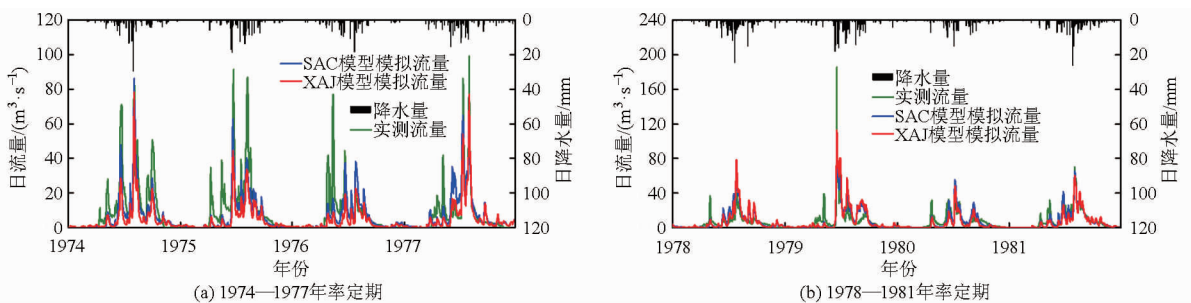


图 4 欧根河发展站日流量模拟结果

Fig.4 Results of daily runoff simulation at Fazhan Station over Ougen River

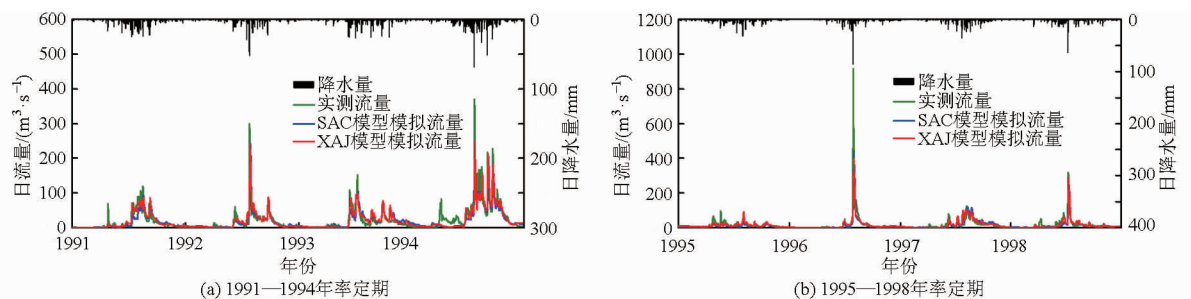


图 5 呼兰河铁力站日流量模拟结果

Fig.5 Results of daily runoff simulation at Tieli Station over Hulan River

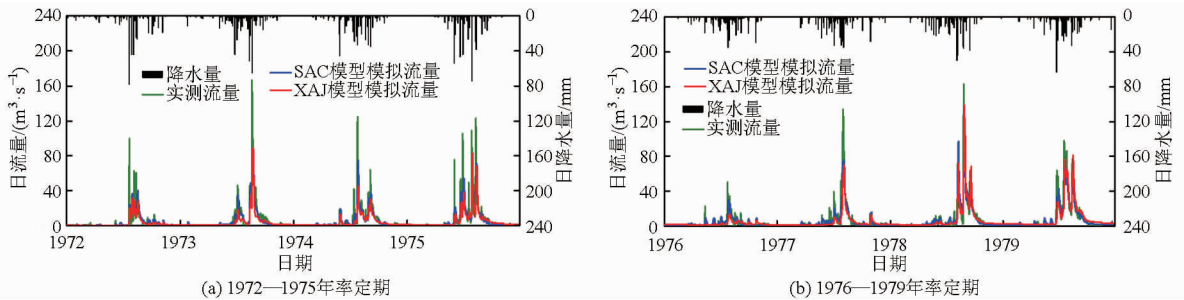


图6 老哈河甸子站日流量模拟结果

Fig.6 Results of daily runoff simulation at Dianzi Station over Laoha River

表5 FS算法率定的SAC模型模拟结果

Tab.5 Simulation results of SAC model calibrated by FS algorithm

模拟期	水文站	NS	R_{vol}	Q_{obs}/P	Q_{sim}/P	ET_a/P
率定期	发展站	0.659	0.772	0.286	0.221	0.727
	铁力站	0.774	0.994	0.437	0.434	0.494
	甸子站	0.528	0.944	0.174	0.164	0.884
检验期	发展站	0.689	1.086	0.213	0.231	0.707
	铁力站	0.564	1.058	0.368	0.389	0.596
	甸子站	0.781	1.010	0.187	0.189	0.780

注: R_{vol} 为模拟流量(Q_{sim})与实测流量(Q_{obs})的比值, P 为降水量, ET_a 为模型模拟的实际蒸散量,下同。

表6 FS算法率定的XAJ模型模拟结果

Tab.6 Simulation results of XAJ model calibrated by FS algorithm

模拟期	水文站	NS	R_{vol}	Q_{obs}/P	Q_{sim}/P	ET_a/P
率定期	发展站	0.556	0.549	0.286	0.157	0.845
	铁力站	0.730	0.949	0.437	0.414	0.565
	甸子站	0.476	0.814	0.174	0.142	0.876
检验期	发展站	0.639	1.028	0.213	0.219	0.779
	铁力站	0.503	1.005	0.368	0.370	0.634
	甸子站	0.734	1.000	0.187	0.187	0.802

有关外,水文模型的适用性、降水量与水面蒸发量数据的代表性、流量数据的可靠性等均可能引起水文模型模拟精度下降。

分析表5、6中 Q_{obs}/P 和 Q_{sim}/P 可见,与实测流

量相比,2个模型在率定期模拟的流量均偏小,而在检验期模拟的流量均偏大。从 Q_{obs}/P 与 ET_a/P 结果看,SAC模型模拟的流量较大,实际蒸散量较小;而XAJ模型模拟的流量较小,但实际蒸散量较大。总体而言,SAC模型的模拟效果更好,无论在率定期和检验期,SAC模型的NS均高于同期的XAJ模型。

4 结论

(1)FS算法迭代涉及的计算过程简单,率定水文模型时仅需设置群体数量、探查步数、迭代次数3个参数;FS算法和水文模型的源程序可独立编制,并依靠函数文件传递水文模型参数;在率定SAC模型和XAJ模型时,FS算法迭代1000次的结果已趋于稳定。这些均表明FS算法程序的编制、调用和执行均很简便,寻优效率较高,适于率定水文模型。

(2)在流域、模型输入数据、汇流计算方案、FS算法参数设置等条件均相同的情况下,FS算法率定的SAC模型在模拟东北寒旱区3个流域的流量过程时,Nash模型效率系数均高于XAJ模型,表明SAC模型较适用于模拟东北寒旱区流域的流量、实际蒸散量等水文过程。

(3)在模拟东北寒旱区流域水文过程时,SAC模型的模拟精度还有待提升,模型尚需进一步发展和完善。

参考文献

- 包为民. 水文预报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- 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.
- 陈仁升,康尔泗,吴立宗,等. 中国寒区分布探讨[J]. 冰川冻土,2005,27(4):469-475.
CHEN Rensheng, KANG Ersi, WU Lizong, et al. Cold regions in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(4): 469-475. (in Chinese)
- 信乃谄,王立祥. 中国北方旱区农业[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1998.
- 赵人俊,庄一筠. 降雨径流关系的区域规律[J]. 华东水利学院学报:水文分册,1963(增刊2):53-68.
ZHAO Renjun, ZHUANG Yiling. The regional law of rainfall-runoff relations [J]. Journal of East China Institute of Water Conservancy: Hydrological Fascicle, 1963(Supp. 2): 53-68. (in Chinese)
- 邓沽霖. 超渗产流情况下降雨径流预报方法的建议[J]. 水利水电技术:水文副刊,1965(6):18-21.
DENG Gulin. Suggestions on the methods for precipitation runoff forecast in the case of infiltration excess runoff [J]. Water Resources and Hydropower Engineering: Hydrological Supplement, 1965(6): 18-21. (in Chinese)

- 7 刘昌明, 洪宝鑫, 曾明焯, 等. 黄土高原暴雨径流预报关系初步实验研究[J]. 科学通报, 1965(2): 158-161.
LIU Changming, HONG Baoxin, ZENG Mingxuan, et al. A tentative experimental study on storm-runoff in Loess Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1965(2): 158-161. (in Chinese)
- 8 王斌, 王贵作, 黄金柏, 等. 栅格分布式水文模型在高寒区日流量模拟中的应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 36-42.
WANG Bin, WANG Guizuo, HUANG Jinbai, et al. Distributed hydrological model based on grid and its application to daily runoff simulation for high-cold region[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 36-42. (in Chinese)
- 9 关志成. 寒区流域水文模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.
GUAN Zhicheng. Hydrological simulation of cold zone in China[D]. Nanjing: Hohai University, 2002. (in Chinese)
- 10 关志成, 朱元胜, 段元胜, 等. 扩展的萨克拉门托模型在寒冷地区的应用[J]. 水文, 2002, 22(2): 36-39.
GUAN Zhicheng, ZHU Yuanshen, DUAN Yuansheng, et al. Application of expanded Sacramento model in the north [J]. Journal of China Hydrology, 2002, 22(2): 36-39. (in Chinese)
- 11 DUAN Q, 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.
- 12 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 Zhijia, ZHOU Yi, HAPUARACHCHI H A P. Application of global optimization to calibration of Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(4): 376-379. (in Chinese)
- 13 陆桂华, 郦建强, 杨晓华. 水文模型参数优选遗传算法的应用[J]. 水利学报, 2004, 35(2): 50-56.
LU Guihua, LI Jianqiang, YANG Xiaohua. Application of genetic algorithms to parameter optimization of hydrology model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(2): 50-56. (in Chinese)
- 14 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, 35(11): 85-90.
WU Xinyu, CHENG Chuntian, ZHAO Mingyan. Parameter calibration of Xin'anjiang rainfall-runoff model by using parallel genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 85-90. (in Chinese)
- 15 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 Yan, LIU Changming, HU Tiesong, 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)
- 16 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 Suning, GAN Hong, WEI Guoxiao. Application of PSO algorithm to calibrate the Xin'anjiang hydrological model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5): 537-544. (in Chinese)
- 17 PENEV K, LITTLEFAIR G. Free search—a comparative analysis[J]. Information Sciences, 2005, 172(1-2): 173-193.
- 18 王斌, 张展羽, 张国华, 等. 一种新的优化灌溉制度算法——自由搜索[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 736-741.
WANG Bin, ZHANG Zhanyu, ZHANG Guohua, et al. Free search: a novel algorithm for optimizing irrigation schedule[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5): 736-741. (in Chinese)
- 19 王斌, 张展羽, 张国华, 等. 基于自由搜索的灌区优化配水模型研究[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1239-1243.
WANG Bin, ZHANG Zhanyu, ZHANG Guohua, et al. Optimized water rationing model based on free search for irrigation district [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(11): 1239-1243. (in Chinese)
- 20 王亚辉, 唐明奇. 多邻域链式结构的多目标粒子群优化算法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 365-372, 358.
WANG Yahui, TANG Mingqi. Optimization of multi-objective particle swarm algorithm based on multi-neighborhood cycle-chain structure [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 365-372, 358. (in Chinese)
- 21 朱大林, 詹腾, 张屹, 等. 多邻域结构多目标遗传算法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 309-315, 324.
ZHU Dalin, ZHAN Teng, ZHANG Yi, et al. Multi-neighborhood structure based multi-objective genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 309-315, 324. (in Chinese)
- 22 赵人俊. 流域水文模型比较分析研究[J]. 水文, 1989(6): 1-5.
ZHAO Renjun. A comparative analysis of hydrological model[J]. Journal of China Hydrology, 1989(6): 1-5. (in Chinese)
- 23 KOREN V, SMITH M, DUAN Q. Use of a priori parameter estimates in the derivation of spatially consistent parameter sets of rainfall-runoff models[M]. Duan Q, Gupta H V, Sorooshian S, et al. Calibration of Watershed Models, Washington, DC: American Geophysical Union, 2003: 239-254.
- 24 长办水文局. 水文预报模型译文集[M]. 武汉: 全国水文科技情报网, 1981: 1-52.
- 25 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6): 2-9.